

## О ВЛИЯНИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО ТЕЛА НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ОСЕВОГО КАНАЛА СОЛЕНОИДА

Эсауленко В.А., Черников В.Ю., Корощенко А.В.

Донецкий государственный технический университет, кафедра ТОЭ

### Abstract

*Esaulenko V.A., Chernikov V.Y., Koroshchenko A.V. On the calculation of power, acting on the ferromagnetic unelectroconducting body, situated in the solenoid. This article is devoted to development of strategy of calculation of power, acting in the lumpy magnetic field of inductor on dispersed ferromagnetic body, under the single-line statement of the problem. Brought comparison.*

Электромагнитные устройства разгона частиц ферромагнитного материала находят применение в черной металлургии и в литейном производстве [1].

При разработке этих устройств одной из основных проблем является расчет магнитных сил, действующих со стороны магнитного поля на сгусток частиц в различных точках рабочего канала индуктора. В свою очередь расчет магнитных сил наиболее точно можно провести только с учетом возмущающего воздействия самих частиц на магнитное поле индуктора.

Объем сгустка разгоняемых ферромагнитных частиц определяется в данном классе устройств внутренним диаметром рабочего канала индуктора ( $d_{вн}$ ) и настройкой дозирующего устройства. Как показали результаты проведенных экспериментов, при максимальном объеме сгустка частиц для данного диаметра рабочего канала индуктора, длина сгустка не превышает его диаметр, а форма близка к цилиндрической. Исходя из этого оценка влияния на магнитное поле индуктора геометрических размеров и магнитных свойств сгустка разгоняемых частиц производилась при длине сгустка составляющей 0,2; 0,4; 0,8 его диаметра  $d_{вн}$ . Магнитная проницаемость сгустка ферромагнитных частиц, разгоняемых в данных устройствах, соответствует диапазону

$\mu_0 < \mu_r < (10-12) \mu_0$  [2], и принималась при исследовании равной  $\mu_r = 2 \mu_0, 3 \mu_0, 6 \mu_0, 11 \mu_0$ .

Анализ поля производился для индуктора соленоидного типа с внешним диаметром равным 3,5 и длиной 3 внутренних диаметра. Магнитная проницаемость элементов кожуха индуктора принималась равной  $100 \mu_0$ .

Расчет магнитного поля индуктора производился на ЭВМ методом конечных разностей после применения метода сведения вихревого магнитного поля токов к полю скалярных магнитных зарядов при использовании граничных условий III рода.

Возможность успешного использования указанного метода для решения двухмерных полевых задач, расчетные модели которых содержат тонкие протяженные ферромагнитные элементы конструкции (Рис.1), подтверждается сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, которые приведены на рис.2.

Результаты сравнения показывают, что отличие расчетных и экспериментальных значений аксиальной составляющей индукции  $B_z$  на оси соленоида не превышает 4 % внутри соленоида и 15 % вблизи элементов магнитопровода. Погрешность расчета радиальной составляющей индукции  $B_r$  на внутренней поверхности рабочего канала индуктора не более 15 % на всем исследуемом участке.

На рис.3 - рис.5 представлены результаты расчета распределения аксиальной и радиальной составляющих индукции для точек внутри рабочего канала индуктора лежащих как на оси соленоида, так и на расстоянии  $0,2 d_{\text{вн}}$ ;  $0,4 d_{\text{вн}}$ ;  $0,5 d_{\text{вн}}$  от нее (кривые 0-3).

Приведенные на рис.3 графики содержат зависимости, характеризующие магнитное поле индуктора без ускоряемого сгустка частиц, а на рис.4 - рис.5, с учетом его возмущающего воздействия для двух характерных положений тела - внутри, и на границе индуктора.

Их сравнение позволяет сделать вывод о том, что величина искажения магнитного поля зависит не только от характеристик самого разгоняемого

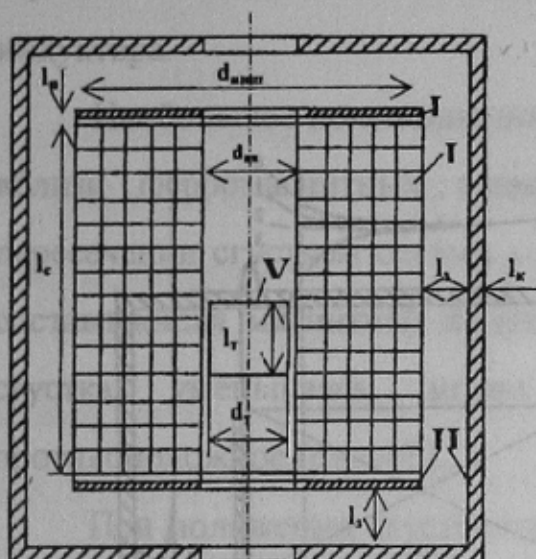


Рисунок 1-Расчетная модель индуктора.

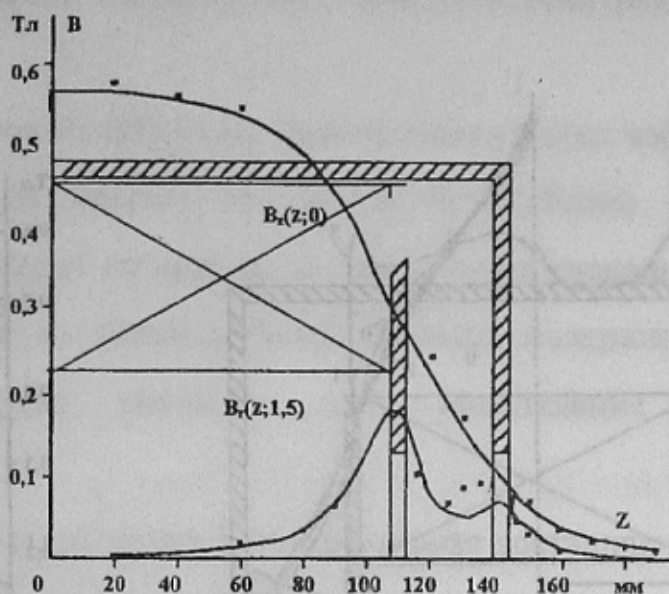


Рисунок 2-Распределение составляющих магнитной индукции без разгоняемого тела.

● результаты эксперимента;  
 — результаты расчета.

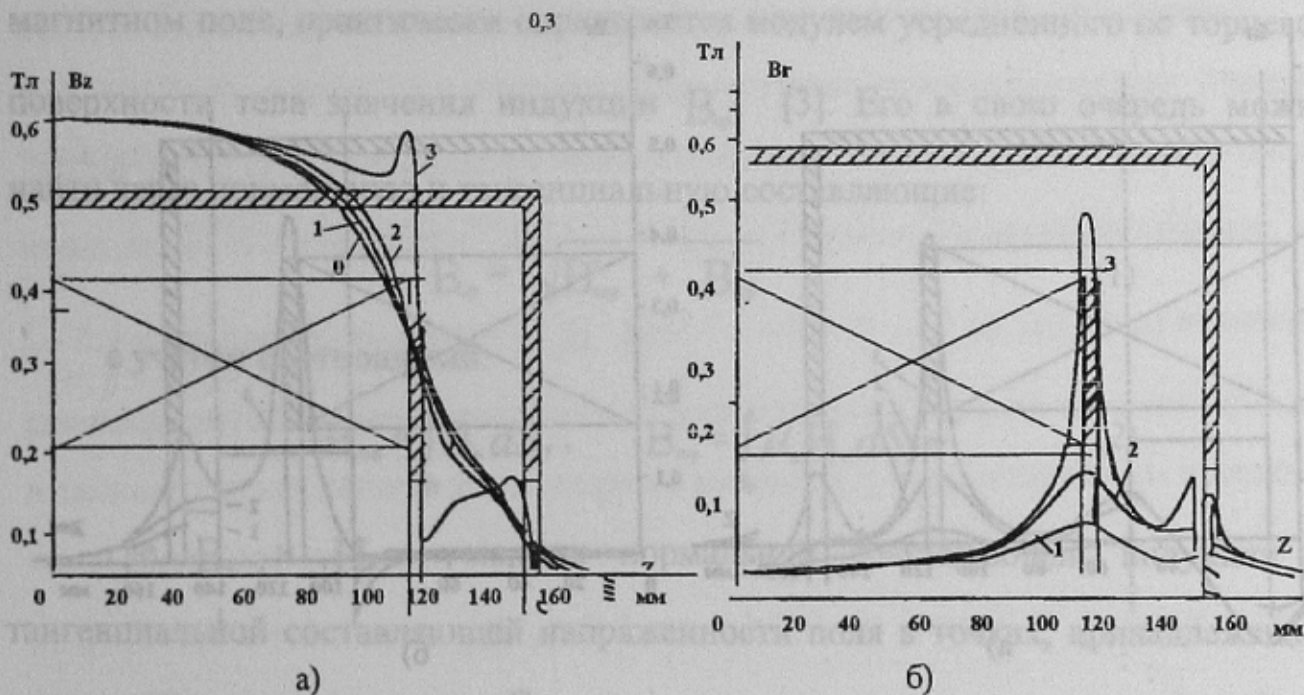


Рисунок 3- Распределение составляющих магнитной индукции в рабочем канале соленоида без разгоняемого тела:

- а) аксиальной составляющей на расстоянии от оси 0, 10мм, 20мм, 30мм;
- б) радиальной составляющей на расстоянии от оси 10мм, 20мм, 30мм.

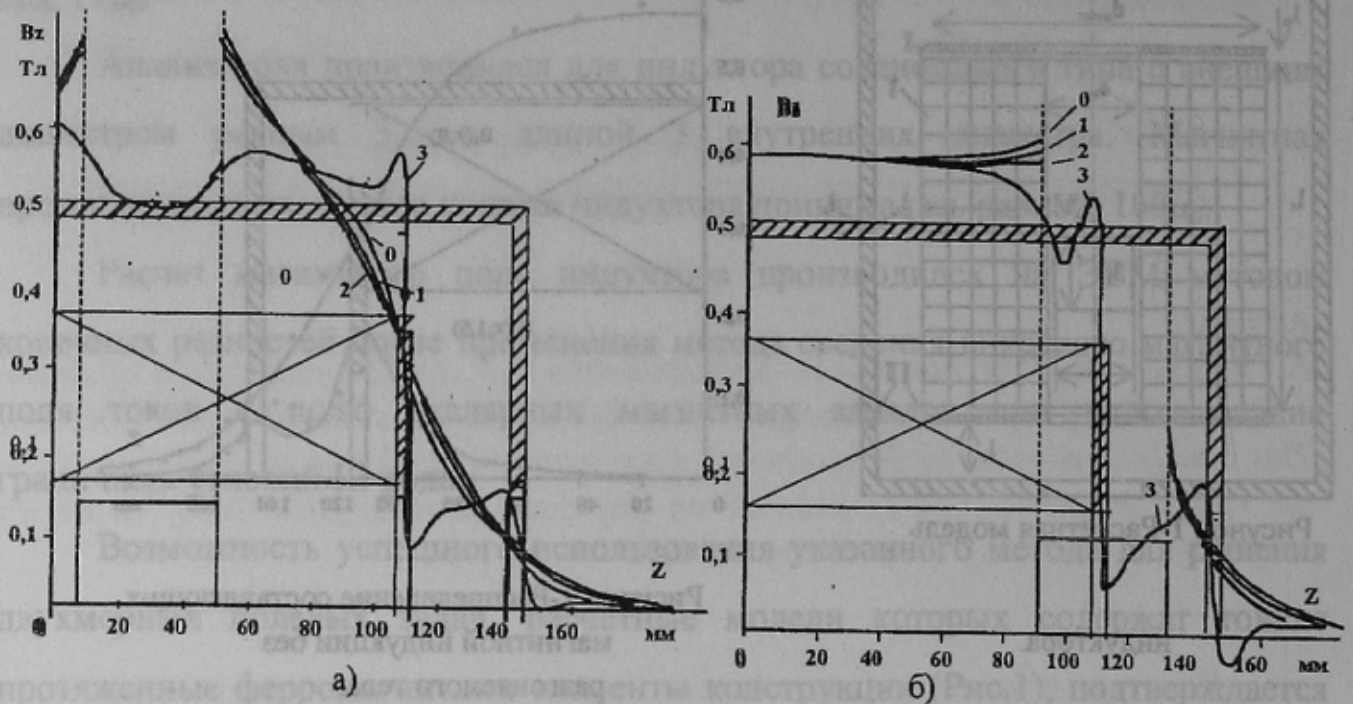


Рисунок 4 - Распределение аксиальной составляющей магнитной индукции в рабочем канале индуктора на расстоянии от оси 0, 10мм, 20мм, 30мм при координате разгоняемого тела: а)  $Z=30\text{мм}$ ; б)  $Z=110\text{мм}$ .

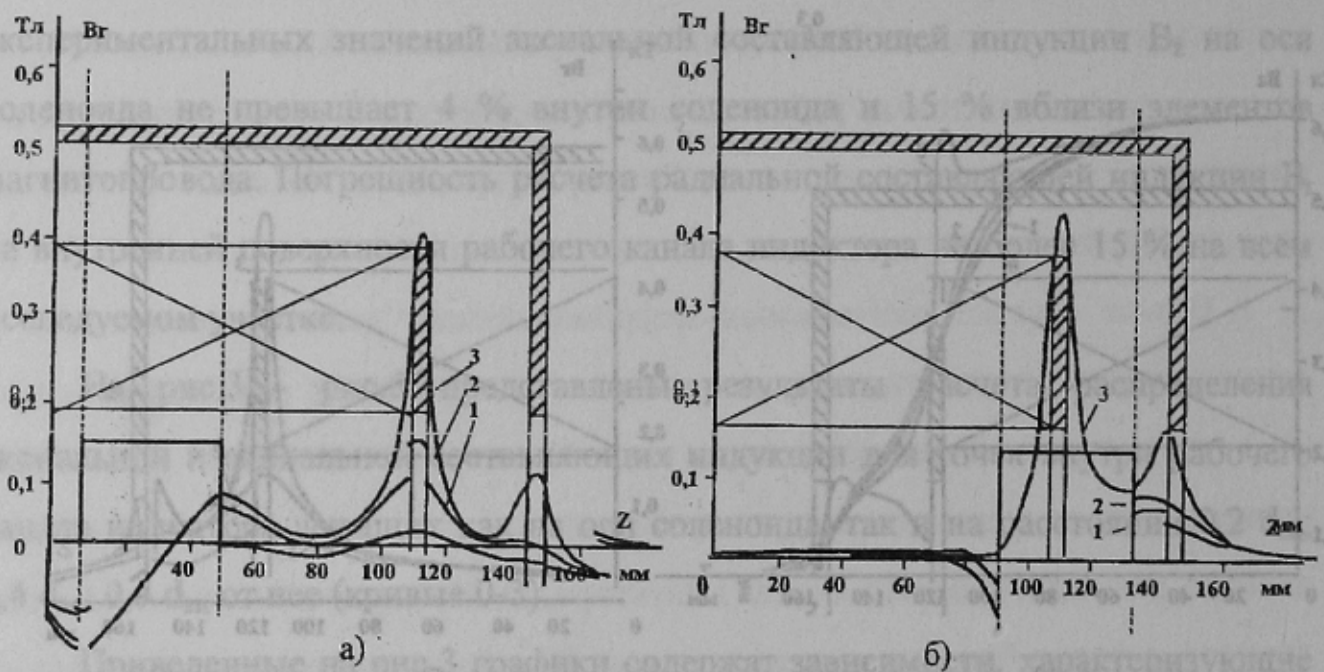


Рисунок 5-Распределение радиальной составляющей магнитной индукции в рабочем канале индуктора на расстоянии 10мм, 20мм, 30мм от оси при координате разгоняемого тела: а)  $Z=30\text{мм}$ ; б)  $Z=110\text{мм}$ .

сгустка частиц, но и от его положения относительно элементов конструкции индуктора.

Наибольшее искажение поля имеет место при нахождении сгустка частиц вблизи ферромагнитных элементов кожуха индуктора и особенно при пересечении сгустком осевых координат их границ. В этом случае аксиальная составляющая магнитной индукции на участке вблизи боковой поверхности сгустка, уменьшаясь, может даже изменить свое направление на противоположное (рис.4б).

При положении сгустка частиц вне индуктора радиальная составляющая индукции у торцевых поверхностей сгустка имеет меньшее значение, чем в неискаженном поле. Аналогичная картина наблюдается и у ближайшей к центру индуктора поверхности сгустка при нахождении ее внутри индуктора. При этом радиальная составляющая индукции принимает и отрицательные значения (рис.5).

Величина пондеромоторных сил, действующих на ферромагнитное тело в магнитном поле, практически определяется модулем усредненного по торцевой поверхности тела значения индукции  $B_{cp}$  [3]. Его в свою очередь можно найти через нормальную и тангенциальную составляющие:

$$B_{cp} = \sqrt{B_{n,cp}^2 + B_{t,cp}^2} \quad (1)$$

с учетом соотношений:

$$B_{n,cp} = \int_{S_T} B_n dS_T, \quad B_{t,cp} = \int_{S_T} \mu_0 H_t dS_T, \quad (2)$$

где  $B_n$  и  $H_t$  - модули нормальной составляющей индукции и тангенциальной составляющей напряженности поля в точках, принадлежащих поверхности интегрирования  $S_T$ .

Степень влияния на поле физических параметров разгоняемого сгустка частиц при его различных осевых координатах удобно характеризовать относительной переменной  $\Delta B_{cp}$ , определяющей изменение модуля усредненного значения индукции:

$$\Delta B_{cp}^* = \frac{B_{cp} + B_{cp}^{\delta}}{B_{cp}^{\delta}} \quad (3)$$

где базисное значение индукции  $B_{cp}^{\delta}$  находится согласно (1) для тела тех же геометрических размеров, но с  $\mu_a = \mu_0$ , то есть в неискаженном поле индуктора.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при длине сгустка частиц  $l_T \leq 0,4 d_{вн}$  и его магнитной проницаемости  $\mu_T \leq 2\mu_0$ , а также при нахождении сгустка длиной  $l_T \leq 0,2 d_{вн}$  с  $\mu_T \leq 11\mu_0$  внутри индуктора, искажение магнитного поля относительно невелико ( $B_{cp}^* \leq 0,25$ ), что соизмеримо с погрешностью данного метода расчета и может не учитываться при решении ряда практических задач.

Искажение поля, превышающее 50 % от первоначального, наблюдается при длине сгустка  $l_T \geq 0,8 d_{вн}$  при его магнитной проницаемости  $\mu_T \geq 5\mu_0$ .

Зависимость величины искажения магнитного поля от магнитных свойств сгустка частиц сильнее всего проявляется на начальном участке рассмотренного диапазона значений магнитной проницаемости сгустка частиц. Так, при изменении  $\mu_T$  в 2 раза от  $1,5\mu_0$  до  $3\mu_0$ ,  $\Delta B_{cp}^*$  возрастает в 2-3 раза, а при изменении  $\mu_T$  от  $3\mu_0$  до  $9\mu_0$ , то есть в 3 раза,  $B_{cp}^*$  увеличивается только в 1,5 - 2 раза. При изменении линейных размеров сгустка разгоняемых частиц величина искажения магнитного поля у торцевых поверхностей сгустка частиц зависит и от положения этих поверхностей относительно индуктора. Так, при увеличении длины сгустка  $l_T$  в 4 раза от  $0,2 d_{вн}$  до  $0,8 d_{вн}$   $B_{cp}^*$  возрастает в 1,7 - 2,7 раза при расположении торцевой поверхности сгустка внутри соленоида и в 2,6-4,4 раза при положении ее вне соленоида.

### Выводы

1. Степень искажения магнитного поля индуктора зависит как от линейных размеров сгустка и его магнитной проницаемости, так и от положения сгустка в канале индуктора. Наибольшее искажение поля имеет место при положении сгустка вблизи ферромагнитных элементов конструкции кожуха индуктора.
2. Искажение магнитного поля индуктора сгустком ферромагнитного материала следует учитывать при длине сгустка  $l_T \geq 0,8 d_{вн}$  и при его магнитной проницаемости  $\mu_T \geq 5\mu_0$ .

### Литература

1. Гриднев Ю.Г. и др. Применение электромагнитных полей в дробеметных устройствах // Литейное производство. - 1980. - №10. - с.24-25.
2. Левшин Г.Е., Никифоров А.П., Черногоров П.В. Магнитные и прочностные свойства материалов для магнитных форм // Литейное производство. - 1975. - №11. - с.18-20.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976. - 616с.