

УДК 622.272

**В.Н. Анисимов, И.И. Логачёв**

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ И ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЪЕМЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА**

*Приведены оценочные расчёты пространственного распределения поля во всём объёме ферромагнитного материала, охваченного контуром (витком с радиусом от нескольких сантиметров до нескольких метров).*

*Ключевые слова: магнитный диполь, импульс тока, индукция магнитного поля, ферромагнитный материал, удельная энергия магнитного поля.*

### **V.N. Anisimov, I.I. Logachev THE ESTIMATION OF THE POSSIBLE ENERGY DENSITY AND PARAMETERS OF THE DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF THE IMPULSE MAGNETIC FIELD IN THE FERROMAGNETIC MATERIAL**

*The estimational calculations of the dimensional distribution of the field in the whole volume of the ferromagnetic field (countered by the spin of the radius from several centimeters to several meters) are given.*

*Key words: magnetic doublet, current impulse, magnetic field induction, ferromagnetic material, magnetic field energy per unit of volume.*

**В** статье [1] ранее была приведена теоретическая оценка возможности создания мощных импульсов тока при коммутации идеального магнитного диполя с ферромагнитным сердечником (приведены укрупнённые абсолютные значения тока, индукции магнитного поля и ориентировочная плотность энергии в объёме материала охваченного контуром.)

Однако практический интерес на сегодня представляют оценочные расчёты пространственного распределения поля во всём объёме ферромагнитного материала, охваченного контуром (витком с радиусом от нескольких сантиметров до нескольких метров), что и рассматривается в данной статье.

Использование витков с током для создания магнитного поля обладает существенными преимуществами по сравнению с другими конфигурациями, в которых магнитное поле быстро убывает как за счет расхождения фронта импульса, так и за счет поглощения его энергии веществом. Например, для бесконечного проводника с током зависимость индукции магнитного поля от радиуса дается выражением  $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ . Для  $I = 10^6 \text{ А}$  зависимость индукции магнитного поля от радиуса представлена на рис. 1

Как видно из рисунка, область, где, например, индукция магнитного поля превышает 1 Тл, сосредоточена вблизи проводника (0,2 м). Поэтому такая конфигурация не может найти достаточно широкого применения.

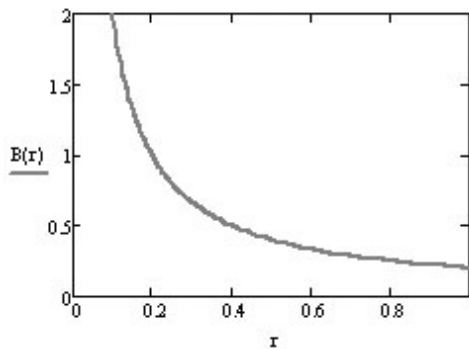


Рис. 1

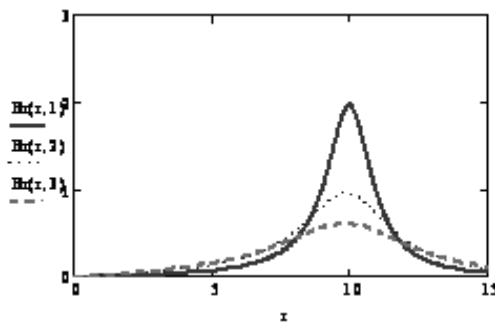


Рис. 2, а. Зависимость радиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_r(r,z)$

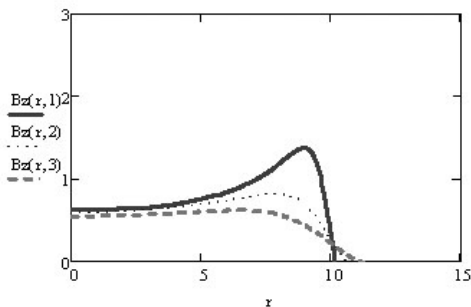


Рис. 2, б. Зависимость z-составляющей индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$

Попытаемся оценить возможность создания магнитных полей с помощью

“распределенного” в пространстве источника (с радиусом витка превышающим несколько метров) Наиболее простым таким источником магнитного поля является “магнитный диполь” - виток с током.

В работе [1] были приведены оценки возможности создания импульсов магнитного поля порядка 1 Тл с помощью витка с током, расположенного на поверхности ферромагнетика (например, для железистого кварцита с магнитной проницаемостью порядка  $\mu=10$ ) Для оценок брали значения магнитного поля на оси витка. Рассмотрим распределение магнитного поля во всем объеме ферромагнетика.

Напряженность магнитного поля витка с током дается выражениями [2]

$$H_r(r,z) = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{z}{r\sqrt{(a+r)^2+z^2}} \times$$

$$\times \left[ -K(k) + \frac{a^2+r^2+z^2}{(a-r)^2+z^2} E(k) \right],$$

$$H_z(r,z) = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2+z^2}} \times$$

$$\times \left[ K(k) + \frac{a^2-r^2-z^2}{(a-r)^2+z^2} E(k) \right],$$

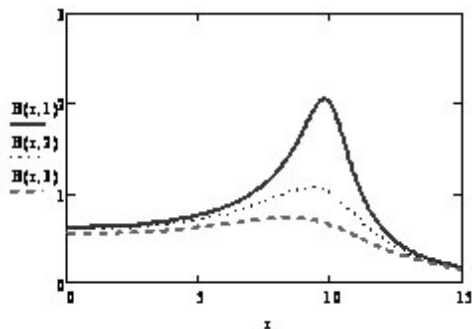
(1)

$$H_\phi(r,z) = 0,$$

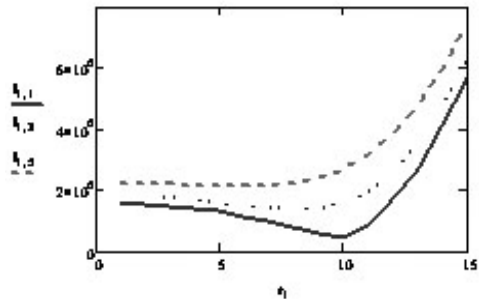
где  $k^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2+z^2}$ ,  $K(k)$  и  $E(k)$  – полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода,  $a$  – радиус витка,  $I$  – ток в витке.

Будем считать, что ферромагнетик однородный. Тогда индукция магнитного поля связана с напряженностью магнитного поля простой зависимостью  $B = \mu_0 H$

Зависимость  $B_r(r)$  и  $B_z(r)$  для трех значений  $z$  (1 м, 2 м, 3 м) представлена на рис. 2, а, б. При расчетах радиус витка принимался равным 10 м, ток  $I=10^6$  А



**Рис. 3. Зависимость от радиуса модуля вектора индукции магнитного поля  $B(r, z)$**



**Рис. 4**

В дальнейшем нас будет интересовать модуль вектора индукции магнитного поля  $B = (B_r^2 + B_z^2)^{1/2}$ . Зависимость  $B(r)$  для  $z=1, 2$  и  $3$  м представлена на рис. 3

Как видно из рисунка, область, где достигается необходимое магнитное поле (порядка 1 Тл), ограничена по радиусу размерами витка, а по оси витка (ось  $z$ ) величиной равной половине радиуса витка.

Так как нас интересуют магнитные поля с индукцией порядка 1 Тл, несколько изменим постановку задачи. Найдем токи, необходимые для создания такого магнитного поля в области витка. Для этого преобразуем приведенные выше формулы (1) напряженности магнитного поля к виду  $H_r = I / (2\pi) \cdot \Phi 1(r, z)$ ,  $H_z = I / (2\pi) \cdot \Phi 2(r, z)$  (2)

Воспользовавшись соотношениями, связывающими индукцию магнитного поля и напряженность ( $B = \mu_0 H$ ), выразим ток через индукцию магнитного поля

$$I = 2\pi B / (\mu_0 \sqrt{(\Phi 1)^2 + (\Phi 2)^2}) \quad (3)$$

Зависимость тока от радиуса для  $z=1$  м,  $3$  м и  $5$  м представлена на рис. 4

Важным параметром, характеризующим распределение магнитного поля, является его удельная энергия (кДж/м<sup>3</sup>). Плотность энергии магнитного поля дается выражением

$$w(r, z) = 0.5(H_r B_r + H_z B_z) \quad (5)$$

Энергия магнитного поля определяется интегрированием плотности энергии по всему пространству, занятому материалом:

$$W = \int_0^\infty \int_0^\infty w(r, z) r dr dz \quad (6)$$

Полагая плотность материала (породы)  $\rho = 3$  т/м<sup>3</sup> и объем  $V = \pi a^3 / 2$ , где  $a = 5$  м, находим, что удельная энергия, вкладываемая в 1 т породы, составляет  $\sim 270$  кДж/м<sup>3</sup> или 90 кДж/т.

#### Выводы

1. Использование витка с током (диполя) для создания магнитного поля необходимой величины обладает определенными преимуществами в сравнении с другими конфигурациями, где магнитное поле быстро убывает на расстояниях меньше одного метра.

2. Использование витка с током (диполя) значительно увеличивает область, где достигаются необходимые значения индукции магнитного поля. Из выполненных расчетов следует, что область пространства из ферромагнитного материала где достигается необходимый уровень магнитного поля (например порядка 1 Тл), может быть ограничена по радиусу размерами витка (диполя) (в нашем случае 10-15 м) а по оси витка (ось  $z$ )

величиной равной половине радиуса витка. Расчёты показывают возможность создания указанного уровня полей для диполя радиусом 25 -30 м и более.

3. Удельная энергия магнитного поля в объёме ферромагнитного ма-

териала ограниченного контуром (витком с током от нескольких метров до десятков метров) при создании поля с индукцией порядка 1 Тл может составлять порядка 300 кДж/м<sup>3</sup> или порядка 100 кДж/т.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В.Н., Дудченко О.Л. К теоретической оценке возможности создания мощных импульсов тока при коммутации идеального магнитного диполя с ферромаг-

нитным сердечником ГИАБ №1 2008. С. 49-52.

2. Тамм И.Е. Основы теории электричества ГИТТЛ, Москва, 1954. **ГИАБ**

### Коротко об авторах

Анисимов В.Н. – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,

Логачёв И.И. – кандидат технических наук,

Московский государственный горный университет,

Moscow state mining university, Russia, ud@msmu.ru



## ДИССЕРТАЦИИ

### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
ДЕМИНСКАЯ Наталия Григорьевна	Разработка технологии сохранения устойчивости литифицированных глин на основе регулируемой кольматации	25.00.15	к.т.н.
ЛАХТИОНОВ	Разработка гидравлической про-	25.00.15	к.т.н.

Сергей Владимирович	граммы промывки скважин с учётом влияния температуры на реологическое поведение буровых растворов		
---------------------	---	--	--