

ТЕРМО-ГИРОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

Б.В.Васильев

Институт физико-технических проблем
141980 Дубна, Московской обл., Россия

Поступила в редакцию 24 мая 1994 г.

С помощью чувствительного сквид-магнитометра обнаружен и исследован новый термо-гиромагнитный эффект. Этот эффект заключается в том, что металлический цилиндр, в котором создан радиальный градиент температуры ∇T , при вращении с частотой Ω намагничивается. При этом магнитный поток, связанный с цилиндром, имеет вид $\Phi = A \nabla T \vec{\Omega}$, где $A \sim 2 \cdot 10^{-1} \Phi_0 \cdot \text{с} \cdot \text{см}/\text{град}$. Этот эффект можно считать в определенном смысле аналогом эффекта Нернста-Эттингсхаузена, который описывает возникновение электрического тока в металлическом теле, в котором в перпендикулярных направлениях действуют градиент температуры и магнитное поле.

Известен термо-магнитный эффект Нернста-Эттингсхаузена [1], описывающий возникновение ЭДС в проводящем стержне, к которому в перпендикулярных направлениях приложены градиент температуры ∇T и магнитное поле B . Электрическое поле, развивающееся этим эффектом вдоль стержня, дается формулой

$$E = N[B, \nabla T], \quad (1)$$

где N — константа Нернста. При замыкании стержня в кольцо эффект Нернста — Эттингсхаузена вызовет в нем ток:

$$j = -\sigma N[B, \nabla T], \quad (2)$$

где σ — электропроводность. Легко понять, что в цилиндрическом образце, в котором градиент температуры направлен по радиусу, а магнитное поле по оси, также потечет ток, описываемый равенством (2). Линии тока в этом случае будут представлять концентрические окружности, перпендикулярные оси цилиндра. В результате появится дополнительное магнитное поле, параллельное оси цилиндра.

В данной работе описан аналогичный эффект, который мы будем называть термо-гиромагнитным. Суть его заключается в том, что в цилиндрическом образце с радиальным градиентом температуры электрический ток будет индуцироваться вращением:

$$j = a[\Omega, \nabla T] \quad (3)$$

(Ω — частота вращения), так что создаваемый этим током магнитный поток

$$\Phi = A \nabla T \vec{\Omega}, \quad (4)$$

где A — константа.

В качестве объекта исследования для обнаружения указанного эффекта использовался цилиндр из титана с диаметром ~ 30 мм и длиной 120 мм. Внутри цилиндра по оси было просверлено отверстие диаметром ~ 10 мм. Предварительно перед измерением термо-гиромагнитного эффекта в цилиндре создавался

радиальный градиент температуры. Для этого во внутреннее отверстие цилиндра помещался нагреватель, который создавал нагрев примерно до 120°C . При этом сам цилиндр снаружи охлаждался воздухом комнатной температуры, так что между внутренней и внешней поверхностями цилиндра устанавливалась разница температур $\Delta T \approx 30^{\circ}\text{C}$. Затем нагреватель из образца удалялся и сам образец соединялся с воздушной турбинкой и с ее помощью раскручивался вокруг оси. Эта раскрутка осуществлялась внутри магнитного экрана, позволявшего создать на образце магнитный вакуум $\sim 10^{-5}$ Э. Это было необходимо в связи с тем, что вращающееся в магнитном поле металлическое тело за счет токов Фуко приобретает магнитный момент, пропорциональный проводимости тела [2]. Как следствие, вращающееся проводящее тело может индуцировать собственное поле того же порядка, что и внешнее. Чтобы избежать такого подмагничивания цилиндра земным полем, пришлось создавать специальный магнитный экран и проводить измерения в условиях магнитного вакуума.

В нашем эксперименте магнитный поток, возникавший за счет вращения образца, измерялся с помощью сквид-магнитометра. Для этого внутрь ферромагнитного экрана помещался криостат с жидким гелием, который охлаждал сквид, и еще дополнительный сверхпроводящий магнитный экран, стабилизовавший малое остаточное магнитное поле и экранировавший сквид и образец от внешних помех. Внутри сверхпроводящего экрана в гелиевой ванне помещался антикриостат, то есть сосуд с теплым объемом внутри. В этот теплый объем помещалась воздушная турбинка с исследуемым цилиндром. Выходной сигнал магнитометра калибровался в единицах квантов магнитного потока $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ Гс·см². Калибровка проводилась с помощью катушки с током, которая помещалась на место образца. В опыте образец после выключения нагревателя по возможности быстро переносился в измерительную установку и раскручивался до скорости примерно 150 оборотов в секунду. Затем компрессор, питавший турбинку сжатым воздухом, отключался и образец по инерции продолжал крутиться еще примерно минуту, плавно уменьшая скорость вращения. В это время проводилось измерение магнитного поля, индуцируемого образцом, в зависимости от скорости вращения. Для регистрации скорости вращения была выбрана оптическая схема с прерыванием света, которая сделана так, чтобы избежать создания на образце каких-либо паразитных магнитных полей.

Спустя примерно минуту после первого цикла измерений проводился второй и т.д.

Результаты измерений величины магнитного потока, связанного с образцом, в зависимости от скорости его вращения при различных градиентах температуры, приведены на рис.1. На основании этих данных можно сделать вывод, что образец индуцирует магнитный поток, пропорциональный скорости своего вращения Ω . Зависимость от времени градиента температуры между внутренней и внешней поверхностями цилиндра, использованная для калибровки этих данных, была измерена независимо (без вращения). Эта зависимость показана на рис.2 сплошной линией. Здесь же различными точками показаны зависящие от времени значения наклона термо-гиромангнитного эффекта (в относительных единицах), полученные в разных сериях экспериментов. На основании этих данных можно считать, что величина термо-гиромангнитного эффекта пропорциональна градиенту температуры. Некоторое расхождение можно, по-видимому,

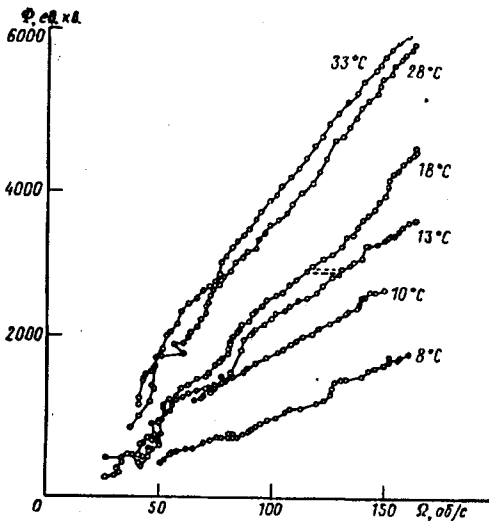


Рис.1

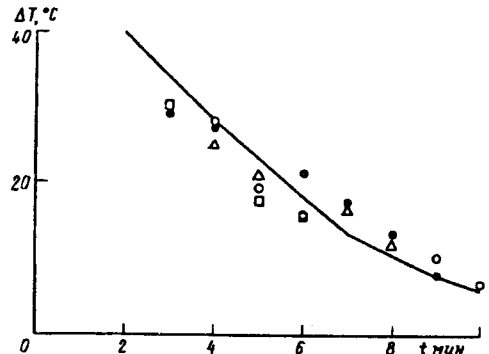


Рис.2

Рис.1. Величина магнитного потока, связанного с образцом, в зависимости от скорости его вращения при различных градиентах температуры

Рис.2. Сплошная кривая — зависимость разницы температур между внутренней и внешней стенками цилиндра от времени в минутах после выключения нагревателя. Различными значками показаны значения наклона термо-гиромангнитного эффекта (в относительных единицах), полученные в соответствующие моменты времени в разных сериях экспериментов

объяснить влиянием на охлаждение образца потока воздуха для вращения турбины.

Таким образом, экспериментально установлено, что вращение индуцирует магнитный поток в проводящем цилиндре, когда в нем создан градиент температуры в полном соответствии с формулами (3), (4). При этом эксперименты дают для константы значение

$$A = (4,77 \pm 1,84) \cdot 10^{-8} \text{ см}^{5/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{град}^{-1} \quad (5)$$

Знак эффекта соответствует вращению ионов.

Генерацию магнитного поля можно объяснить следующим механизмом. В металлическом образце после установления стационарного температурного режима суммарный ток электронов отсутствует. Это результат того, что ток "горячих" электронов, переносящих тепло от горячей части образца к холодной, компенсируется током "холодных" электронов, вызванным термо-эдс. Однако так как проводимость металла можно считать линейно зависящей от температуры, время свободного пробега τ для этих электронов оказывается разным. Эту разницу времени свободного пробега "холодных" и "горячих" электронов можно записать в виде

$$\Delta\tau = \frac{d\tau}{dT} \frac{dT}{dr} \Delta r = \tau \frac{\nabla T}{T} \lambda \quad (6)$$

здесь T и ∇T — температура и ее градиент, $\lambda = \tau V_F$ — длина свободного пробега электрона в металле, V_F — скорость Ферми. В силу этого во

вращающейся системе скорость, приобретенная "горячими" и "холодными" электронами под действием силы Кориолиса, будет отличаться на величину

$$\Delta V = \frac{\lambda^2}{T} [\Omega, \nabla T] \quad (7)$$

И, таким образом, в металлическом образце, в котором существует радиальный градиент температуры, под действием вращения возникнет циркулярный ток с плотностью

$$\mathbf{j} = en_0 \frac{\lambda^2}{T} [\vec{\Omega}, \vec{\nabla} T] \quad (8)$$

Здесь e и n_0 — заряд и плотность электронов в металле. В случае, когда образец представляет собой цилиндр радиуса R , этот ток создаст магнитное поле

$$H(r) = \frac{4\pi}{c} \int_r^R j dr = \frac{4\pi}{c} en_0 \frac{\nabla T}{T} \lambda^2 \Omega (R - r) \quad (9)$$

так что суммарный магнитный поток через цилиндр

$$\Phi = 2\pi \int_0^R H(r) r dr = \frac{4\pi^2}{3c} en_0 \frac{\nabla T}{T} \lambda^2 \Omega R^3 \quad (10)$$

то есть в равенстве (3) константа

$$A = \frac{4\pi^2}{3c} \frac{en_0}{T} \lambda^2 R^3 \quad (11)$$

Для титана $n \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$; полагая $T = 300 \text{ К}$ и длину свободного пробега $\lambda \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ при $R \approx 3 \text{ см}$, имеем

$$A \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{5/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{град}^{-1} \quad (12)$$

В связи с упрощенностью самой модели и приближенностью использовавшихся параметров, особенно длины свободного пробега электронов в титане, можно считать, что это значение не противоречит эксперименту.

Описанный опыт был повторен с цилиндрами из ниобия и алюминия. Ввиду того, что электропроводность этих металлов, особенно алюминия, выше, чем у титана, можно было ожидать, что индуцируемое ими за счет термогиромангнитного эффекта поле будет тоже выше. Измерения действительно качественно это подтверждают. Однако в силу того, что эти металлы имеют пропорционально более высокую теплопроводность, за время после выключения нагрева и до начала измерений, связанное с постановкой образца на турбину (примерно 2-3 мин), они успевают более сильно остыть и поэтому экспериментировать с ними труднее. Качественно эксперименты показывают, что термогиромангнитный эффект в ниобии и алюминии больше, чем в титане, и имеет тот же знак.

Автор благодарен Л.А.Максимову и В.Л.Любошицу за интересные и полезные обсуждения, а также А.П.Гавришу и М.Б.Зорину за помощь в проведении экспериментов.

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, М.: Наука, 1982, §27.
2. Там же, §63.