

вает, что сделал слабый доклад. Но тому, по чьей рекомендации доклад был включен в повестку дня, руководитель семинара обычно указывает, что впредь нужно строже относиться к отбору докладов. Но, повторяю, за всю историю семинара так было всего несколько раз. В основном принятый метод отбора действует удовлетворительно.

О семинаре можно говорить много и еще многое добавить к сказанному. Возможно, что это представляет интерес для исследователя-научоведа, которого интересуют формы научной работы вообще и научный семинар в частности. Но для меня семинар В. Л. Гинзбурга — это нечто большее. Это два с половиной десятка лет научной работы. И в течение этого времени — еженедельный семинар, место работы, учебы, место встречи с друзьями, место знакомства с новыми физическими работами и с новыми идеями. Семинары рождаются, живут и умирают. Надеюсь, что семинару В. Л. Гинзбурга суждена еще долгая жизнь.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАКСВЕЛЛА КАК МЫСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Ю. Л. МЕНЦИН

Построение и исследование всевозможных механических моделей занимают значительное место в максвелловских работах по теории поля. В связи с этим анализ роли механических моделей принципиально важен для исторического анализа трудов Максвелла. Однако несмотря на значительное число работ, посвященных этой теме, роль механических моделей в трудах ученого по-прежнему далека от ясности и продолжает вызывать оживленные дискуссии, отражающие, на наш взгляд, противоречивость использования этих моделей самим Максвеллом.

Действительно, буквально во всех своих работах Максвелл предостерегает от отождествления этих моделей с физической природой наблюдаемых электромагнитных, оптических и других явлений<sup>1</sup>. Эти указания Максвелла, а также подчеркнуто условный и грубый характер моделей позволили уже Л. Больцману [1] и А. Пуанкаре [2] отбросить мысль о том, что Максвелл пытался отождествить законы электромагнитных явлений с движением весомых тел<sup>2</sup>.

Напротив, Максвелл считал, что благодаря исследованиям электромагнитных и других явлений наука вступила в этап глубочайших качественных изменений, когда «каждый новый закон будет не только раскрывать новые области в науке, но и менять представления людей о том, какими должны быть сами законы природы... Мы должны остерегаться „предвосхищать природу“, предполагая в своих рассуждениях, ...что такие высшие, пока неизвестные нам законы можно сформулировать в той же форме, что и более простые, нам уже известные» [9, с. 377].

Максвелл категорически отвергает переход к чисто математическому описанию действительности<sup>3</sup>, считая, что при этом «мы совершенно теряем из виду объясняемые явления и потому не можем прийти к более широкому представлению об их внутренней связи, хотя и можем предвычислять следствия из данных законов» [10, с. 12]. Более того, он настаивает на том, чтобы ученый постоянно сохранял связь с наглядными механическими моделями, так как эти модели могут вести к углублению наших знаний о физической природе изучаемых явлений.

Так, рассматривая в «Трактате» явление самондукции, Максвелл указывает, что идея, возникающая первоначально у экспериментатора об аналогии электрического тока

<sup>1</sup> Чтобы подчеркнуть независимость этих моделей от физических гипотез о природе явлений, Максвелл называет свои механические построения аналогиями, научными метафорами, иллюстрациями явлений.

<sup>2</sup> Взгляды Больцмана и Пуанкаре вполне разделяются современными исследователями (см., например, [3—8]).

<sup>3</sup> Что лишает нас права видеть *конечную* цель теоретических работ Максвелла в получении каких-либо обобщающих уравнений. Тем не менее именно эта цель явно или неявно приписывается Максвеллу многими исследователями (см., например, [4—6]). При этом механические модели рассматриваются как чисто эвристические образы, позволившие Максвеллу «угадать» свои уравнения.

некоторому количеству движения в проводе, несовершенна. Величина искры при размыкании проводника зависит не только от величины тока, протекающего по этому проводнику, но и от конфигурации проводника, его длины, наличия поблизости других тел, что не похоже на количество движения, например, потока жидкости в трубе (там же, с. 407—409).

«Однако,— продолжает Максвелл,— для ума, который однажды усмотрел аналогию между явлениями самоиндукции и явлениями движения материальных тел, трудно совершенно отказаться от помощи этой аналогии или допустить, что эта аналогия имеет совершенно поверхностный характер и ведет нас по неправильному пути. Фундаментальная динамическая идея материи, способной благодаря своему движению становиться резервуаром количества движения и энергии, так *переплетена с нашими формами мышления*, что, когда мы усматриваем намек на нее в любой части природы, мы чувствуем, что перед нами открывается путь, который рано или поздно приведет к полному пониманию существа предмета» (выделено нами.— Ю. М.; там же, с. 409).

Чтобы понять, в силу чего подобные аналогии могут, по мысли Максвелла, вести к познанию физической природы явлений, попытаемся определить характер теоретизирования Максвелла, т. е. определить, что именно означало для Максвелла исследовать явления *теоретически*.

Из приведенного отрывка видно, что механическое понятие количества движения Максвелл относит вообще-то не к самой действительности (физической природе тока или какой-либо окружающей его субстанции), а к *механическим* идеям (образам), возникающим при экспериментальных исследованиях действительности. При этом необходимость использования подобных механических идей обусловлена для Максвелла не тем, что «так устроен мир», а тем, что так, «механически» устроено мышление человека, постигающего этот мир. Поэтому главную задачу своей теории Максвелл видит не в выдвижении физических гипотез о структуре субстанции (поле), передающей взаимодействие, и не в подборе обобщающих формул, а в выявлении и развитии этих механических идей (точнее, понятий) путем построения и исследования специальных механических моделей или методами аналитической механики.

При анализе теории Максвелла принципиально важно учитывать, что его механические, а также математические и аналитико-механические построения не являются привычной физической теорией, объясняющей или объединяющей (формулой) явления, открытые экспериментально. Работы Максвелла, и это подчеркивается им, носят все время предварительный характер. Цель этих работ — подготовить исследователя (теоретика или экспериментатора) к возможности новых путей исследования, не связывая их при этом никакими конкретными гипотезами, которые им следовало бы проверять для дальнейшего развития теории<sup>4</sup>. Так, теорию движения идеальной жидкости, развиваемую в работе «О фарадеевых силовых линиях», Максвелл считает не физической гипотезой о сущности электро- и магнитоэлектрических явлений, а «чисто геометрической идеей», не имеющей ничего общего с реальными жидкостями: «Сводя все к чисто геометрической идее движения воображаемой жидкости, я надеюсь достигнуть общности и точности и избежать тех опасностей, которые возникают при попытке с помощью преждевременной теории объяснить причины явлений. Предлагаемые мною рассуждения выполняют свое назначение, если будут полезны физикам-экспериментаторам при классификации и наглядном истолковании найденных ими результатов» (там же, с. 17).

Считая, что физика стоит на пороге качественных изменений, Максвелл постоянно озабочен разработкой (или подготовкой разработки) новых путей ее развития, более адекватных изучаемым явлениям. При этом чисто экспериментальный и чисто математический методы исследований представлялись Максвеллу односторонними и ограниченными, так как, по его мнению, чистые математики и чистые экспериментаторы тратят слишком много умственной энергии на математические тонкости и непрерывное нара-

<sup>4</sup> Характеризуя особенности построения максвелловского «Трактата об электричестве и магнетизме», А. Пуанкаре писал, что читателю «предлагается пустая форма, почти лишенная содержания, которая с первого взгляда производит впечатление чего-то неопределенного и неуловимого. Однако усилия, которые он, таким образом, вынужден делать, будят его мысль, и в конце концов он поймет, насколько зачастую были искусственны те теоретические построения, которыми он иной раз так восхищался» [2, с. 418].

щивание точности измерений, не оставляя свободного времени для развития «более высоких форм мышления». Исследователи обоих типов «позволяют себе приобретать неплодотворную фамильярность с фактами природы, не пользуясь возможностями актуализировать те резервы мышления, которые способны пробуждать каждое новое явление природы» [11, с. 325].

Максвелл пишет, что должен быть третий путь развития физики, в котором каждый раздел науки рассматривался бы не как коллекция фактов, объединенных формулой, но как основа для развития новых идей. «Каждая наука должна иметь свои фундаментальные идеи — образы мысли, посредством которых процесс наших догадок приводится в наиболее совершенную гармонию с процессом природы» (там же). При этом, считает Максвелл, для пробуждения «резервов мышления» и формирования неких «фундаментальных идей» (по сути, для развития понятийного аппарата физики) исследователь должен как можно активнее опираться на наглядные механические образы (там же)<sup>5</sup>.

Чтобы понять, почему Максвеллу потребовалось развивать некоторые новые фундаментальные идеи, рассмотрим, хотя бы в общих чертах, особенности той проблемы, которая возникла при исследовании электромагнитных и других явлений, не сводимых к наблюдаемому перемещению весомых тел в результате их взаимодействия.

Коротко эту проблему можно охарактеризовать как невозможность *прямого* применения законов движения Ньютона при проведении экспериментов и анализе их результатов с целью определения закона действующей силы. Такой путь исследования требовал четкого разделения явления на движущееся тело и причину изменения этого движения (другое тело или тела), что было невозможно, например, при изучении процесса превращения магнитной силы в электрическую (явление электромагнитной индукции), в котором характер и законы движения носителей электричества были неизвестны и недоступны прямому экспериментальному исследованию.

По сути, при исследовании подобных явлений ученый был лишен привычного понятийного аппарата, определяющего, что и на основании каких законов он изучает. Поэтому изучение подобных явлений часто сводилось к феноменологическому описанию весьма сложных зависимостей. Например, в явлении электромагнитной индукции величина тока во вторичной цепи оказывалась зависящей не только от скорости изменения тока в первичной цепи, но и от взаиморасположения и конфигурации обеих цепей. Кроме того, изменяющийся ток во вторичной цепи влиял на ток в первичной цепи. Причина и следствие оказывались как бы «размазанными» в пространстве, практически неотделимыми одна от другой.

Можно было пытаться строить физические гипотезы о природе тока или о свойствах какой-либо субстанции, передающей взаимодействие, и затем при помощи уравнений движения выводить из этих гипотез определенные следствия. Однако экспериментальное подтверждение этих следствий давало, по мнению Максвелла, лишь вероятностное подтверждение данной гипотезы и требовало введения дополнительных гипотез, физический смысл которых был неясен (например, допущение зависимости силы взаимодействия зарядов от величины их относительной скорости в законе Вебера).

«Истинный путь физического обоснования, — указывает Максвелл, — состоит в том, чтобы начать с явлений и вывести из них силы путем прямого применения уравнений движения. Трудность при таком подходе заключается до сих пор в том, что мы наталкиваемся, по крайней мере во время первых стадий исследования, на столь неопределенные результаты, что не имеем достаточно общих членов для выражения их без введения какого-нибудь понятия, не выводимого строго из наших предпосылок.

Поэтому очень желательно, чтобы люди науки изобрели какой-нибудь метод утверждения, благодаря которому представления, настолько точные, насколько они могут быть, могли бы быть доведены до ума и в то же время были бы достаточно общими, чтобы можно было избежать введения неоправданных деталей» [12, с. 309].

<sup>5</sup> В «Трактате» Максвелл указывает на необходимость перевода математических методов «Аналитической механики» Лагранжа на наглядный язык динамики, так как «нашей целью является как раз совершенствование наших динамических идей». Необходимо, по мнению Максвелла, «чтобы наши слова могли бы вызывать мысленный образ не алгебраического процесса, но какого-либо свойства движущихся тел» [10, с. 413].

Для понимания особенностей максвелловской теории поля очень важно учитывать, что проблематика изучения электромагнитных явлений была воспринята Максвеллом как задача разработки новых теоретических основ исследования, которые уже не требовали бы сведения явлений к движению и взаимодействию материальных точек (например, в концепции сил Вебера).

Но отказываясь от представлений о фундаментальности механического движения материальной точки и пытаясь развить новые идеи движения (энергии, импульса), адекватные изучаемым явлениям, ученый попадал в порочный круг. С одной стороны, такую теорию движения следовало развить на основе новых экспериментальных исследований, с другой — сами эти исследования требовали новой теории, способной (до опыта!) определять, как именно новое явление может служить основой для обобщения идей движения.

Чтобы такая теория могла функционировать, обобщение понятий (по Максвеллу, фундаментальных идей) движения должно было бы все время отталкиваться от ясных понятий, не требующих опытной проверки (какую требовали физические гипотезы). В противном случае мы непонятное объясняли бы непонятным и в лучшем случае могли бы накапливать эмпирические закономерности.

Систему таких ясных (фундаментальных) понятий представляла механика весомых тел. Поэтому задача Максвелла состояла в том, чтобы научиться развигать механические понятия, отталкиваясь от понятий... самой механики. Но по отношению к изучаемым явлениям механические понятия уже не рассматривались как фундаментальные и сами требовали обобщения. Поэтому при теоретическом анализе явлений требовалось выделить такую предметную область, в которой применение механических понятий носило бы все-таки точный характер, не нуждаясь в опытной проверке.

Методом решения этих проблем стала максвелловская концепция *физической аналогии*<sup>6</sup>.

Механический образ, предлагаемый Максвеллом, позволял при исследовании нового явления пользоваться хорошо известными понятиями, не связывая при этом его никакими физическими гипотезами о природе явлений, так как относился этот образ к *процессу проведения экспериментов*, в которых обнаруживалось данное явление. Тем самым внимание исследователя переключалось с проблемы выдвижения физических гипотез о внутренней природе изучаемых явлений на анализ того, *подобно чему* может изучаться это явление (подобно потоку несжимаемой жидкости, механизму, волновому движению и т. п.).

Переход к такому анализу был «подсказан» Максвеллу особенностями экспериментальных исследований (прежде всего Фарадея), в ходе которых становилось принципиально важным уметь изучать явление не только как ту или иную пондеромоторную силу, но и как *процесс* взаимопревращения сил (например, магнитной в электрическую в явлении электромагнитной индукции), не задаваясь при этом вопросом о физической природе этого процесса<sup>7</sup>.

Именно при изучении подобных явлений исследователи учились пользоваться механическими понятиями «как если бы», не рассматривая их как физические гипотезы о природе явлений. Сопоставляя при этом механические образы, относящиеся к различ-

---

<sup>6</sup> Уже в первой работе по теории поля «О фарадеевых силовых линиях» Максвелл указывает на необходимость «найти такой метод исследования, который на каждом шагу основывался бы на ясных физических представлениях, не связывая нас в то же время какой-нибудь теорией, из которой заимствованы эти представления, благодаря чему мы не будем отвлечены от предмета преследованием аналитических тонкостей и не отклонимся от истины из-за излюбленной гипотезы» [10, с. 12]. Таким методом Максвелл считал построение физических аналогий.

<sup>7</sup> Так Фарадей подчеркивает, что идеи о сохранении числа силовых линий, пронизывающих контур проводника (т. е. их поведение подобно потоку несжимаемой жидкости), не связаны с какими-либо гипотезами о физической природе силы в месте ее действия и могут применяться при описании и исследовании явлений, какова бы эта природа ни была [13, с. 565]. Вопрос о физической природе магнитной и электрической сил, а также их взаимосвязи Фарадей оставляет открытым. Для него пока важно научиться исследовать явление электромагнитной индукции *адекватно* главной особенности этого явления — зависимости от распределения магнитных сил в пространстве, окружающем проводник с током.

ным явлениям, и исследуя те условия, в которых эти образы могут совпасть, можно обнаружить условия, в которых в качестве модели процесса эксперимента выступит уже не механический образ, а другое явление. Но тем самым мы можем прийти к открытию физической связи двух явлений и, следовательно, к углубленному пониманию их природы<sup>8</sup>.

Применение и анализ механических аналогий расширяют возможности исследователя, позволяют ему выделить любой промежуточный этап экспериментального процесса и подвергнуть специальному анализу, не теряя при этом наглядной связи с изучаемым явлением. Так постепенно открывается путь к формированию тех фундаментальных идей, которые, по мысли Максвелла, позволяют в каждом классе явлений сделать наши методы исследований адекватными изучаемой действительности, следовать логике явлений, не стараясь свести их во что бы то ни стало к обычной механической силе.

Но это только одна сторона функционирования механических образов, объясняющая, почему Максвелл стремился все время перевести свои математические исследования на наглядный язык механики.

В то же время в результате максвелловских исследований новые явления превращались в своеобразные мысленные эксперименты над понятиями механики, выявляющие возможность обобщенного понимания движения, силы и энергии.

Анализируя свои модели, Максвелл показывает, что уже в гидродинамике, теории упругости, теории механизмов, аналитической механике и т. д. мы имеем дело по сути с обобщенными понятиями механики, хотя и можем свести их к обычным понятиям. Например, поток жидкости можно описывать, рассматривая движение отдельных частиц, а можно, не учитывая этих составляющих движений, измерять количество жидкости, проходящее через какую-либо площадку. Нечто подобное происходит, по мнению Максвелла, в экспериментальных исследованиях электромагнитных явлений (см. [15]), ставящих перед собой задачу обойти вопрос о конкретной структуре этих явлений и находящих предпосылки этого решения в различных механических системах.

Можно было попытаться зафиксировать это обобщенное применение механических понятий, выявить физический смысл того или иного обобщения, рассматривая уже экспериментально изучаемое явление как аналогию механике. Обобщенный характер движения потока жидкости или сложного механизма приобретает в результате такого соотношения смысл *физической* проблемы, придавая реальным экспериментам характер мысленных экспериментов над понятиями механики.

Полностью характер мысленных экспериментов построения Максвелла приобретают при переходе к чисто математическому анализу, фиксирующему и продолжающему обобщение механических понятий, начатое механической аналогией. При этом математические операции (ротор, дивергенция), ведущие к тем или иным уравнениям в частных производных, выступают уже как аналогии механической модели-анalogии, например возможность заменить интегрирование по объему поверхностным интегралом в теореме Гаусса или интегрирование по поверхности криволинейным интегралом по контуру, охватывающему эту поверхность в теореме Стокса.

Именно применение этих математических методов позволяет Максвеллу осуществить «необратимое» обобщение механических понятий, невозможное в рамках самой механики.

Однако для восстановления связи с реальными процессами экспериментирования Максвеллу приходится вновь и вновь переводить свои уравнения на язык механики. В свою очередь отклонение реального явления от идеальной, не несущей в себе ничего гипотетического, модели должно быть в теории Максвелла понято как новая, столь же

---

<sup>8</sup> Чтобы подчеркнуть взаимообогащающий характер такого открытия, Фарадей озаглавил свое сообщение об открытии вращения плоскости поляризации в магнитном поле так: «О намагничивании света и об освещении магнитных силовых линий» [13, с. 11]. Максвелл указывает, что принципиально важным в этом открытии было специальное изучение Фарадеем вращательного характера магнитных сил тока и изучение вращения плоскости поляризации в различных средах, что подсказало методы поиска и характер связи магнетизма и оптики [14, с. 212—214].

идеальная модель, выступающая одновременно как новый этап обобщения механических понятий и как продолжение анализа процессов проведения реальных экспериментов на языке механики.

Важно отметить, что идеи обобщенного движения относятся не к частям, из которых построена та или иная модель-аналогия, а к модели в целом. В этом плане модель выступает принципиально неделимой, ее бессмысленно детализировать как физическую гипотезу. Модель перестраивается целиком, заменяется новой, позволяющей продолжить то обобщение понятий, которое содержалось в старой модели, и тем самым охватывать новые классы явлений.

При этом аналогии (целостные образы движения) подготавливают «отрыв» понятий движения (энергии, импульса) от движения материальных тел, подготавливают формирование понятия *поля* как особой субстанции, принципиально несводимой к механике материальных точек и изменяющей наши представления о структуре физической реальности. В отличие от каких-либо эфиров поле вводится Максвеллом не как некая гипотетическая субстанция для объяснения результатов эксперимента, а как теоретическая основа нового метода исследования действительности, так что место материальной точки как элемента реальности заняло электромагнитное поле [16, с. 56].

Нам представляется, что анализ механических моделей как мысленных экспериментов позволит лучше понять характер тех идеализаций, с помощью которых Максвеллу удалось разработать физическое понятие, именно понятие электромагнитного поля, сыгравшее фундаментальную роль в становлении немеханической картины мира. Этот анализ должен включать в себя: а) изучение тех теоретических проблем, которые возникли при попытке исследования явлений на основе концепции близкодействия; б) изучение особенностей экспериментальных исследований явлений, подсказавших Максвеллу форму связи его теории с механикой и математикой (это прежде всего экспериментальные исследования Фарадея, труды которого Максвелл рассматривал как логическую основу своей теории); в) изучение механических и математических построений Максвелла как единого мысленного эксперимента, с помощью которого Максвеллу удалось раскрыть возможность теоретического и экспериментального исследования электромагнитных явлений на основе концепции близкодействия.

#### Литература

1. *Больцман Л.* О методах теоретической физики.— В кн.: Статьи и речи. М.: Наука, 1970, с. 58—66.
2. *Пуанкаре А.* Электричество и оптика. Введение.— В кн.: Избранные труды. Т. 3. М.: Наука, 1972, с. 412—418.
3. *Турнер Д.* Максвелл о логике динамического объяснения.— В кн.: Максвелл Дж. К. Статьи и речи. М.: Наука, 1968, с. 252—269.
4. *Степин В. С.* Становление научной теории. Минск: БГУ, 1976. 319 с.
5. *Bromberg J.* Maxwell's Displacement Current and his Theory of Light.— Arch. Hist. Ex. Sci., 1967, v. 4, p. 218—234.
6. *Kargon R. H.* Model and Analogy in Victorian Science: Maxwell's Critique of the French Physicists.— J. Hist. Ideas, 1969, v. 30, p. 423—436.
7. *Moyer D. F.* Continuum Mechanics and Field Theory: Thomson and Maxwell.— Stud. Hist. Phil. Sci., 1978, v. 9, p. 35—60.
8. *Chalmers A. F.* Maxwell's methodology and his application of it to electromagnetism.— Stud. Hist. Phil. Sci., 1973, v. 4, p. 107—164.
9. Вступительная лекция, прочитанная Джеймсом Клерком Максвеллом в Лондонском Королевском колледже.— Успехи физ. наук, 1981, т. 135, вып. 3, с. 371—380.
10. *Максвелл Дж. К.* Избранные произведения по теории электромагнитного поля. М.: ГИТТЛ, 1952. 688 с.
11. *Maxwell J. C.* Elements of Natural Philosophy.— In: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. V. 2. Cambridge, 1890, p. 324—328.
12. *Maxwell J. C.* On the proof of the Equations of Motion of a Connected System.— In: The Scientific Papers of J. C. Maxwell. V. 2. Cambridge, 1890, p. 308—309.
13. *Фарадей М.* Экспериментальные исследования по электричеству, Т. 3. Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 831 с.
14. *Максвелл Дж. К.* О математической классификации физических величин.— В кн.: Статьи и речи. М.: Наука, 1968, с. 37—47.
15. *Максвелл Дж. К.* Фарадей.— В кн.: Статьи и речи. М.: Наука, 1968, с. 207—215.
16. *Эйнштейн А.* О современном кризисе теоретической физики.— В кн.: Собр. науч. трудов. Т. 4. М.: Наука, 1967, с. 55—60.