ДИНАМИКА ВАКУУМА И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА В РАЗМЕРНОСТЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

ВЕРИН О. Г.

Размерности величин естественным образом связаны с физикой описываемых процессов. Поэтому правильность теоретического анализа на практике не в последнюю очередь проверяют тем, насколько размерности величин в полученных соотношениях удовлетворяют физической логике взаимосвязей в контексте рассматриваемой проблемы.

После ознакомления с моими книгами, посвященными солитонной теории элементарных частиц [1,2], некоторые читатели адресовали мне ряд вопросов, касающихся размерностей величин, используемых при описании динамики вакуума.

Сам по себе анализ размерностей не представляет большого труда, и посвящать этому отдельную статью не имело бы никакого смысла. Однако в данном случае, фактически, речь идет о том, каким образом электродинамика может быть представлена в терминах и величинах обычной механики, так как использованная мной при анализе динамики вакуума модель Максвелла [3] является, как известно, чисто механической. Именно поэтому такой анализ воспринимается не просто как интересное или даже занимательное упражнение, но и как познавательное, а во многих отношениях - поучительное описание электродинамики с необычной точки зрения.

Рекомендованная к применению Международная система единиц (СИ), в сравнении с другими системами единиц, наилучшим образом соответствует физическому содержанию динамики вакуума и, таким образом, наиболее удобна для ее описания. Далее мы поясним это утверждение на конкретных примерах, но сначала несколько слов о самой модели вакуума, разработанной Максвеллом. Попутно заметим, что мы намеренно не используем термин «эфир», так как во многих работах эту «субстанцию» рассматривают, как некоторую «тонкую материю», пронизывающую весь материальный мир. В нашем же представлении, ни о каком «пронизывании» не может идти речи. Само вещество и излучение – это возбужденные состояния вакуума. Образно говоря, все состоит из вакуума, а точнее – из энергетических структур, возникающих в вакууме как в своеобразной первичной среде.

При анализе модели Максвелла удобно полагать размер «молекулярного вихря» (или, для краткости, просто вихря) единичным. В этом случае все пространство оказывается заполненным вихрями, каждый из которых занимает единичный объем, определяя, таким образом, «удельные» динамические свойства вакуума. Кроме того, удобно считать всю массу вихря сосредоточенной на его поверхности. При этом подвергается деформации и может двигаться только эта оболочка вихря, обладающая массой и упругими свойствами. Внутренний объем вихрей не движется и не деформируется, в результате чего находящиеся вплотную друг к другу вихри образуют «жесткий каркас вакуума» (Рис. 1). Вторая компонента модели – малые частицы, находящиеся между вихрями, играют роль связующего звена (передают без проскальзывания динамические усилия), а их размеры полагаются пренебрежимо малыми. Считается, что в совокупности малые частицы ведут себя как несжимаемая жидкость (за исключением областей с отличной от нуля дивергенцией электрического поля [2]).

Так как движется только «эластичная» оболочка вихрей, то независимо от изначально выбранной формы вихрей (на рис. 1 – окружности, а в книге Максвелла они изображены в виде шестиугольников), движение поверхности вихрей фактически можно описывать как линейное. Сам Максвелл подробно проанализировал модель и движения вихрей в трех измерениях, результатом чего стали уравнения электромагнитного поля. Но не следует забывать, что модель является только инструментом анализа, и ее нельзя буквально отождествлять с реальным вакуумом. Поэтому Максвелл в каждом конкретном случае вносил изменения в модель, позволявшие наиболее эффективным образом использовать этот инструмент для решения конкретных задач. Более того, справедливо следующее утверждение (в частности, оно следует из метода Бромвича решения уравнений Максвелла): при описании электромагнитного поля в любой точке пространства оси координат можно расположить таким образом, что вихри в модели можно представить в виде цилиндров, оси которых параллельны направлению магнитного поля. В таком случае скорость движения поверхности вихря $\boldsymbol{H}$ всюду одинакова, а плотность энергии магнитного поля выражается простейшим образом через массу вихря $\boldsymbol{\mu}$ и скорость движения его поверхности: $\boldsymbol{\mu H^2/2}$.

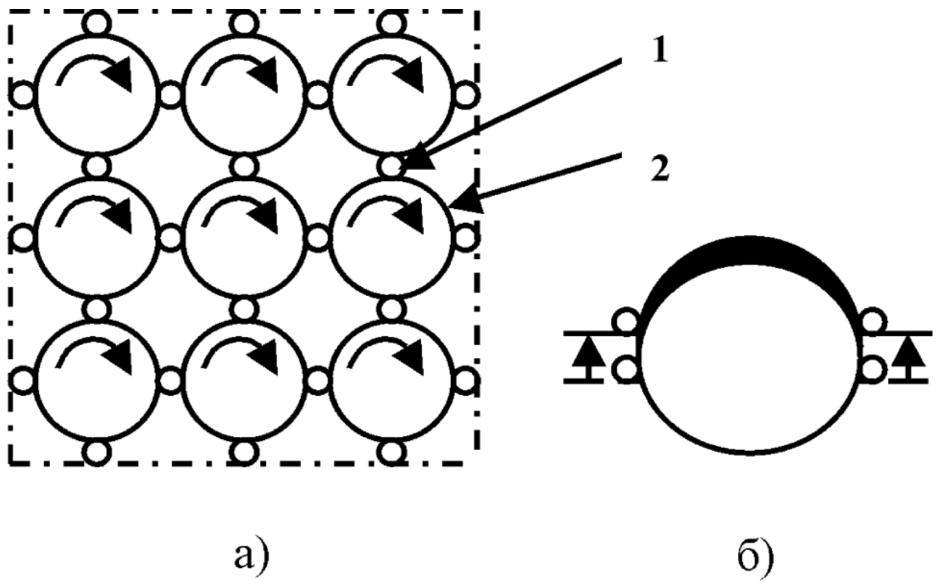

Рис. 1.
Двухкомпонентная модель вакуума.

а) – динамическая модель вакуума (стрелками показано направление вращения вихрей),
б) – тангенциальная деформация вихря (деформация условно показана утолщением линии в верхней части вихря, испытывающей деформацию сжатия).

1 – промежуточные частицы,
2 – вихри Максвелла.

В качестве первого примера рассмотрим поле неподвижного заряда $\boldsymbol{q}$:

$$D_э = q/4\pi r^2, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{r}$ – расстояние от заряда.

Несжимаемость «жидкости частиц» проявляется в том, что объем смещения (назовем его так) одинаков на поверхности сферы любого радиуса, окружающей заряд, и равен величине заряда $(D_э \cdot 4\pi r^2)$. Жидкость частиц как бы продавливается сквозь зазоры между вихрями, вызывая тангенциальную деформацию поверхностей вихрей, как это показано на рис. 1,б. Так как деформация вихря (электрическое смещение) «автоматически» оказывается отнесенной к единичному размеру области, которую он занимает, то она может рассматриваться как относительная, безразмерная величина. Поэтому, исходя из (1), размерность заряда [q] = $м^2$.

Описываемая моделью величина заряда равна площади сферы, на которой этот заряд создает условную единичную относительную деформацию (электрическое смещение). Чем больше заряд, тем больше площадь сферы, на которой он сможет создать такую деформацию.

Напряженность электрического поля соответственно определяется как тангенциальная сила, действующая на поверхность вихря $E = D/\varepsilon$, и поэтому ее размерность – Ньютон на метр квадратный [E] = $Н/м^2 = кг/(м \cdot с^2)$, а размерность диэлектрической проницаемости вакуума [ε] = $м^2/Н = (м \cdot с^2)/кг$.

Так как масса вихря также оказывается отнесенной к единичному объему, то размерность магнитной проницаемости вакуума [μ] = $кг/м^3$.

Исходя из полученных размерностей диэлектрической и магнитной проницаемостей вакуума (характеризующих упругость и плотность среды в модели вакуума), размерность скорости света ($c^2 = 1/\varepsilon\mu$), как и следовало ожидать, равна [c] = $м/с$.

Из формулы, связывающей между собой напряженность магнитного поля и электрическое смещение $H = c \cdot D$, также получаем ожидаемый результат для размерности напряженности магнитного поля [H] = $м/с$. Следовательно, аналогом размерности магнитной проницаемости μН является импульс в единице объема [B] = $кг/(м^2 \cdot с)$.

В качестве другого примера рассмотрим, каким образом из уравнения движения вихря получается уравнение Максвелла

$$\partial B/\partial t = - rotE. \qquad (2)$$

Это уравнение с точки зрения модели является просто выражением второго закона Ньютона, описывающим движение вихря. Действительно, так как аналогом магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ в модели служит импульс вращающейся оболочки вихря μH, то его изменение во времени с учетом того, что вихрь занимает единичный объем, естественным образом оказывается равным ротору действующих на него сил.

На следующем примере покажем, каким образом в модели трактуется векторный потенциал магнитного поля, физический смысл которого в электродинамике не столь очевиден.

Рассмотрим соленоид (рис. 2), по внутренней цилиндрической поверхности которого течет кольцевой ток с поверхностной плотностью ***j***, создающий внутри соленоида однородное магнитное поле (краевыми эффектами пренебрегаем).

Векторный потенциал магнитного поля вводится таким образом, что индукция магнитного поля выражается через ротор потенциала

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{rot\ A}. \tag{3}$$

Если воспользоваться определением ротора и учесть однородность поля по сечению соленоида, то выражение (3) сводится к равенству:

$$B = (2\pi rA)/(\pi r^2), \ (\pi r^2)B = 2\pi rA. \tag{4}$$

В левой стороне равенства – импульс единичного вихря, умноженный на площадь сечения с радиусом r, а в правой – векторный потенциал, умноженный на длину окружности, охватывающей это сечение. Таким образом, в модели Максвелла векторный потенциал магнитного поля характеризует суммарный импульс вращательного движения вихрей – магнитного поля, пронизывающего некоторую поверхность, отнесенный к длине контура, охватывающего эту поверхность.

Если же положить радиус равным радиусу соленоида R, а левую и правую части равенства (4) умножить на длину соленоида L, то это определение будет еще более наглядным. Аналог векторного потенциала окажется равным общему импульсу в объеме соленоида, поделенному на площадь его боковой поверхности.

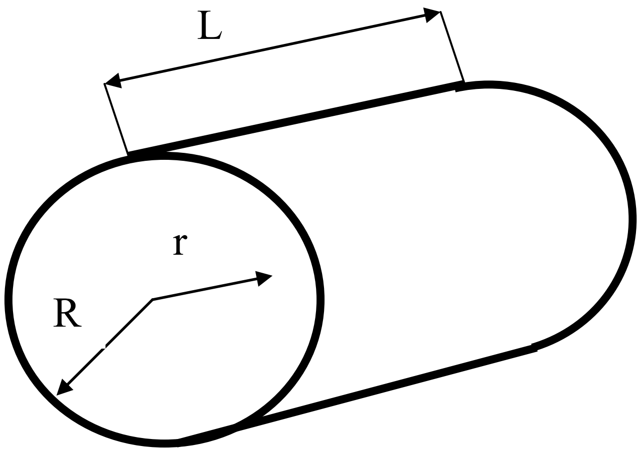

Рис. 2

Следовательно, размерность векторного потенциала в модели вакуума [A] = ***кг/(м · с)***.

Так как по абсолютной величине напряженность магнитного поля H равна плотности кольцевого тока соленоида ***j***, то, умножая левую часть равенства (4) на H и L, а правую – на ***j*** и L, после деления обеих частей на 2 получим выражение энергии магнитного поля через произведение величин векторного потенциала A и электрического тока I:

$$W_m = 2\pi R \cdot IA/2. \qquad (5)$$

Предположим теперь, что электроны проводимости, создающие кольцевой ток I в соленоиде, имеют общий заряд, равный q, и движутся со скоростью, равной v. Тогда величину кольцевого тока можно записать в виде:

$$I = q\, v/(2\pi R). \qquad (6)$$

С учетом этого из (5) получаем

$$W_m = qA\, v/2, \;\; qA = 2W_m/v. \qquad (7)$$

Таким образом, полученное выражение для qA – это и есть дополнительная составляющая импульса заряженных частиц, связанная с магнитным полем, и выражающаяся через произведение заряда на векторный потенциал. Учитывая полученные выше размерности величин q и A (для модели вакуума), их произведение, действительно, имеет размерность импульса [qA] = ***кг м/ с***.

Является ли на самом деле электрическое поле следствием накопления некоторой потенциальной энергии «деформации элементов вакуума», а магнитное поле – соответственно результатом «внутреннего движения» в вакууме? Однозначно ответить на этот вопрос, естественно, не возможно, так как любая модель – это всего лишь инструмент, который, как правило, оказывается очень далеким от реальности.

Тем не менее, электрическое поле, действительно, напоминает эффекты, связанные с упругой деформацией, а магнитное поле – с движением. Помимо уже приведенных примеров об этом же говорит «стремление» электрической энергии к уменьшению, а магнитной энергии – к увеличению. Это полностью соответствует направлениям сил в динамических системах «стремящихся» уменьшить потенциальную энергию и увеличить кинетическую энергию системы.

Действительно, еще Максвелл вывел закон Кулона, используя модель вакуума, через энергию деформации среды. Еще более простой и наглядный пример – силы, действующие на обкладки заряженного конденсатора. И по направлению, и по величине они соответствуют принципу уменьшения потенциальной энергии деформации среды, находящейся между пластинами, под действием этих сил.

$$\boldsymbol{F = -\,\partial W_e/\partial l,} \qquad (8)$$

где $\boldsymbol{l}$ – расстояние между обкладками конденсатора.

Так как производная от энергии конденсатора в выражении (8) численно равна произведению плотности энергии $\boldsymbol{w_e}$ электрического поля между обкладками конденсатора на площадь $\boldsymbol{S}$ пластин конденсатора, то сила, приходящаяся на единицу площади пластины (давление) равна

$$\boldsymbol{F/S = -\,w_e = -\,D^2/2\varepsilon.} \qquad (9)$$

Легко видеть, что размерности давления на поверхность и плотности энергии действительно совпадают: $\boldsymbol{Н/м^2 = Н\cdot м/м^3 = Дж/м^3}$.

Выражение (9) может быть интерпретировано и несколько иначе - через воздействие электрического поля на заряд. Так как на обкладках заряженного конденсатора поверхностная плотность электрического заряда численно равна электрическому смещению ($\sigma = D$), то сила, приходящаяся на единицу поверхности, равна заряду σ, находящемуся на этой поверхности, умноженному на величину напряженности электрического поля $\boldsymbol{D/2\varepsilon}$, создаваемой другой, противоположно заряженной обкладкой конденсатора

$$\boldsymbol{F/S = -\,\sigma\cdot D/2\varepsilon = -\,D^2/2\varepsilon.} \qquad (10)$$

Совершенно аналогичным образом можно проиллюстрировать силы, действующие на стенки соленоида с кольцевыми токами (рис. 2). В полном соответствии с упомянутым принципом для механических систем, сила, действующая на единицу поверхности соленоида, направлена наружу (стремится увеличить объем, занятый магнитным полем), а численно равна плотности энергии магнитного поля.

$$\boldsymbol{F/S = w_m = \mu H^2/2.} \qquad (11)$$

Эту силу, также как и в рассмотренном примере с конденсатором, можно интерпретировать воздействием магнитного поля на движущийся заряд. Действительно, если исходить из выражений (4) и (7), то

$$W_m = qA\,v/2,\ A = BR/2,\ \boldsymbol{F = \partial W_m/\partial} R = q\,v\,B/2. \qquad (12)$$

Сила, действующая на поверхность соленоида, таким образом, полностью соответствует известной формуле для силы Лоренца, так как величина магнитного поля, действующая непосредственно на заряды, образующие кольцевые токи в соленоиде, равна B/2. С учетом полученных ранее размерностей (для модели вакуума) размерность силы в (12), как легко видеть, выражается в ньютонах (***Н***).

В заключение следует, пожалуй, обратить внимание на то, что среди основных единиц СИ фигурирует единица электрического тока **А** (Ампер). Поэтому в целом, для того чтобы получить размерность той или иной величины в динамике вакуума (в модели Максвелла), необходимо в размерности этой величины в системе СИ (приведенной в любом справочнике по физике [4]) поменять **А** на ***м²/с***.

Например, размерность диэлектрической проницаемости вакуума в системе СИ $[\boldsymbol{\varepsilon}] = L^{-3}M^{-1}T^{4}I^{2}$ или Ф/м. После подстановки в размерность вместо I^2 размерности $L^4\ T^{-2}$ получим для размерности диэлектрической проницаемости в модели вакуума $[\boldsymbol{\varepsilon}] = LM^{-1}T^{2}$ или, как и было нами установлено ранее, ***(м·с²)/кг***.

Совершенно аналогично, размерность магнитной проницаемости вакуума в системе СИ $[\boldsymbol{\mu}] = LMT^{-2}I^{-2}$ или Гн/м. После подстановки вместо I^{-2} размерности $L^{-4}\ T^{2}$ получим для размерности магнитной проницаемости вакуума $[\boldsymbol{\mu}] = L^{-3}M$ или, как и было установлено для модели, **кг/*м³***.

Литература

1. Верин О.Г. Динамика вакуума и солитонная теория элементарных частиц. -М.: РТ-Пресс. 2002.

2. Верин О.Г. Природа элементарных частиц, квантовая теория и Великое Объединение. -М.: Контур-М. 2005.

3. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. Перевод под редакцией П. С. Кудрявцева. - М.: Государственное изд. технико-теоретической литературы, 1952.

4. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Главная редакция физ.-мат. литературы. - М.: Наука, 1985.