

А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский,

Н. Н. Хренков, М. А. Федин

Моделирование электромагнитного поля  
в ферромагнитной стали при индукционном,  
электроконтактном и комбинированном нагреве

**Аннотация**

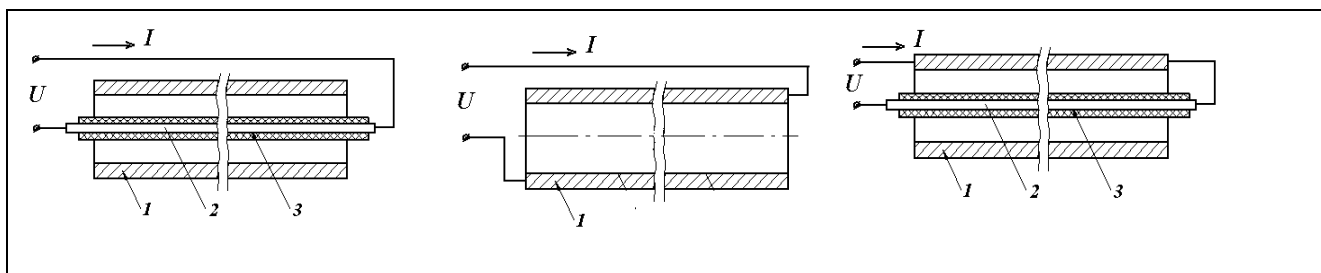
Рассмотрены вопросы моделирования электромагнитного поля в ферромагнитной стали при низкотемпературном нагреве труб в устройствах индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева с учётом гистерезиса. Разработаны методики численного расчёта и проведено сравнение параметров электромагнитного поля в ферромагнитной стали для устройств данных типов. Произведена оценка вклада гистерезиса в суммарную мощность тепловыделения в нагреваемой ферромагнитной стали.

**Введение**

Низкотемпературный индукционный, электроконтактный (резистивный) и комбинированный индукционно-резистивный виды нагрева изделий из ферромагнитной стали достаточно широко применяются для проведения различных технологических процессов, например, термообработка изделий, подогрев перед сваркой, нагрев пресс-форм, обогрев сосудов и др. При разработке таких нагревательных устройств возникает задача расчёта параметров электромагнитного поля в ферромагнитной проводящей среде, при решении которой необходимо учитывать нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости материала  $\mu$  от напряжённости магнитного поля  $\mathbf{H}$  [1].

Существуют технологические процессы, в которых нагрев стальных изделий используется, главным образом, для компенсации тепловых потерь: обогрев трубопроводов, резервуаров, бункеров и т.д., для чего требуются малые удельные поверхностные мощности (до  $5 \text{ кВт/м}^2$ ) и, соответственно, слабые магнитные поля ( $\mathbf{H} < 4000 \text{ А/м}$ ). При этом на параметры электромагнитного поля начинает заметно

сказываться влияние потерь энергии на гистерезис, что необходимо учитывать в расчётах характеристик устройств.

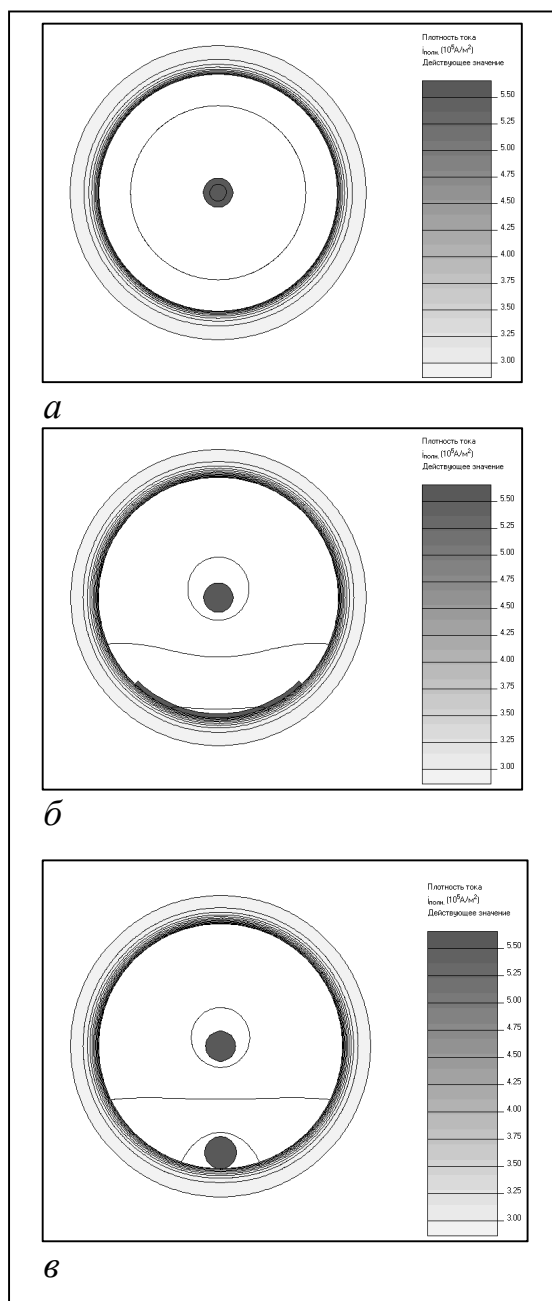


**Рис. 1.** Эскизы – устройств индукционного (а), резистивного (б) и индукционно-резистивного (в) нагрева: 1 – ферромагнитная труба, 2 – стержневой индуктор, 3 – электроизоляция

В этих случаях при расчёте устройств индукционного, резистивного и комбинированного индукционно-резистивного нагрева стальных изделий на промышленной частоте, в частности труб (схемы устройств показаны на рис. 1), возникает задача учёта мощности потерь на перемагничивание стали (гистерезис).

В настоящее время наиболее широкое применение для обогрева промышленных трубопроводов находят индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН). Длина этой системы обогрева, которая, как правило, не превышает 15 км, определяется соотношением питающего напряжения  $U$  (обычно не более 5 кВ) и линейного падения напряжения на нагревателе, равного  $0,3 \div 0,5$  В/м. Величина питающего напряжения ограничена, главным образом, возникновением частичных разрядов внутри изолирующих элементов при высоких напряжениях питания. Следует отметить, что возможна организация питания двух ИРСН (два плеча одной ИРСН) от одной трансформаторной подстанции, что позволяет увеличить длину обогреваемого участка трубопровода и сократить число подстанций в два раза. Это особенно актуально в условиях, когда вдоль трубопровода отсутствует подвод электроэнергии. Удельные мощности ИРСН могут достигать 120 Вт/м. Питание системы осуществляется от источника повышенного напряжения промышленной частоты.

Одним из путей увеличения длины системы является уменьшение линейного падения напряжения, достигаемое за счёт внутреннего шунтирования внешнего проводника (трубы). Добиться снижения линейного падения напряжения при той же мощности тепловыделения возможно с использованием внутренних шунтов



**Рис.2.** Распределение плотности тока в ИРСН с БВП, полученное в программе «ELCUT» для системы с шунтом в виде равномерного слоя по длине окружности трубы (а), пластины (б) и кабеля (в)

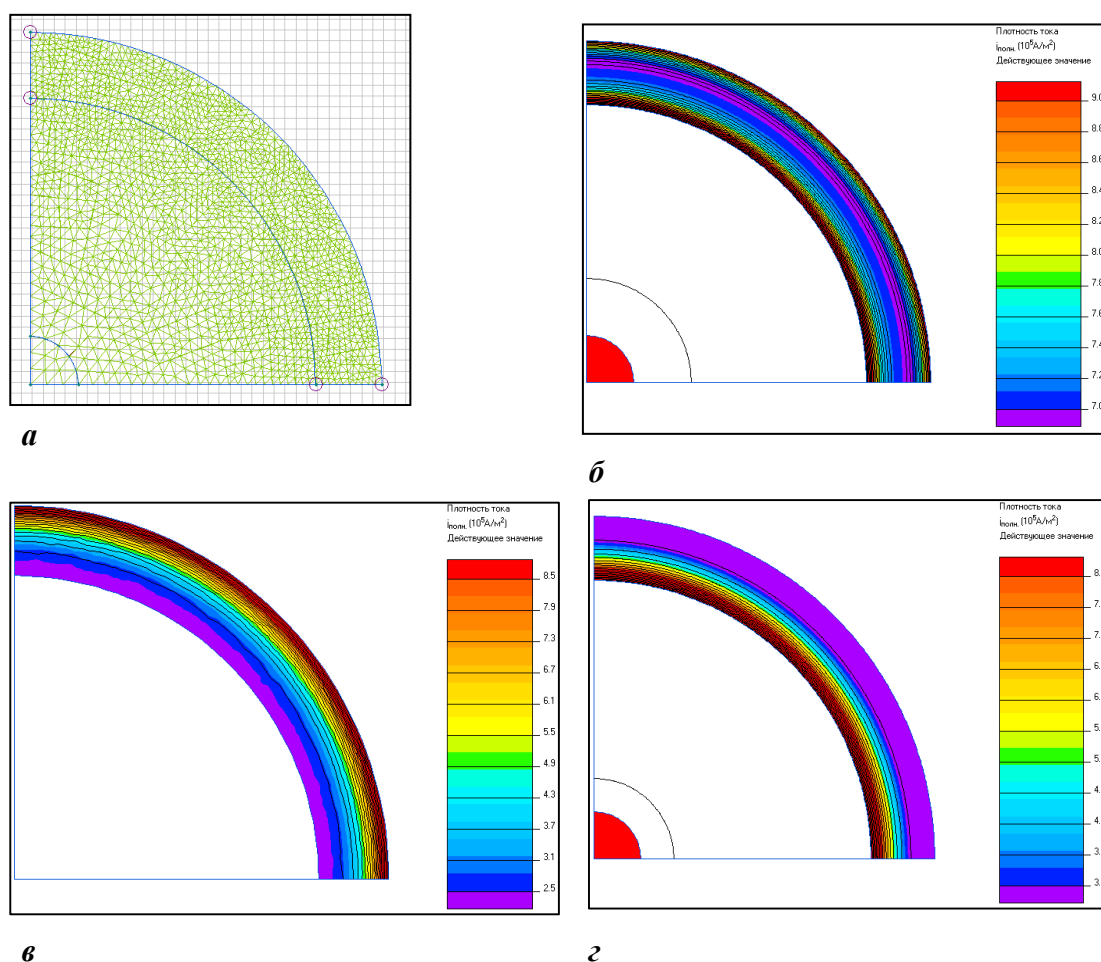
различной конфигурации. Возможны следующие способы организации шунтирования: в виде биметаллического внешнего проводника, пластины или кабеля, проложенных внутри ферромагнитной трубы. Как показано ниже все три способа являются эквивалентными, поскольку из закона полного тока следует, что напряжённость магнитного поля на внутренней поверхности ферромагнитной трубы будет одинаковой для всех случаев.

Проверка эквивалентности способов организации внутреннего шунтирования была осуществлена с помощью программы «ELCUT». На рис. 2 представлены распределения плотности тока в ИРСН для систем с шунтом в виде: равномерного слоя по длине окружности трубы (а), пластины (б) и кабеля (в). Как видно из рис. 2, картины поля в ферромагнитной трубе в этих случаях получаются одинаковыми. Практически равными для всех трёх вариантов оказываются и значения интегральных электрических и энергетических характеристик (мощность тепловыделения в элементах системы,

напряжение питания, напряжение на поверхности трубы и др.). Следует отметить, что эквивалентность способов организации внутреннего шунтирования была подтверждена и экспериментально.

## **Алгоритм расчёта электромагнитного поля в ферромагнитной стали**

Существующие универсальные программные пакеты, например, «ELCUT», позволяют проводить моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали методом конечных элементов. На рис.3 представлена расчётная область с наложенной сеткой дискретизации и распределения плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева, полученные в программе «ELCUT».



**Рис.3.** Расчётная область с сеткой дискретизации (а) и распределение плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного (б), резистивного (в) и индукционно-резистивного (з) нагрева

Моделирование производилось при следующих исходных данных: сечение медного центрального проводника –  $15 \text{ мм}^2$ , внешний проводник – труба 32x3 (сталь 10), ток  $I = 100 \text{ А}$ . В качестве граничного условия на внешней поверхности трубы задавалось значение напряжённости магнитного поля:  $\mathbf{H} = 994,7 \text{ А/м}$  (для индукционной и резистивной системы нагрева),  $\mathbf{H} = 0$  (для индукционно-резистивной системы нагрева), на осях симметрии для всех случаев – нулевая тангенциальная составляющая напряжённости магнитного поля  $\mathbf{H}_t = 0$ .

В таблицу 1 сведены рассчитанные в программе «ELCUT» и полученные экспериментально значения активных мощностей на 1м длины в стержневом индукторе  $P_1$  и ферромагнитной трубе  $P_2$  для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева.

**Таблица 1.** Сравнение результатов расчёта в программе «ELCUT» и эксперимента

	Индукционный нагрев	Резистивный нагрев	Индукционно-резистивный нагрев
Расчёт в программе «ELCUT»			
$P_1, Вт/м$	13,3	-	13,3
$P_2, Вт/м$	33,7	15,8	17,5
Эксперимент			
$P_1, Вт/м$	13,3	-	13,3
$P_2, Вт/м$	53,6	25,6	28,6

Из приведённой таблицы видно, что значения мощности тепловыделения в ферромагнитной трубе, полученные расчётным и экспериментальным путем, отличаются для всех трёх случаев почти на 40 %. Это объясняется тем, что пакет Программа «ELCUT» не учитывает потери, возникающие при перемагничивании стали. Поэтому необходимо разработать методику расчёта устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева с учётом перемагничивания. В работе применён метод расчёта параметров электромагнитного поля в стенке ферромагнитной стальной трубы, основанный на использовании электрических схем замещения [2, 3].

При расчёте принимается ряд допущений, в том числе:

1. Стенка трубы считается плоской, так как глубина проникновения электромагнитной волны в материал трубы много меньше радиуса нагреваемой трубы.
2. Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  и напряжённость магнитного поля  $\mathbf{H}$  изменяются во времени по синусоидальному закону.
3. Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  по толщине стенки трубы постоянна во времени и равна значению, соответствующему действующему значению напряжённости магнитного поля в данной точке.

Рассмотрим модель, основанную на электрической схеме замещения, применительно к ферромагнитной трубе внутренним диаметром  $d$  и толщиной  $\delta$ , по которой протекает ток  $I$  частотой  $f$ . В качестве примера принято разбиение стенки трубы по толщине на 4 слоя (в общем случае – на  $n$  слоёв). При этом

принято, что ток в каждом слое протекает в его середине (рис. 4). Заданы удельное электрическое сопротивление материала трубы  $\rho$ , основная кривая намагничивания  $\mathbf{B}(\mathbf{H})$  и зависимость объёмных потерь на гистерезис  $w_T$  от  $\mathbf{H}$  и  $f$ .

На рис. 5 представлены эквивалентные электрические схемы замещения для расчёта параметров электромагнитного поля в ферромагнитной трубе для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева.

В схеме используются следующие обозначения:  $U$  – напряжение питания;  $I_i$  – токи слоёв;  $R_i$  – активные сопротивления слоёв, учитывающие потери из-за индуцированных токов;  $L_i$  – собственные индуктивности слоёв;  $R_{ci}$  – активные сопротивления слоёв, учитывающие потери на гистерезис;  $i$  – номер слоя.

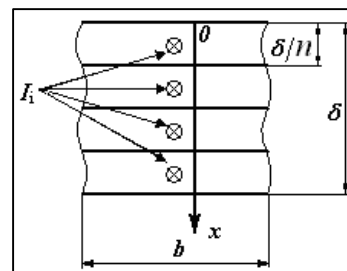
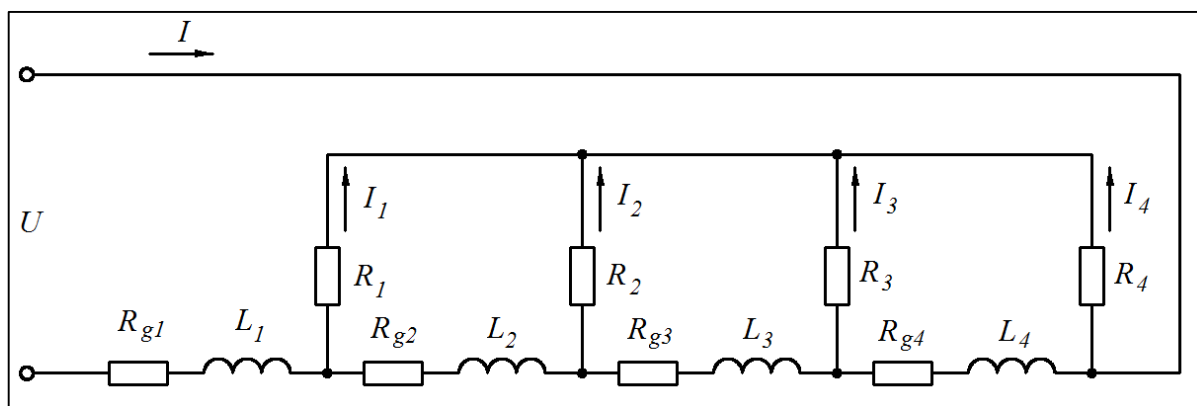
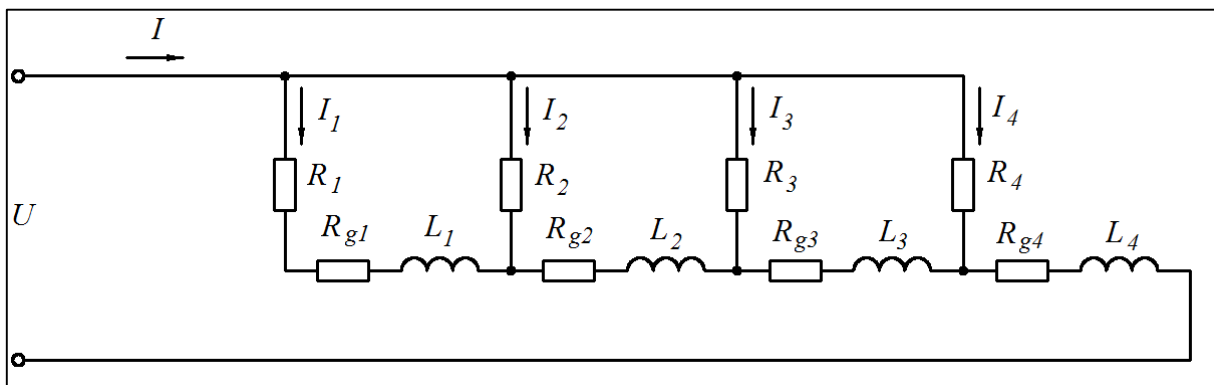


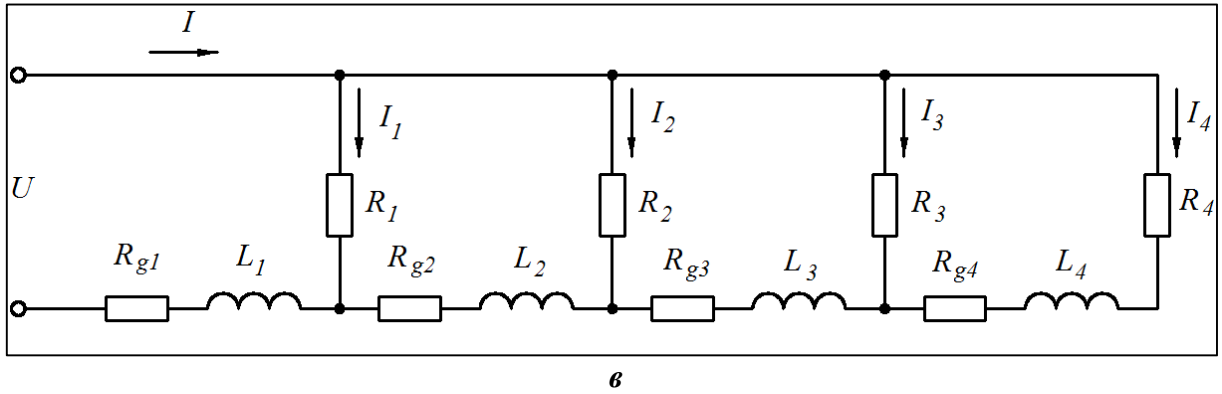
Рис. 4. Участок стенки трубы с разбиением на слои с токами  $I_i$



а



б



**Рис. 5.** Эквивалентные электрические схемы замещения для устройств индукционного (а), резистивного (б) и индукционно-резистивного (в) нагрева

Активное сопротивление и индуктивность слоя  $i$  рассчитываются по формулам:

$$R_i = \rho \cdot \frac{1}{\pi \cdot h \cdot (d_i + h)}, \quad (1)$$

$$L_i = \mu_i \cdot \mu_0 \cdot h \cdot \frac{1}{\pi \cdot d_i}, \quad (2)$$

где  $d_i$  и  $\mu_i$  – внутренний диаметр и относительная магнитная проницаемость слоя с номером  $i$ ;  $h = \delta/n$  – толщина слоя;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Активное сопротивление слоя  $i$ , учитывающее потери на гистерезис и зависящее от  $\mathbf{H}$ :

$$R_{gi} = \frac{P_{gi}}{I_i^2} \quad (3)$$

Расчёт поля в стенке трубы ведется итерационным методом: учитываются нелинейные зависимости  $\mu(\mathbf{H})$  и  $P_{gi}(H)$ . На каждой итерации составляется система линейных алгебраических уравнений по первому и второму законам Кирхгофа в соответствии со схемой на рис.5.

Для каждого из  $n-1$  независимых контуров электрической схемы замещения можно записать уравнение по второму закону Кирхгофа в виде:

для устройства индукционного нагрева –

$$\dot{I}_i \cdot R_i - \dot{I}_{i+1} \cdot R_{i+1} + \left( \dot{I} - \sum_{i+1}^n \dot{I}_i \right) \cdot (R_{2i+1} + j \cdot \omega \cdot L_{i+1}) = 0 \quad (4)$$

для устройства резистивного нагрева –

$$\dot{I}_i \cdot R_i - \dot{I}_{i+1} \cdot R_{i+1} + \sum_1^i \dot{I}_i \cdot (R_{2i} + j \cdot \omega \cdot L_i) = 0 \quad (5)$$

для устройства индукционно-резистивного нагрева –

$$\dot{I}_i \cdot R_i - \dot{I}_{i+1} \cdot R_{i+1} - \left( \sum_{i+1}^n \dot{I}_i \right) \cdot (R_{2i+1} + j \cdot \omega \cdot L_{i+1}) = 0 \quad (6)$$

Последнее уравнение системы записываем по первому закону Кирхгофа для схем на рис. 5:

для устройства индукционного нагрева –

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = 0 \quad (7)$$

для устройств резистивного и индукционно-резистивного нагрева –

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = \dot{I}. \quad (8)$$

Решением полученной системы уравнений является вектор-столбец действующих значений токов в слоях стенки трубы. После этого по закону полного тока рассчитываются действующие значения напряжённости магнитного поля в слоях:

- для устройств индукционного и индукционно-резистивного нагрева –

$$H_i = \frac{\dot{I} + \sum_{i=1}^n \dot{I}_i}{\pi \cdot d_i} \quad (9)$$

- для устройства резистивного нагрева –

$$H_i = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{I}_i}{\pi \cdot d_i}. \quad (10)$$

### Результаты расчёта электромагнитного поля в ферромагнитной стали

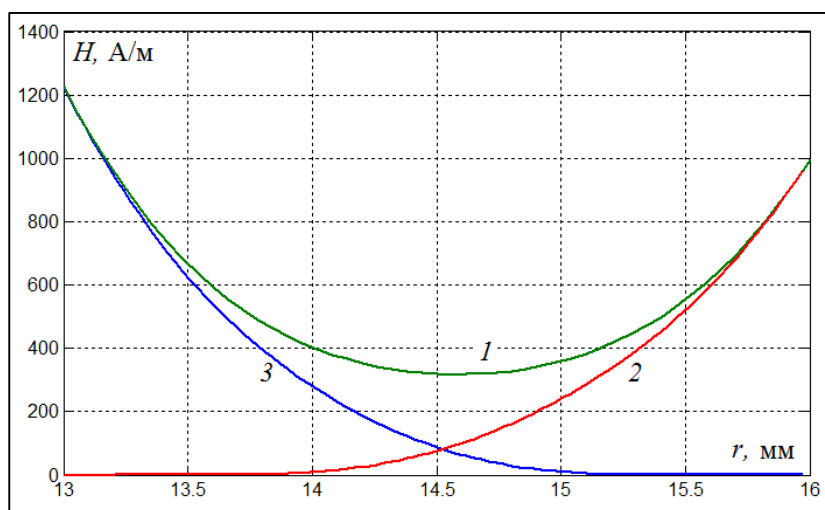


Рис. 6. Характеры распределения напряжённости магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного (1), резистивного (2) и индукционно-резистивного (3) нагрева

С использованием разработанных методик рассчитаны параметры электромагнитного поля в ферромагнитной стали с учётом гистерезиса. Установлено также, что изменения параметров электромагнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного, резистив-

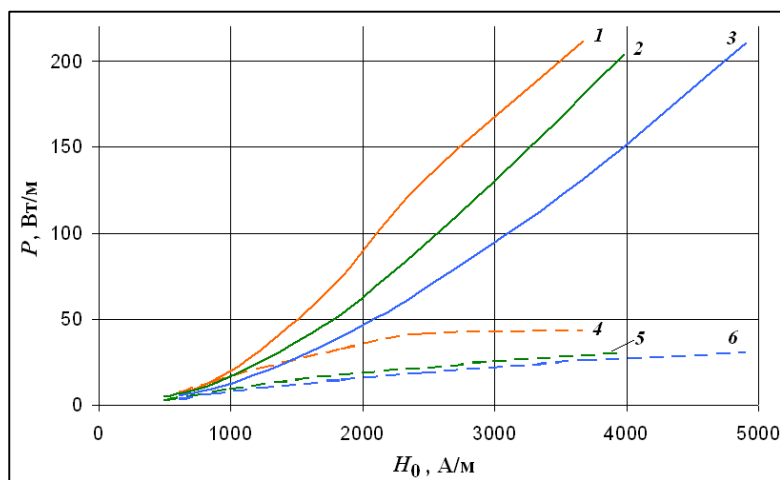


ного и индукционно-резистивного нагрева различно, что отражается на распределении напряжённости магнитного поля, токов и выделяющейся мощности по слоям. На рис. 6 представлены распределения напряжённости магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева при исходных данных, описанных выше.

**Таблица 2.** Сравнение результатов расчёта (разработанная программа) и эксперимента

	Индукционный нагрев	Резистивный нагрев	Индукционно-резистивный нагрев
Расчёт по разработанной программе			
$P_1, Вт/м$	13,3	-	13,3
$P_2, Вт/м$	53,2	26,0	28,4
Экспериментальные результаты			
$P_1, Вт/м$	13,3	-	13,3
$P_2, Вт/м$	53,6	25,6	28,6

Отметим, что для рассматриваемых случаев распределение значений относительной магнитной проницаемости  $\mu$  в точках стенки трубы будет различным соответственно зависимости  $\mu$  от напряжённости магнитного поля  $H$ . При этом результаты расчёта выделяющейся мощности на 1 м длины в стержневом индукторе  $P_1$  в ферромагнитной трубе  $P_2$  хорошо совпадают с результатами экспериментов (таблица 2).



**Рис. 7.** Активная мощность в трубе за счёт индуцированных токов и гистерезиса для устройств индукционного (кривые 1, 4), резистивного (кривые 2, 5) и индукционно-резистивного (кривые 3, 6) нагрева в зависимости от напряжённости магнитного поля

Проведённые с использованием созданных методик расчёты позволили определить влияние вклада потерь на гистерезис в суммарную активную мощность  $P$  в ферромагнитной трубе (на 1 м длины). Для систем индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева трубы из

конструкционной стали этот вклад составляет при значениях напряжённости магнитного поля на поверхности  $H_0$  до 2500 А/м более 24 % и при  $H_0$  до 3800 А/м — более 15 % (рис. 7). Для устройств индукционного и индукционно-резистивного

нагрева значение  $H_0$  соответствует внутренней поверхности ферромагнитной трубы, для устройства резистивного нагрева – внешней поверхности трубы.

### **Выводы**

1. Расчёт устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева по электрической схеме замещения позволяет учитывать потери на гистерезис. При этом отличие методики электрического расчёта устройств состоит только в самой схеме замещения.
2. В рассматриваемых устройствах при нагреве с малыми значениями напряжённости магнитного поля (до 4000 А/м) необходимо учитывать влияние магнитного гистерезиса на результаты расчёта; в частности, доля вклада гистерезиса в суммарную активную мощность в ферромагнитной загрузке при  $H_0$  до 2500 А/м составляет  $\geq 24 \%$ , при  $H_0$  до 3800 А/м –  $\geq 15 \%$ .
3. Разработанная методика расчёта может использоваться при проектировании устройств для нагрева ферромагнитной стали рассматриваемых типов.

### **Литература**

1. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Шатов В. А. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах // Электричество. – 2005. – № 11. – с.56-61.
3. Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Федин М. А. Расчёт электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки // Электричество. – 2009. – № 10. – с.54-61.

### **Сведения об авторах**

**Кувалдин Александр Борисович**, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматизированных электротехнологических установок и систем (АЭТУС) Национального Исследовательского Университета «МЭИ».

**Струпинский Михаил Леонидович**, кандидат технических наук, генеральный директор компании ООО «Специальные системы и технологии», г. Мытищи Московской обл.

**Хренков Николай Николаевич**, кандидат технических наук, советник генерального директора компании ООО «Специальные системы и технологии», г. Мытищи Московской обл.

**Федин Максим Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматизированных электротехнологических установок и систем (АЭТУС) Национального Исследовательского Университета «МЭИ».