

# Давление поля

А. ЧЕРНОУЦАН

УВИДЕВ НАЗВАНИЕ СТАТЬИ, ЧИТАТЕЛЬ, возможно, подумает, что речь пойдет о давлении света (электромагнитного поля). Это явление обсуждается в школьном курсе. Его объяснение становится особенно понятным, если рассматривать свет как поток фотонов, каждый из которых обладает определенным импульсом. При отражении от тела или поглощении им фотонов происходит изменение их импульса, а это означает, что на тело действует сила давления. При таком подходе давление света становится весьма похожим на давление идеального газа, молекулярно-кинетическое объяснение которого также связано с ударами молекул о поверхность. Если же поставить себе цель объяснить давление света, не выходя за рамки электромагнитной теории, то происхождение силы надо связать с воздействием магнитного поля волны на упорядоченно движущиеся заряды вещества, что вызывается другим компонентом волны — ее электрическим полем.

Однако не имеет смысла дальше углубляться в обсуждение давления электромагнитных волн, потому что эта статья посвящена совсем другому явлению — давлению *статического* поля, как электрического, так и магнитного. Понятно, что в этом случае не может быть речи об изменении импульса, поэтому сам термин «давление» можно считать условным. Тем не менее в научно-популярных статьях и книгах вы можете встретиться с таким понятием. Читая, например, о создании сверхсильного магнитного поля, можно узнать, что одну из основных проблем представляет давление этого поля на стенки соленоида. Это тесно связано с возможностью создания управляемого термоядерного синтеза, где встает задача удержания раскаленной плазмы сильным магнитным полем («магнитной ловушкой»). Но начнем мы не с магнитного поля, а с более понятного школьнику — поля электростатического.

## Давление электрического поля

Разберемся с механизмом возникновения давления электростатического поля на заряженную поверхность, которое возникает в том случае, если напряженности полей по разные стороны этой поверхности различны. Начнем, как всегда, с самого простого случая — заряженного плоского конденсатора. Напряженность поля внутри конденсатора равна

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

где  $\sigma = q/S$  — поверхностная плотность заряда. При вычислении силы, действующей на единицу площади одной из пластин, надо учитывать только поле другой пластины, равное  $E/2$  (сама на себя пластина не действует):

$$p = \frac{F}{S} = \frac{E}{2} \sigma = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}.$$

Обсудим полученный результат.

Во-первых, давление выражается через напряженность поля, существующего с одной стороны от пластины (поле вне конденсатора пренебрежимо мало). Во-вторых, сила, действующая на пластину, направлена внутрь конденсатора — пластины притягиваются. Это значит, что если мы хотим приписать электрическому полю давление, то мы должны считать это давление *отрицательным* (поле не «давит», а «тянет»!). И наконец, в-третьих, давление поля совпадает по величине с объемной плотностью электрического поля. В итоге можно написать

$$p = -w = -\frac{W}{V} = -\frac{\epsilon_0 E^2}{2}. \quad (1)$$

Перечисленные свойства становятся вполне естественными, если посмотреть на них с точки зрения закона сохранения энергии. Рассмотрим изолированный (отключенный от источника) плоский конденсатор. Прикладывая внешнюю силу, медленно увеличим расстояние между пластинами на  $\Delta x$ . Поскольку напряженность поля между пластинами не из-

менится (она зависит только от  $\sigma$ ), энергия поля увеличится на  $wS\Delta x$ . Следовательно, внешняя сила должна совершить положительную работу  $F\Delta x$ , а сила давления поля — отрицательную работу  $-pS\Delta x$ . Таким образом, давление поля должно быть отрицательным и равным объемной плотности энергии.

Формула (1) действует и в случае заряженной поверхности любой формы, если напряженность поля по одну сторону от нее равна нулю. Важный пример: на участок поверхности проводника площадью  $\Delta S$ , возле которого напряженность поля равна  $E$ , действует наружу сила, равная  $\Delta F = (\epsilon_0 E^2/2)\Delta S$ . Не останавливаясь на обосновании этого утверждения, обсудим сразу общую формулировку: если по одну сторону от заряженной поверхности напряженность поля равна  $E_1$ , а по другую  $E_2$ , то в направлении от первой области ко второй действует сила, обусловленная давлением

$$p = \frac{\epsilon_0 E_2^2}{2} - \frac{\epsilon_0 E_1^2}{2}. \quad (2)$$

Эту формулу можно обосновать тремя способами. Самый простой и естественный — энергетический. Надо мысленно сместить поверхность на  $\Delta x$  и приравнять работу внешней силы к изменению энергии поля. (Работа силы давления со стороны поля равна работе внешней силы, взятой с противоположным знаком.)

Можно, как и в случае плоского конденсатора, отделить собственное поле от внешнего (рис.1). Будем считать, что оба поля перпендикулярны

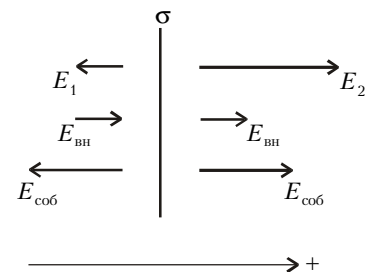


Рис. 1

к заряженной поверхности; действительно, касательная составляющая поля (если она есть) имеет одно и то же значение по обе стороны поверхности (это утверждение следует из потенциальности поля — подумайте сами, каким образом) и сокращается в формуле для давления. Для собственного поля  $E_{\text{соб}}$  и внешнего поля