

остаться ни с чем: ибо они или не замечают лучшего и необходимейшего, или не умеют воспользоваться тем, что видят, или постигают при помощи остальных чувств».

На огромное значение гипотезы для задачи «вскрывать законы развития» явлений указывал и Д. И. Менделеев: «Таково свойство гипотез. Они науке и особенно ее изучению необходимы. Они дают стройность и простоту, каких без их допущения достичь трудно. Вся история наук это показывает. А потому можно смело сказать: лучше держаться такой гипотезы, которая может сказаться со временем неверною, чем никакой. Гипотезы облегчают и делают правильною научную работу — отыскания истины, как плуг земледельца облегчает выращивание полезных растений». (Основы химии, т. 1, стр. 151, 1947). (Ред.)

О ФИЗИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ЛИНИЯХ

1. (Стр. 107.) Работа Максвелла «О физических силовых линиях» — вторая по времени и первая опубликованная работа по теории поля. Она печаталась по частям в журнале *Philosophical Magazine* за 1861—1862 гг. В ней Максвелл, пользуясь моделью некоего вихревого механизма, впервые приходит к своим знаменитым уравнениям и вводит фундаментальное понятие тока смещения. Перевод выполнен с английского текста (*The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, т. 1, 1890, стр. 451—513); приведены также примечания Больцмана к немецкому переводу трактата. (Ред.)

2. (Стр. 108.) Имеется в виду пробный магнитный полюс. (Ред.)

3. (Стр. 108.) Максвелл совершенно определенно становится на позиции Фарадея, связанные с признанием реальности физического состояния среды, представляемого силовыми линиями. Концепция близкодействия сложилась теперь окончательно и задача работы — отразить структуру поля в моделях и уравнениях. (Ред.)

4. (Стр. 109.) Как передовой ученый, Максвелл высоко ценит творческую силу научных гипотез для развития науки. Как известно, Энгельс назвал гипотезу «формой развития естествознания, поскольку оно мыслит». Идеалисты считали гипотезу только неким удобным «принципом описания». Передовые ученые материалисты активно боролись против голого эмпиризма и голого формализма. «Один опыт, — писал Ломоносов (Соч., т. 1, стр. 125), — я ставлю выше, чем тысячу мнений, рожденных только воображением. Но считаю необходимым сообразовать опыт с нуждами физики. Те, кто, собираясь извлечь из опыта истины, не берут с собою ничего, кроме собственных чувств, по большей части должны

5. (Стр. 113.) Это известное «правило буравчика» Максвелла. (Ред.)

6. (Стр. 114.) Задача Максвелла — свести дальнего действия к натяжениям и давлениям в поле (тензор максвелловских натяжений). Среда, переносящая взаимодействия зарядов, магнитов и токов, с этой точки зрения должна быть аналогичной упругому телу. С целью интерпретации упругих свойств среды Максвелл конструирует воображаемый вихревой механизм, из свойств которого он и выводит в дальнейшем натяжения и давления электромагнитных сил. (Ред.)

7. (Стр. 116.) Это — выражения тензора максвелловских натяжений:

$$T_{xx} = \frac{\mu}{4\pi} H_z^2 - \frac{\mu}{8\pi} H^2, \quad T_{yy} = \frac{\mu}{4\pi} H_x^2 - \frac{\mu}{8\pi} H^2, \quad T_{zz} = \frac{\mu}{4\pi} H_y^2 - \frac{\mu}{8\pi} H^2,$$

$$T_{yz} = T_{zy} = \frac{\mu}{4\pi} H_y H_z, \quad T_{zx} = T_{xz} = \frac{\mu}{4\pi} H_z H_x, \quad T_{xy} = T_{yx} = \frac{\mu}{4\pi} H_x H_y.$$

При этом скорость вихря (α, β, γ) представляет напряженность H магнитного поля (и соответственно электрического), коэффициент μ — магнитную проницаемость (и соответственно диэлектрическую постоянную). Давление p интерпретируется как электромагнитное давление $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ (и соответственно $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$).

См. примечание 8. (Ред.)

8. (Стр. 117.) Если выделить в упругой среде объем V посредством замкнутой поверхности S , то этот объем будет находиться под действием внутренних объемных сил, распределенных с объемной плотностью f , и сил $f^{(s)}$, действующих со

стороны внешней части среды на поверхность. Условие равновесия

$$\int_V f dV + \int_S f^{(s)} dS = 0,$$

Упругие напряжения, действующие на элемент dS , будут функциями точки и ориентации площадки, определяемой вектором единичной нормали n :

$$f_x^{(s)} = T_{xx}n_x + T_{xy}n_y + T_{xz}n_z,$$

$$f_y^{(s)} = T_{yx}n_x + T_{yy}n_y + T_{yz}n_z,$$

$$f_z^{(s)} = T_{zx}n_x + T_{zy}n_y + T_{zz}n_z$$

или

$$f_i^{(s)} = T_{ik}n_k \quad (i, k = 1, 2, 3),$$

где T_{ik} — тензор напряжений второго ранга. Таким образом, условие равновесия для компоненты будет:

$$\int_V f_i dv + \oint T_{ik}n_k dS = 0,$$

$T_{ik}n_k$ — вектор с компонентами $T_{ik}n_k$, $T_{zk}n_k$, $T_{hk}n_k$. Отсюда

$$f_i + \frac{\partial}{\partial x_k} T_{ik} = 0.$$

Это и будет условие Максвелла (3). Преобразование в тексте приводит к выражению силы:

$$f_x = \rho H_x + \frac{\mu}{8\pi} \text{grad}_x H^2 + [jB]_x - \text{grad}_x p.$$

Если предположить, что в гидростатическое давление входит и электромагнитное давление $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ (или $\frac{\epsilon H^2}{8\pi}$), то члены

$\frac{\mu}{8\pi} \text{grad}_x H^2 - \text{grad}_x \frac{\mu H^2}{8\pi}$ дадут в сумме член $-\frac{1}{8\pi} H^2 \text{grad} \mu$ (или соответственно $-\frac{1}{8\pi} E^2 \text{grad} \epsilon$). Максвелл считал, что

давление возможно и в чистом эфире (см. примечание 14 Больцмана). В таком случае это выражение силы отличается от современного выражения отсутствием стрикционного члена $\frac{1}{8\pi} \text{grad} \left(H^2 \frac{\partial \mu}{\partial \epsilon} \tau \right)$. Однако это не влияет на правильность

окончательного результата, ибо стрикционное давление компенсируется вызванными электрострикцией дополнительными силами (см. И. Е. Тамм, Основы теории электричества, стр. 168—169, 1946). (Ред.)

9. (Стр. 131.) Вопрос о природе электрического тока в фарадеево-максвелловской концепции имел первостепенное значение. Как видно из всего хода максвелловского изложения, основной характеристикой тока является магнитное поле. То же самое имел в виду Фарадей, рассматривая ток как «ось сил». Эта точка зрения и приводит Максвелла в дальнейшем к обобщению понятия тока (введение тока смещения). (Ред.)

10. (Стр. 132.) Этой моделью Максвелл обосновывает в дальнейшем свои уравнения. Сами «промежуточные частицы» должны интерпретировать механизм прохождения тока и превращения его энергии в тепло. В этом смысле их можно рассматривать до некоторой степени как прообраз будущих электронов. (Ред.)

11. (Стр. 139.) Эта сила — напряженность индуцированного электрического поля. Максвелл подходит в формулировке закона индукции в обобщенной форме к обоснованию своего второго уравнения. (Ред.)

12. (Стр. 141.) Это и есть второе уравнение Максвелла:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (\text{Ред.})$$

13. (Стр. 142.) Введением вектора-потенциала $A(F, G, H)$ Максвелл сближает новые идеи с разработанными уже методами и хочет сделать более ясной фарадеевскую концепцию электротонического состояния. Поэтому он в дальнейших работах дает второе уравнение не в форме (54), а в форме (55) и (58). В форме (54) второе уравнение было восстановлено позднее Хевисайдом и Герцем и было внесено в 3-е издание «Трактата» Томсоном. (Ред.)

14. (Стр. 150.) В современной форме уравнения (77) имеют вид

$$\mathbf{E} = [v\mathbf{B}] + \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \phi.$$

Первый член описывает индукцию в движущихся телах в духе электродинамики Герца (см. примечания 38, 39, 41 Больцмана). Скалярный потенциал ϕ Максвелл ниже называет электрическим напряжением. (Ред.)

15. (Стр. 156.) Это примечание Максвелла—лишнее доказательство глубокой эвристической ценности даже грубых моделей и гипотез. Гиромагнитные эффекты, как известно, были обнаружены в опытах Эйнштейна и де Гааза и опытах Барнета. (Ред.)

16. (Стр. 159.) Эпоха Максвелла была богата различными теориями электромагнетизма (Вебера, К. Неймана, Ганнеля и др.), которые, несмотря на различие исходных предположений, в ряде случаев приводили к одинаковым результатам. Максвелл выдвигает гносеологический вопрос о критерии надежности той или иной теории. Марксистская теория познания учит, что критерием истины является практика, а практика решила вопрос в пользу истинности максвелловской теории. (Ред.)

17. (Стр. 159.) Мысль Максвелла о важной эвристической ценности гидро-электродинамической аналогии подтвердилась дальнейшим развитием этих наук. Предпринимались попытки и более тесного объединения электродинамики и гидродинамики, которые, однако, не привели к положительным результатам (Бьеркнес, Н. П. Кастерин). (Ред.)

18. (Стр. 162.) Максвеллова иллюстрация тока проводимости и тока смещения пористой и упругой мембраной развита в курсе акад. В. Ф. Миткевича «Физические основы электротехники». (Ред.)

19. (Стр. 163.) Здесь Максвелл впервые вводит центральную идею своей теории—идею тока смещения. (Ред.)

20. (Стр. 164.) Идея тока смещения приводит при ее обработке Максвеллом к электромагнитной теории света. Вывод Максвелла о возможной тождественности светового эфира со средой, передающей электромагнитные взаимодействия, поразительно напоминает высказывания Ломоносова по этому поводу. (Ред.)

21. (Стр. 170.) Уравнения (112) представляют собой первое уравнение Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Диэлектрическая проницаемость ε связана с максвелловской константой E соотношением $\varepsilon = \frac{1}{4\pi E^2}$. (Ред.)

22. (Стр. 170.) В современных обозначениях можно сказать, что уравнение (115) $\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho$ выведено как следствие обобщенного первого уравнения теории Максвелла (уравнение (112)) и уравнения сохранения электрического заряда (уравнение (113)):

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \text{ (Ред.)}$$

23. (Стр. 173.) Таким образом, в основе определения электромагнитной единицы силы тока Максвеллом лежит теорема Ампера об эквивалентности замкнутых токов и магнитов, причем магнитный момент кругового тока силой I электромагнитных единиц, обтекающего площадь S , равен:

$$M = IS. \text{ (Ред.)}$$

24. (Стр. 175.) Этот вывод Максвелла стал краеугольным камнем электромагнитной теории света, и на фундаментальное значение его указал Энгельс (см. примечание 1 к «Динамической теории поля»). Исходя из результатов опыта Вебера и Кольрауша 1856 г., Максвелл еще в 1861 г. в письме от 19 октября писал Фарадею:

«Я предполагаю, что упругость сферы воздействует на электрическую среду, ее окружающую, и оказывает на нее давление. Из определенного Кольраушем и Вебером численного отношения между статическим и магнитным действием электричества я определил упругость среды в воздухе и, считая, что она тождественна с упругостью светового эфира, определил скорость распространения поперечных колебаний. Результат—193088 миль в секунду. Физо определял скорость света в 193418 миль в секунду прямым опытом».

Следует отметить, что на самом деле совпадение не было таким хорошим, как приводит здесь Максвелл: результаты Вебера и Кольрауша, равно как и результат Физо, были далеко не точны. Вместе с тем и теоретическое отождествление поперечных электромагнитных волн со старыми световыми волнами в упругой среде, от которого уже отходил Фарадей, было далеко не таким очевидным, как это показывает Больцман в своем примечании 58. Фундаментальное соотношение

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

к которому сводится уравнение (135), как справедливо отмечает Больцман, может быть получено и без привлечения далеко не безупречных механических соображений, непосредственно из уравнений теории.

Но если механические аналогии и модель Максвелла были и не безупречными, важность полученного им результата была сразу оценена современниками. Точные измерения электрических и магнитных констант с целью проверки соотношения $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, с одной стороны, и отношения единиц—с другой, стали программой работ ряда выдающихся физиков и до опытов Герца и Лебедева служили обоснованием электромагнитной теории света. О фундаментальном вкладе русской физики в обоснование и развитие этой теории смотри примечания к «Динамической теории поля» и «Трактату». (Ред.)

25. (Стр. 178.) Явление магнитного вращения плоскости поляризации, открытое Фарадеем в 1845 г., было первым экспериментальным указанием на наличие связи между оптическими и магнитными явлениями, и понятно, что Максвелл придавал теоретическому истолкованию этого явления особо важное значение в обосновании электромагнитной теории света. Как видно из последующего изложения этой части труда Максвелла, он связывал вращение плоскости поляризации с вращением вокруг силовых линий, предположенных им в его вихревой теории. Но вращения плоскости поляризации в эфире не наблюдается, и теоретическое объяснение вращения плоскости поляризации удалось только электронной теории на основе связи явления Фарадея с явлением Зеемана. (Ред.)

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

1. (Стр. 251.) «Динамическая теория поля» является первым трудом Максвелла, в котором полностью изложены основы его теории. С этого по выражению Джинса «наиболее важного и имеющего наибольшее влияние мемуара из всех написанных им (Максвеллом) вообще» датирует электромагнитная теория света. Выводы Максвелла дали возможность Энгельсу, с большим сочувствием следившему за появлением новых «эфирных» теорий электричества, отметить «один бесспорный успех» теории Максвелла: «Клерк Максвелла... вычислил, что удельная диэлектрическая постоянная какого-нибудь тела равна квадрату его показателя преломления света» («Диалектика природы», стр. 90, 1946). Энгельс отмечает и подтверждение этого вывода экспериментами Больцмана 1872—1874 гг.

Можно указать на следующие факты, относящиеся к пред- истории электромагнитной теории света. Еще Ломоносов был убежден в существовании связи между светом и электричеством. Он предлагал осуществить опыт для определения влияния электризации тела на его показатель преломления. Разбирая вопрос о природе электрических явлений, Ломоносов писал: «Так как эти явления имеют место в пространстве, лишенном воздуха, а свет и огонь происходят в пустоте и зависят от эфира, то кажется правдоподобным, что эта электрическая материя тождественна с эфиром» (курсив мой.— П. К.). Ломоносов безоговорочно принимал волновую эфирную теорию света, но считал, что для объяснения электрических явлений необходимо ближе изучить природу эфира.

Эйлер вполне определенно высказал эфирную концепцию электрических явлений, одновременно считая свет волнами в эфире. Взгляды Эйлера были известны Фарадею, который прямо указывал, что в своей попытке объединить магнитные и световые явления, исходя из представлений о магнитных силовых