

АНАЛИЗ МЫСЛЕННОГО ОПЫТА ЭЙНШТЕЙНА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПРОВОДНИКЕ

Бранспиз Ю.А., д.т.н., проф.

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

Украина, 91034, Луганск, квартал Молодежный, 20-а, ВНУ им. В. Даля, кафедра прикладной физики

тел. (0642) 46-77-36, e-mail: branspiz@mail.ru

Показано, що врахування товщини диска в уявному експерименті Ейнштейна не дозволяє зробити однозначний висновок про опис сили на електричний струм у магнітній речовині через напруженість або індукцію магнітного поля, оскільки істотним при цьому є спосіб опису сили магнітного поля на магнітну речовину.

Показано, что учет толщины диска в мысленном опыте Эйнштейна не позволяет сделать однозначный вывод об описании силы на электрический ток в магнитном веществе через напряженность или индукцию магнитного поля, поскольку существенным при этом является способ описания силы магнитного поля на магнитное вещество.

В статье анализируется описанный Эйнштейном в [1] мысленный опыт, на основании которого им сделан вывод о том, что силовое воздействие на электрический ток в проводнике из вещества с магнитными свойствами должно описываться не объемной плотностью силы в традиционной форме записи вида

$$\vec{j} \times \vec{B}, \quad (1)$$

а объемной плотностью силы вида

$$\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}, \quad (2)$$

где \vec{j} – вектор объемной плотности электрического тока, \vec{B} и \vec{H} – соответственно, векторы индукции и напряженности магнитного поля в магнитном веществе проводника.

В этом мысленном опыте Эйнштейн рассматривает систему, изображенную на рис. 1, представляющую собой некоторый "... металлический диск, по которому от центра к краю течет ток ...", поддерживаемый батареей [1]. При этом для рассматриваемой системы принимается следующее [1]:

- "... в силу принципа равенства действия и противодействия ... результирующая всех электромеханических сил, действующих на различные части системы, равна нулю...";

- "... равенство нулю этой результирующей должно выполняться и в том частном случае, когда диск сделан из немагнитного вещества...".

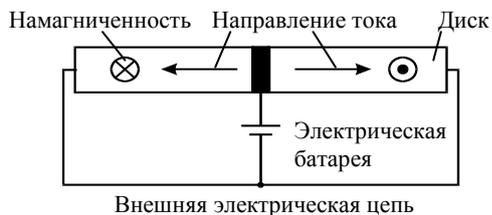


Рис. 1. Схема мысленного опыта Эйнштейна

В последнем случае (когда диск сделан из немагнитного вещества) равная нулю суммарная сила на все части системы складывается из (отметим, Эйнштейн такого разделения суммарной силы не делает): силы магнитного поля тока в диске на токи вне

диска; силы магнитного поля токов вне диска на токи в диске. Причем, очевидно, что суммарная сила магнитного поля токов в диске на сами эти токи равна нулю, как равна нулю и суммарная сила магнитного поля токов вне диска на сами эти внешние токи (отметим, что на это в [1] также не указывается).

Далее Эйнштейн рассматривает случай, "... когда диск сделан из какого-нибудь твердого материала, например, из стали ...", представляя собой "... постоянный магнит, причем его силовые линии являются окружностями с центром в центре диска" (рис. 1). Причем магнитный диск, намагниченный так, как это принято в рассматриваемом мысленном опыте создает магнитное поле с нулевой напряженностью как вне, так и внутри диска [1].

Произойдут ли изменения в силовых взаимодействиях в системе в этом случае? Эйнштейн считал, что выполнение диска из магнитного твердого материала не изменит силовых взаимодействий ни в целом, ни в частях. В самом деле, как объясняется в [1]:

- "... в силу принципа равенства действия и противодействия, каково бы ни было вещество, из которого изготовлен диск, результирующая всех электродинамических сил, действующая на различные части системы, равна нулю";

- намагниченность диска "... не может приводить к появлению соответствующей дополнительной пондеромоторной силы, ибо если бы эта сила была единственной появляющейся пондеромоторной силой, то для рассматриваемой системы оказался бы нарушенным закон равенства действия и противодействия".

Но это объяснение не является достаточным. В самом деле:

- поскольку вне магнитного диска магнитное поле отсутствует, то силовое воздействие со стороны диска на внешний ток будет определяться лишь магнитным полем тока в диске, как и для случая немагнитного диска;

- поэтому, и в самом деле, намагниченность диска не изменит силы на внешний ток, а, следовательно, тем самым неизменной будет и сила со стороны внешнего тока на намагниченный диск с током;

- но эта сила внешнего тока на намагниченный диск с током складывается из силы на собственно ток в диске и на намагниченное вещество;

- тогда, неизменность силы внешнего тока на намагниченный диск с током (в сравнении со случаем немагнитного диска), дает нулевую силу на магнитное вещество диска со стороны магнитного поля внешнего тока.

Однако, кроме указанных сил между диском с током и внешним током, в системе имеют место силы взаимодействия внутри магнитного диска, вызванные током в нем и его намагниченностью. Конечно, эти внутренние силы взаимно уравниваются (действие магнитного поля тока диска на его вещество уравнивается действием поля магнитного вещества диска на токи в нем). Но именно недоучет этих внутренних сил, как представляется, и привел Эйнштейна к выводу о том, что сила на ток в магнитном диске должна описываться плотностью силы вида $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$ (так в СИ, у Эйнштейна просто $\vec{j} \times \vec{H}$).

Итак, считая, что сила, испытываемая магнитным веществом диска равно нулю, Эйнштейн делает вывод о том, что и магнитное вещество диска не оказывает силового воздействия на внешние и внутренние токи. Как следствие он и заключает, что:

- внутри магнитного диска индукция магнитного поля от намагниченности его не равна нулю (напряженность \vec{H}_m от этой намагниченности равна нулю, а индукция в диске от намагниченности равна $\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}$, где \vec{M} – намагниченность диска);

- такому отсутствию силового воздействия магнитного вещества диска на токи в нем соответствует именно выражение вида $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$.

Выше указано на то, что магнитное поле внешнего тока на намагниченный диск с током дает нулевую силу на магнитное вещество диска со стороны магнитного поля внешнего тока. Что же касается силового воздействия на намагниченное вещество диска со стороны тока в нем, то принятие его равным нулю (на чем, собственно, и строятся рассуждения Эйнштейна) не является очевидным.

В этой связи отметим, что магнитное поле тока в диске не будет оказывать силового воздействия на намагниченное вещество диска лишь тогда, когда это поле будет нулевым. А таким оно является (с учетом симметрии системы и закона полного тока) лишь в горизонтальной плоскости симметрии диска. То есть, если учитывать толщину диска, то магнитное поле от тока в нем нельзя считать нулевым. Поэтому, с учетом того, что магнитное поле тока в диске в самом этом диске не нулевое, нельзя и утверждать, что это поле не оказывает какого-то силового действия на намагниченное вещество диска. При этом описание такого силового воздействия, очевидно, зависит от того, в какой форме записи представить объемную плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество. Соответственно с этим (учет толщины диска и способа описания пондеромоторной силы на его вещество) и надо анализировать рассматриваемый мысленный опыт Эйнштейна.

С этой целью рассмотрим не диск, а бесконечную в плоскости (x, y) пластину с намагниченностью по оси y -ов, как это показано на рис. 2, на котором также показано направление тока в пластине (соответственно системе, рассмотренной Эйнштейном). Такой переход от диска к пластине, как несложно видеть, принципиально не изменяет ничего в физической сути соответствующих процессов, но существенно упрощает анализ.

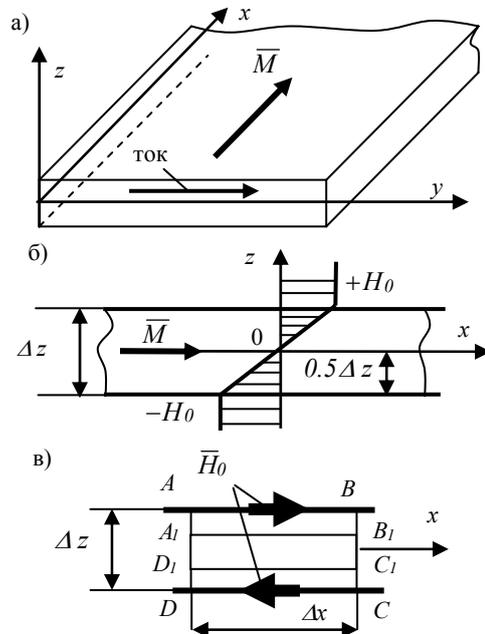


Рис. 2. Плоскопараллельный аналог мысленного опыта Эйнштейна

Применительно к магнитному веществу пластины под напряженностью \vec{H} следует понимать, согласно изложенному, напряженность магнитного поля тока в пластине. Эта напряженность, в силу симметрии рассматриваемой системы может быть легко выведена из закона полного тока, что дает для нее направленность по оси x -ов (рис. 2) и линейное распределение от некоторого значения $-H_0$ до значения $+H_0$, соответственно на нижней и верхней стороне пластины. В самом деле, обозначим плотность тока в пластине \vec{j}_y (нижний индекс указывает направленность вектора плотности по оси y -ов, рис. 2,а). Далее, применим закон полного тока к контуру $ABCD$ (рис. 2,в), учитывая при этом, что рассматриваемая напряженность имеет только x -овую составляющую (в силу симметрии). В результате можно записать равенство $2 \cdot H_0 \cdot \Delta x = j_y \cdot \Delta x \cdot \Delta z$, из которого для напряженности H_0 несложно получить следующее выражение $H_0 = 0.5 \cdot j_y \cdot \Delta z$. Аналогично этому, применив закон полного тока к любому контуру $A_1B_1C_1D_1$ (рис. 2,в), для напряженности поля в пластине (при учете пропорциональности напряженности высоте контура интегрирования) можно записать выражение (здесь z – вертикальная координата, рис. 2)

$$H_x = j_y \cdot z. \quad (3)$$

Тогда, если принять, например, что объемная плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество определяется известным выражением $\mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}|$ [3], то в этом случае градиент модуля напряженности магнитного поля, действующего на магнитное вещество пластины определится, согласно (3), следующим равенством (здесь $\vec{1}_z$ – единичный вектор по оси z , рис. 2)

$$\text{grad} |\vec{H}| = \text{grad} H_x = \text{grad} (j_y \cdot z) = j_y \cdot \vec{1}_z,$$

что, с учетом постоянства намагниченности ($\vec{M} = M_y \cdot \vec{1}_y = \text{const}$, здесь $\vec{1}_y$ – единичный вектор по оси y), дает для силы на выделенную часть пластины выражение

$$F_V = \mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}| \cdot V = \mu_0 \cdot M_x \cdot j_y \cdot V \cdot \vec{1}_z. \quad (4)$$

Причем очевидно, что, согласно равенству действия и противодействия, эта сила должна быть равна по модулю силе, со стороны магнитного поля вещества пластины на ток в ней. Но, ведь напряженность магнитного поля намагниченной пластины равна нулю. Это следует из закона полного тока, примененного непосредственно к любому лежащему в плоскости (x,z) симметричному контуру внутри пластины, горизонтальные ребра которого направлены по вектору \vec{M} (в силу симметрии рассматриваемой системы, если у указанной напряженности и есть составляющая, то она направлена именно по оси y -ов). То есть, с учетом связи векторов магнитного поля, в рассматриваемом случае индукция магнитного поля от намагниченного вещества пластины равна

$$\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}.$$

Следовательно, сила на ток в пластине, дающая в сумме с силой по (4) ноль, должна определяться в этом случае (описания силы на магнитное вещество выражением $\mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}|$) произведением плотности тока на *индукцию магнитного поля*.

Примем теперь, что плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество определяется, например, другим также известным выражением $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$ [3], которое для рассматриваемого плоскопараллельного аналога м мысленного опыта Эйнштейна (рис. 2) может быть представлено в виде (здесь \vec{H} – напряженность магнитного поля, созданного в магнитной пластине током пластины)

$$\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H} = \mu_0 \cdot M_x \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial x}.$$

Тогда, с учетом (3), в этом случае для силы со стороны магнитного поля тока пластины на намагниченное вещество пластины имеем тождественный ноль. При этом для того, чтобы удовлетворить закону о равенстве действия и противодействия, сила со стороны магнитного поля намагниченного вещества пластины на ток в ней также должна быть принятой равной нулю. Последнее означает, что сила на ток в пластине должна определяться, в случае принятия выра-

жения $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$, уже произведением плотности тока на *напряженность магнитного поля*.

То есть, рассуждения Эйнштейна действительны при описании силы магнитного поля на магнитное вещество выражением $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$, которое как раз и обосновывается Эйнштейном (совместно с Лаубом) в более ранней работе [2], и, наверное, неявно принималось им в [1].

В качестве еще одного примера, примем, что удельная пондеромоторная сила магнитного поля определяется выражением $-\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \text{div} \vec{M}$ [3], также достаточно известным. Использование этого выражения позволяет выразить суммарную силу магнитного поля токов в пластине на магнитное вещество пластины как объемный интеграл по объему пластины от выражения $-\mu_0 \cdot H_x \cdot \text{div} \vec{M} \cdot \vec{1}_x$, которое, учитывая условие $\vec{M} = M_y \cdot \vec{1}_y = \text{const}$, равно нулю во всех точках объема пластины, кроме точек разрыва векторов поля на плоскостях пластины. Последнее дает возможность свести указанное объемное интегрирование к поверхностному интегрированию для выражения $H_0 \cdot (\vec{n} \cdot \vec{M}) \cdot \vec{1}_x$ (по нижней и верхней плоскости пластины, единичная нормаль к которым обозначена \vec{n}). Но поскольку нормали к нижней и верхней поверхностям пластины ортогональны вектору \vec{M} , то имеем равенство $(\vec{n} \cdot \vec{M}) = 0$ во всех точках нижней и верхней плоскостях пластины. Как следствие имеем нулевой результат для указанного поверхностного интегрирования. Таким образом, при использовании выражения $-\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \text{div} \vec{M}$ для рассматриваемой пластины имеем нулевую силу на ее магнитное вещество. Это, исходя из равенства действия и противодействия, означает, что сила со стороны магнитного поля намагниченного вещества пластины на ток в ней должна быть принята в данном случае равной нулю. Это же означает, что сила на ток в пластине в данном случае должна определяться произведением плотности тока на *напряженность магнитного поля*.

Изложенное показывает, что результат рассматриваемого мысленного опыта Эйнштейна не позволяет сделать однозначного вывода об описании силы на электрический ток в магнитном веществе тем или иным способом ($\vec{j} \times \vec{B}$ или $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$), который зависит от способа описания силы магнитного поля на магнитное вещество.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Эйнштейн А. О пондеромоторных силах, действующих на ферромагнитные проводники с током, помещенные в магнитное поле: В кн. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. В 4-х т. Т. 3.– М.: Наука, 1966. – С. 240-241.
- [2] Эйнштейн А., Лауб И. О пондеромоторных силах действующих в магнитном поле на покоящиеся тела: В кн. Эйнштейн А.. Собр. науч. тр.: В 3-х т. Т.1.– М.: Наука, 1965. – С. 126-134.
- [3] Тамм И.Е. Основы теории электричества.– М.: Наука, 1989. – 504 с.

Поступила 30.08.2006