

О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ЧАСТИЦ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ НА ИХ ФОКУСИРОВКУ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ В ВАКУУМЕ

Н. И. Штмена

Черниговский государственный педагогический институт им. Т. Г. Шевченко,
Чернигов, Украина
(Поступило в Редакцию 25 апреля 1994 г.)

Фокусировки мелких сферических частиц магнетиков постоянными магнитными полями рассмотрены в [1-4]. В [5] изложены вопросы фокусировки частиц диа- и парамагнетиков эллипсоидальной формы в вакууме под действием магнитных полей. Настоящая работа посвящена фокусировкам в вакууме мелких ($10^{-1} - 10^{-4}$ см) частиц ферромагнетиков, имеющих форму вытянутого эллипсоида вращения с эксцентриситетом

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \quad (1)$$

(A, B, C — полуоси эллипсоида. $A > B = C$), под действием осесимметричных [1], плоских [2], трансаксиальных [3] и квадрупольных [4] постоянных магнитных полей. Как и в [1-5], задача существенно упрощается рассмотрением разреженных пучков, взаимодействием между частицами которых можно пренебречь.

При движении в магнитном поле вследствие намагниченности \mathbf{J} на частицу в предположении квазистационарности напряженности \mathbf{H} поля действует сила

$$\mathbf{F} = \frac{4}{3} \pi A \cdot B^2 (\mathbf{J} \nabla) \mathbf{H}. \quad (2)$$

Намагниченность представим состоящей из индуцированной $\mathbf{J}_и$ полем и остаточной \mathbf{J}_o .

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_и + \mathbf{J}_o. \quad (3)$$

Идеализируя задачу, считаем, что намагниченность частицы направлена вдоль большой оси эллипсоида, которая при движении направлена вдоль напряженности поля.¹ Индуцированная намагниченность, как и в [5],

$$\mathbf{J}_и = \frac{1}{4\pi} \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)n} \mathbf{H}, \quad (4)$$

где μ — магнитная проницаемость частицы, n — коэффициент формы.

$$n = \frac{1 - \epsilon^2}{2\epsilon^3} \left(\ln \frac{1 + \epsilon}{1 - \epsilon} - 2\epsilon \right). \quad (5)$$

¹ При движении ось совершает колебания относительно \mathbf{H} , что усредненно эквивалентно уменьшению эксцентриситета.

Полагаем, что остаточная намагниченность в процессе фокусировки по модулю не изменяется ($J_0 = \text{const}$), тогда

$$\mathbf{J}_0 = J_0 \frac{\mathbf{H}}{|\mathbf{H}|}. \quad (6)$$

Учитывая вышеизложенное,

$$\mathbf{F} = \left(\frac{3\pi J_0}{4 |\mathbf{H}|} + \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)n} \right) A \cdot B^2 (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{H}. \quad (7)$$

Эта сила отличается от силы

$$\mathbf{F} = \left(\frac{3\pi J_0}{4 |\mathbf{H}|} + \frac{\mu - 1}{\mu + 2} \right) R^3 (H \nabla) \mathbf{H}, \quad (8)$$

действующей на частицу сферической формы [1], постоянным множителем.² Поэтому дифференциальные уравнения движения эллипсоидальных частиц ферромагнетиков в вакууме под действием постоянных магнитных полей останутся такими же, как и для сферических частиц, но с параметром, зависящим от эксцентриситета.

Например, дифференциальное уравнение параксиальных траекторий сферических частиц ферромагнетиков в осесимметричном поле [1] в комплексной форме

$$u'' + \left(a + \frac{b}{|H|} \right) H H' \frac{u'}{\dot{z}^2} + \frac{1}{2} \left(a + \frac{b}{|H|} \right) \left(H H'' - \frac{H'^2}{2} \right) \frac{u}{\dot{z}^2} = 0, \quad (9)$$

где $u = r e^{i\vartheta}$, r , ϑ , z — цилиндрические координаты; $H = H(z)$ — распределение напряженности поля вдоль оси симметрии; $b = \frac{J_0}{\rho}$, ρ — плотность частиц; штрихами обозначены производные по z , остается справедливым и для эллипсоидальных частиц, но с параметром

$$a = \frac{1}{4\pi} \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)n} \frac{1}{\rho} > 0, \quad (10)$$

$$a = \frac{3}{4\pi} \frac{\mu - 1}{\mu + 2} \frac{1}{\rho} > 0 \quad (11)$$

для сферических частиц.

Как и в [1], для эллипсоидальных частиц можно выделить два предельных случая фокусировок: по индуцированной намагниченности, когда

$$J_0 \ll \left| \frac{\mu - 1}{4\pi(1 + (\mu - 1)n)} H \right|, \quad (12)$$

и по постоянной остаточной намагниченности, когда

$$J_0 \gg \left| \frac{\mu - 1}{4\pi(1 + (\mu - 1)n)} H \right|. \quad (13)$$

Соответственно фокусные расстояния тонкой слабой магнитной линзы при фокусировке по индуцированной намагниченности выразятся

$$f = -\frac{4v_0^2}{3aQ}, \quad (14)$$

² Что справедливо, когда μ не изменяется в процессе фокусировки.

где $Q = \int_{z_1}^{z_2} H^2 dz$, v_0 — начальная осевая скорость частиц, и по постоянной намагниченности

$$f = -\frac{4v_0^2}{bP}, \quad (15)$$

где

$$P = \int_{z_1}^{z_2} \frac{H^2}{|H|} dz,$$

(z_1, z_2) — область поля линзы.

В обеих фокусируемых линза действует как рассеивающая ($f < 0$). В случае фокусировки по постоянной намагниченности фокусное расстояние для эллипсоидных частиц остается таким же, как и для сферических, т. е. не зависит от формы частиц. При фокусировке по индуцированной намагниченности

$$f = 3 \frac{1 + (\mu - 1)n}{\mu + 2} f_c, \quad (16)$$

где f_c — фокусное расстояние для сферических частиц.

Так как $0 < n < 1/3$, то практически $0 < f/f_c < 1$, поскольку для ферромагнетиков $\mu \gg 1$. Т. е. f может существенно отличаться от f_c . Например, при $\mu = 100$ для иглообразных ($n \rightarrow 0$) частиц $f \approx 3 \cdot 10^{-2} \cdot f_c$. Аналогичные замечания об особенностях фокусировок эллипсоидальных частиц ферромагнетиков имеют место и в случаях плоских, трансаксиальных и квадрупольных фокусирующих магнитных полей.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что зависимость фокусировок частиц ферромагнетиков от их формы под действием постоянных магнитных полей определяется характером намагниченности частиц. При постоянной остаточной намагниченности форма частиц не влияет существенно на параметры фокусировок, в случае индуцированной намагниченности такое влияние может проявляться сильно.

Отметим, что допущенные в работе упрощения позволили рассмотреть зависимость фокусировок частиц от их формы постоянными магнитными полями в идеализированном виде. В реальных условиях необходимо учитывать сложность намагничивания ферромагнетиков, гистерезисный характер и т. п. Однако и проведенный анализ будет полезным при рассмотрении реальных фокусировок частиц. Так, при фокусировке частиц из магнитно-мягких материалов относительно слабыми постоянными полями следует ожидать зависимости параметров фокусировок от формы частиц. В случае фокусировки достаточно сильными полями, когда намагниченность частиц достигает насыщения, параметры таких фокусировок не должны существенно зависеть от формы частиц.

Список литературы

- [1] Штена Н.И. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 9. С. 1839–1845.
- [2] Штена Н.И. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 729–734.
- [3] Штена Н.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 1967–1972.
- [4] Штена Н.И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 7. С. 1393–1398.
- [5] Штена Н.И. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 182–184.