

Рис. 1

где α – угол между векторами \vec{p} и \vec{E} . Поскольку сумма сил, действующих на заряды диполя со стороны поля, равна нулю, вращательный момент имеет одинаковые значения для любой оси (перпендикулярной \vec{p} и \vec{E}). При этом у диполя есть только одно устойчивое положение равновесия, при котором дипольный момент параллелен напряженности внешнего поля (противоположное, антипараллельное, положение соответствует неустойчивому равновесию).

Работу силы δA при повороте диполя на малый угол $\delta\alpha$ можно выразить через вращательный момент:

$$\delta A = M\delta\alpha.$$

Тогда для работы поля по повороту диполя на угол α из положения равновесия можно записать

$$A_E = -\int_0^\alpha pE \sin \alpha \cdot d\alpha = -pE(1 - \cos \alpha).$$

Эта работа отрицательна, а работа внешних сил при медленном повороте диполя из положения равновесия положительна:

$$A_{\text{вн}} = pE(1 - \cos \alpha).$$

Видно, что потенциальная энергия диполя во внешнем поле равна

$$W_{\text{п}} = -pE \cos \alpha.$$

(Можно было начать с вывода формулы для энергии – подумайте, как это сделать, – и из нее получить выражение для работы.) Минимальная энергия ($-pE$) соответствует устойчивому положению равновесия.

Очень похожими свойствами обладает виток с постоянным током, находя-

щийся в однородном магнитном поле. Для простоты рассмотрим виток прямоугольной формы со сторонами a и b и будем поворачивать его относительно оси OO' , проходящей через середины противоположных сторон и перпендикулярной магнитному полю \vec{B} (рис.2). Момент сил Ампера, действующих на две стороны контура, которые параллельны оси вращения, равен

$$M = 2IBa \frac{b}{2} \sin \alpha = BIS \sin \alpha,$$

где α – угол между нормалью \vec{n} к плоскости витка и полем \vec{B} . Отметим, что нормаль надо проводить вполне определенным образом – по движению буравчика, ручка которого поворачивается в плоскости витка в направлении протекания тока. Если для характеристики свойств витка ввести

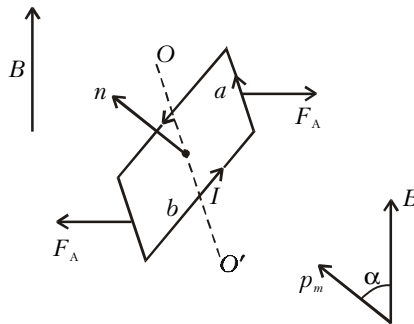


Рис. 2

магнитный момент \vec{p}_m , направленный вдоль указанной нормали и равный

$$p_m = IS,$$

то все свойства витка во внешнем магнитном поле окажутся формально идентичными свойствам электрического диполя во внешнем электрическом поле. Так, у витка есть одно устойчивое положение равновесия, при котором \vec{p}_m параллелен \vec{B} , и работа внешних сил при медленном повороте витка из положения равновесия на угол α равна

$$A_{\text{вн}} = p_m B(1 - \cos \alpha).$$

Более того, если чисто формально ввести потенциальную функцию (имеющую смысл потенциальной энергии) витка во внешнем поле:

$$W_{\text{п}} = -p_m B \cos \alpha,$$

то работа внешних сил будет равна $\Delta W_{\text{п}}$.

Интересно отметить, что формальная аналогия между дипольным и магнитным моментами имеет важное значение для описания диэлектрических и магнитных свойств вещества. Поляризация диэлектрика, состоящего из по-

лярных молекул (т.е. обладающих собственным дипольным моментом), происходит за счет преимущественной ориентации этих дипольных моментов в направлении поля. Степень ориентации определяется соотношением между выигрышем в энергии, равным pE , и характерной энергией теплового движения, которая равна kT (здесь k – постоянная Больцмана, T температура). Совершенно так же происходит намагничивание парамагнетиков, молекулы которых обладают собственным магнитным моментом и стремятся сориентироваться по магнитному полю.

Заметим, что полученные нами выражения годятся и для конденсатора во внешнем поле \vec{E} (в этом случае дипольный момент равен $p = qd$, где q – заряд пластин конденсатора), и для соленоида во внешнем поле \vec{B} (в этом случае $p_m = NIS$).

Поворачивание конденсатора и соленоида

Повернем конденсатор и соленоид на 180° из положения устойчивого равновесия. Рассчитаем работу, которую совершили внешние силы в каждом случае, и сравним ее с соответствующим изменением энергии.

Работа в обоих случаях положительна. Для конденсатора в поле \vec{E} она равна

$$\begin{aligned} A_{\text{вн}} &= 2pE = 2qdE = \\ &= 2\varepsilon_0 E_{\text{к}} SdE = 2\varepsilon_0 E_{\text{к}} E \cdot Sd \end{aligned}$$

($E_{\text{к}}$ – поле конденсатора), а для соленоида в поле \vec{B} –

$$\begin{aligned} A_{\text{вн}} &= 2p_m B = 2NISB = \\ &= 2 \frac{B_{\text{с}}}{\mu_0} SIB = 2 \frac{B_{\text{с}} B}{\mu_0} \cdot SI \end{aligned}$$

($B_{\text{с}}$ – поле соленоида).

Однако с изменением энергии все не так просто. Самое важное различие между конденсатором и соленоидом состоит в том, что в положении устойчивого равновесия поле конденсатора $\vec{E}_{\text{к}}$ направлено против внешнего поля \vec{E} , а поле соленоида $\vec{B}_{\text{с}}$ направлено вдоль внешнего поля \vec{B} (рис.3). При

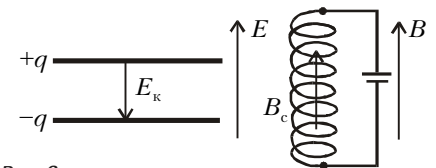


Рис. 3