



МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ
ЛЕОНТОВИЧ

**К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
М. А. ЛЕОНТОВИЧА****ОТ РЕДАКЦИИ**

7 марта 1983 г. исполнилось 80 лет со дня рождения выдающегося советского физика-теоретика академика Михаила Александровича Леонтовича (1903 — 1981). Немного найдется людей, которые могли бы сравниться с ним по силе и благотворности своего научного и человеческого влияния на окружающих. Первые десятилетия яркой творческой деятельности Михаила Александровича связаны, главным образом, с Московским университетом и Физическим институтом АН СССР. Последние 30 лет своей жизни он работал в Институте атомной энергии, где создал пользующуюся мировым признанием научную школу в области теории высокотемпературной плазмы.

М. А. Леонтович был теоретиком с необычайно широким диапазоном научных интересов. В этом номере мы публикуем три статьи, освещающие его вклад в столь различные области физики, как электродинамика, физическая оптика и акустика, статистическая физика. Ознакомившись с публикуемыми материалами, читатели УФН, без сомнения, ощутят емкость и точность характеристики, данной научному творчеству Михаила Александровича еще в 1946 г. С. И. Вавиловым: «М. А. Леонтович — представитель классического направления в теоретической физике. Вместе с тем ему принадлежат некоторые фундаментальные исследования по вопросам квантовой физики *)...Характерная черта работ М. А. Леонтовича — их глубина и строгость».

Редакция УФН надеется, что наша публикация поможет приобщить к творческому наследию М. А. Леонтовича новые поколения физиков и сохранить благодарную память об этом замечательном ученом и человеке.

538.3(092)

**О РАБОТАХ М. А. ЛЕОНТОВИЧА В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ****М. Л. Левин, С. М. Рытов, В. Д. Шафранов**

Работы М. А. Леонтовича по электродинамике можно разделить на два цикла. Первый из них включает в себя серию работ по теории распространения электромагнитных волн, выполненных в основном в 40-е годы. Второй связан с исследованиями по удержанию высокотемпературной плазмы в магнитном поле.

*) По этому поводу см.: Ка дом цев Б. Б., Ко ган В. И., С ми р н о в Б. М., Ша ф ра н о в В. Д. К 50-летию работы М. А. Леонтовича и Л. И. Мандельштама «К теории уравнения Шрёдингера». — УФН, 1978, т. 124, с. 547.

К числу наиболее существенных достижений М. А. Леонтовича в области электродинамики, несомненно, относится установление приближенных граничных условий на поверхности хорошего проводника. Сейчас эти условия называют импедансными или условиями Леонтовича. Их значимость проистекает из того, что они сводят решение волновой задачи о двух средах, одна из которых является хорошим проводником, к задаче о поле только вне проводника. Электрическая и магнитная напряженности этого внешнего поля связаны на поверхности проводника универсальным соотношением — через импеданс проводника, зависящий от толщины скин-слоя в нем на рассматриваемой частоте.

В течение почти десяти лет эти граничные условия использовались во многих работах по высокочастотной электродинамике со ссылками на М. А. Леонтовича как на автора условий, но без ссылок на конкретную работу, потому что он, указав на эти условия в 1938—1939 гг., опубликовал такую работу только в 1948 г.¹ Даже сам М. А. Леонтович до этой публикации писал о своих граничных условиях, ссылаясь на чужие работы, в которых авторы пользовались этим подходом, указывая на то, что он был предложен М. А. Леонтовичем. С тех пор круг краевых задач электродинамики при наличии хороших проводников все время разрастался и граничные условия Леонтовича прочно вошли в обиход радиофизиков и радиотехников.

Другая фундаментальная работа М. А. Леонтовича относится к 1944 г. и дает приближенное решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности Земли (задача Зоммерфельда). Именно в этой работе² был предложен метод параболического уравнения. Введя продольный и поперечный масштабы изменения так называемой функции ослабления — медленно меняющегося множителя в выражении для поля, М. А. Леонтович показал, что для нее, как это следует из его импедансных граничных условий, получается легко решаемое дифференциальное уравнение параболического типа. В частности, результат Зоммерфельда для вертикального диполя на плоской однородной Земле (формула Вейля — Ван-дер-Поля) появляется уже в конце четвертой страницы этой работы, тогда как ее вывод в книге Франка и Мизеса занимает 20 страниц большого формата. Но дело не сводится к этому частному результату, хотя он и считается по праву одним из крупнейших достижений электродинамики в нашем веке. Как указал сам М. А. Леонтович во вступительной части статьи, метод параболического уравнения применим и в более сложных задачах о плавно неоднородной Земле (что и сделано в данной работе и приводит к интегральному уравнению Вольтерры) и о распространении волн вокруг сферической Земли. Эта последняя задача была решена в совместной работе М. А. Леонтовича и В. А. Фока в 1946 г.³ Используя тот же метод, В. А. Фок вскоре смог учесть и наличие рефракции в окружающей Землю радиально-неоднородной атмосфере. Однако значение метода параболического уравнения далеко выходит за рамки задач такого типа. Он нашел и продолжает находить все более широкое применение при количественном описании множества волновых процессов, в том числе в задачах о распространении волн в нелинейных и в случайно-неоднородных средах.

К тому же времени относятся и исследования М. А. Леонтовича в совсем ином направлении. Речь идет о теории тонких проволоочных антенн. В совместной с М. А. Левиным статье⁴ путем использования характерного малого параметра было получено приближенное интегро-дифференциальное уравнение для тока в тонком проводнике. Малым параметром здесь является обратная величина логарифма отношения длины проводника к его толщине. Квазителеграфная структура уравнения позволила

единым образом охватить резонансный и нерезонансный режимы возбуждения антенны, рассмотреть как приемные, так и передающие антенны. В отличие от предшествующих работ по проволочным антеннам, данный подход позволил охватить и случай изогнутых проводников, и систем проводов с произвольной формой поперечного сечения⁵. Аналогичный подход лег в дальнейшем в основу теории щелевых антенн, развитой Я. Н. Фельдом.

Для всех этих трех заложенных М. А. Леонтовичем направлений характерен сугубо физический подход, связанный с использованием малых параметров уже на стадии постановки задачи, а не при поиске приближенных выражений, вытекающих из точных, но физически непрозрачных и практически не работающих решений. Из сказанного, конечно, не следует, что М. А. Леонтович мало интересовался точными решениями. Напротив, ряд поставленных им электродинамических задач получил в его работах точное решение.

Так, например, готовя к печати посмертную работу Л. И. Мандельштама «Излучение через отверстие в резонаторе», он обобщил примененный в этой работе метод Рэлея на волновое электромагнитное поле и получил точную формулировку принципа Бабине для произвольных отверстий в плоском бесконечно тонком идеально проводящем экране⁶. В частности, для узкой прямой щели, основываясь на этой теореме и на результатах упомянутой выше работы⁵, М. А. Леонтович вывел простую формулу для эффективного поперечника прохождения в случае падающей волны, у которой магнитный вектор направлен параллельно щели. Заметим, что строгое решение задачи в случае волны, у которой параллелен щели электрический вектор, было дано М. А. Леонтовичем и рассказано им самим еще в 1933 г. Оно включено в качестве добавления в 5-ю лекцию курса Л. И. Мандельштама⁷.

Следует указать далее на совместную с С. М. Рытовым работу⁸, касающуюся электрических флуктуаций теплового происхождения. Именно М. А. Леонтовичу принадлежала идея о переходе (в рамках квазистационарности) от интегральной э.д.с. Найквиста к обуславливающему ее стороннему флуктуационному электрическому полю. В дальнейшем такого рода сторонние поля — как электрическое, так и магнитное — позволили развить общую флуктуационную электродинамику, не ограниченную условием квазистационарности.

В самом начале работы по проблеме управляемого термоядерного синтеза М. А. Леонтович выполнил ряд важных исследований по электродинамике токонесущей плазмы.

Прежде всего, это исследование влияния металлического кожуха на равновесие тороидальной плазмы. В первой работе на эту тему⁹ рассчитаны силы, возникающие при смещении проводника с током относительно кожуха с конечной проводимостью. Вторая работа¹⁰ посвящена учету разъемов в идеально проводящем кожухе, необходимых для введения в разрядный объем вихревого электрического поля. В работе показано, что в случае тонкого кожуха даже узкий разъем дает ослабление удерживающей силы, соответствующее выпадению из игры участка кожуха длиной, равной примерно его малому диаметру. Существенно, что задачу о разъемах М. А. Леонтович свел к чисто внутренней с граничными условиями, эффективно учитывающими наличие разъемов. Этот метод и полученные М. А. Леонтовичем граничные условия позволили в дальнейшем решить целый ряд задач, существенных для теории равновесия плазмы, о влиянии разъемов на величину равновесного смещения плазменного шнура в токамаке и на проникновение через разъемы управляющего поля.

Одной из ключевых для проблемы управляемого термоядерного синтеза стала выполненная в 1952 г. М. А. Леонтовичем (совместно с В. Д. Шафрановым) работа о стабилизации изгибных неустойчивостей сильнооточного разряда с помощью внешнего продольного магнитного поля¹¹. М. А. Леонтович предложил метод расчета сил, действующих на проводник в предположении неизменности его сечения и отсутствия магнитного поля внутри проводника. В результате была продемонстрирована возможность стабилизации неустойчивостей плазмы, вызываемых током. Эта работа послужила отправным пунктом для последующих обширных исследований поведения токонесущего плазменного шнура при наличии продольного магнитного поля, стимулировала экспериментальные исследования стабилизации неустойчивостей и, по существу, легла в основу теории токамака.

Основополагающей в физике самостягивающихся разрядов — пинчей стала другая работа Михаила Александровича того же периода, выполненная совместно с С. М. Осовцом¹². Во время первых экспериментальных исследований мощных импульсных разрядов утвердилось казавшееся естественным представление, что сжатие разряда должно происходить адиабатически, так что в каждый момент соблюдается условие равновесия газокINETического давления и электродинамической силы стягивания. Однако экспериментальные данные не укладывались в эти представления. Непонятным, в частности, был острый провал на нарастающей части осциллограммы тока. Величина тока в месте заострения, получившая название тока особенности, была меньше максимально достижимого, температура плазмы оказывалась ниже ожидаемой. Наблюдаемая совокупность фактов и получила естественное объяснение в динамической инерционной теории сжатия разряда М. А. Леонтовича и С. М. Осовца.

Эта работа была первым теоретическим исследованием по проблеме управляемого синтеза, результаты которого оказались в полном соответствии с экспериментом. Этим она оказала существенное положительное психологическое воздействие на тех, кто занимался исследованиями высокотемпературной плазмы (этот капризный объект оказался познаваемым!). Результаты работы по инерционному сжатию стали классическими в физике мощных импульсных разрядов.

Наряду с первоочередными конкретными задачами, возникавшими в ходе работы по управляемому синтезу, Михаила Александровича, как всегда, интересовали общие принципиальные вопросы физики.

Необходимость учета теплового движения зарядов в задачах о прохождении волн через плазму привела М. А. Леонтовича к рассмотрению общих особенностей распространения электромагнитных волн в средах с пространственной дисперсией. В работе¹³ известные формулы Крамерса — Кронига обобщены на случай сред с пространственно нелокальными материальными уравнениями (пространственная дисперсия). Как показал М. А. Леонтович, в этом случае принцип причинности в сочетании с требованиями теории относительности получает наиболее общее свое выражение и приводит не только к связи между вещественной и мнимой частями проницаемости, но и к определенным ограничениям на каждую из них.

Казалось бы, после появления специальной теории относительности представление о силовых линиях электрического и магнитного полей стало полностью архаическим, сохранив лишь учебно-иллюстративный смысл. Между тем силовые линии магнитного поля в плазме «материализуются» и индивидуализируются вращающимися вокруг них электронами. Поэтому сразу же возникает вопрос о релятивистски инвариантном определе-

нии силовых линий. Именно так поставил этот вопрос М. А. Леонтович в своей работе ¹⁴ и показал, что в случае, когда электрический и магнитный векторы ортогональны, можно построить движущиеся силовые линии, не зависящие от выбора инерциальной системы отсчета. Эта работа, четко решающая поставленный вопрос, является вместе с тем одной из самых изящных в литературе по электродинамике.

Остановимся еще на одной, несколько более поздней работе Михаила Александровича. В теории устойчивости плазмы, находящейся в магнитном поле с винтовыми силовыми линиями, важное значение имеет понятие «шир», характеризующее различие среднего шага магнитных силовых линий на разных магнитных поверхностях данной тороидальной системы. М. А. Леонтович поставил вопрос о связи шири с локальной геометрической характеристикой поведения семейства силовых линий — скосом и на основе теории конгруэнции кривых показал, что эти величины в общем случае не сводятся одна к другой. В этой небольшой работе отчетливо проявляется общий характерный стиль работ М. А. Леонтовича: глубокий подход к проблеме, широкая эрудиция, лаконизм и классическая четкость изложения.

ЦИТИРОВАННЫЕ РАБОТЫ М. А. ЛЕОНТОВИЧА

1. О приближенных граничных условиях для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел.— В сб. II «Исследования по распространению радиоволн»/Под ред. Б. А. Введенского.— М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1948.— С. 5.
2. Об одном методе решения задач о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности Земли.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1944, т. 8, с. 16.
3. Решение задачи о дифракции электромагнитных волн вокруг Земли по методу параболического уравнения.— ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 557.— (Совместно с В. А. Фоком.)
4. К теории возбуждения колебаний в вибраторах антенн.— ЖТФ, 1944, т. 14, с. 482.— (Совместно с М. Л. Левиным.)
5. Теория вынужденных электромагнитных колебаний в тонких проводниках произвольного сечения и ее применения к расчету некоторых антенн.— В Сб. научн. трудов, 1946.— Вып. 1, с. 5.
6. Об одной теореме теории дифракции и ее применения к дифракции на узкой щели произвольной длины.— ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 474.
7. М а н д е л ь ш т а м Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике.— М.: Наука, 1972.— С. 38.
8. О дифференциальном законе для интенсивности электрических флуктуаций и о влиянии на них скин-эффекта.— ЖЭТФ, 1952, т. 23, с. 246.— (Совместно с С. М. Рытовым.)
9. О силах, действующих на прямолинейный ток, находящийся внутри проводящей цилиндрической трубы.— В кн. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций.— М.: Изд-во АН СССР, 1958.— Т. 1, с. 110.
10. Магнитное поле линейного тока окруженного идеально проводящим цилиндром с разъемом. Ibid.— С. 222.
11. Об устойчивости гибкого провода в продольном магнитном поле. Ibid.— С. 207—242.— (Совместно с В. Д. Шаfranовым.)
12. О механизме сжатия тока при быстром и мощном газовом разряде. АЭ, 1956, № 3, с. 81.— (Совместно с С. М. Осовцом.)
13. Обобщение формул Крамерса—Кронига на среды с пространственной дисперсией.— ЖЭТФ, 1961, т. 40, с. 907.
14. Эволюция представлений о магнитных и электрических силовых линиях.— УФН, 1964, т. 84, с. 715.