

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О МАГНИТНЫХ СПЕКТРАХ.

В. К. Аркадьев, Москва.

Три года назад был дан краткий очерк¹⁾ теории и основных фактов магнитной спектроскопии, новой научной области, представляющей собой результат перенесения теоретической и экспериментальной методики спектрального анализа на область магнетизма. Магнитные свойства могут быть исследованы при наблюдении поглощения, отражения или преломления электромагнитных волн, падающих на ферромагнитные тела. Название магнитного спектра носит кривая, показывающая зависимость от длины волны показателя преломления, коэффициента отражения или абсорбции, обусловленных магнитными свойствами данного магнитного вещества. Исследуя магнитные свойства железа или стали в быстро меняющихся магнитных полях, мы также получаем магнитные спектры; они имеют вид кривых зависимости проницаемости и других магнитных характеристик от числа перемен поля или от длины волны.

При объяснении факта поглощения электромагнитных волн магнитными веществами нам пришлось приписать последним особое свойство, аналогичное той электропроводности ϵ , которую мы приписываем изоляторам, когда в них испытывает поглощение электромагнитная волна определенного периода. По аналогии это свойство мной названо магнитной

¹⁾ В. К. Аркадьев. Успехи физических наук. 4, 263, 1924. См. также Новые идеи в физике, № 11, 1925 г.

проводимостью. Последняя, а также характеризующий ее коэффициент ρ , вначале были мною введены в теорию при разборе процессов намагничивания, происходящих в железе в течение очень короткого времени, порядка миллиардной доли секунды; поскольку, однако, в ферромагнитных веществах происходит поглощение энергии магнитного поля и в медленных процессах, коэффициент магнитной проводимости ρ получил применение также и при описании медленно протекающих электромагнитных явлений, имеющих место в электротехнике переменного тока обычных частот.

Вследствие этого выражение плотности магнитного тока в уравнениях Максвелла получило у нас для синусоидальных процессов разных периодов ту же форму, которую имеет плотность электрического тока:

$$j_m = \rho H + \frac{\mu}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial t},$$

$$j_e = \varepsilon E + \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t}.$$

Здесь первые члены суммы представляют собой токи проводимости, а вторые — токи смещения, μ означает магнитную проницаемость, ε — диэлектрический коэффициент, а E и H — электрическое и магнитное поля.

Самые уравнения Максвелла получают следующую форму:

$$\text{rot } H = \frac{4\pi\sigma}{c} E + \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\text{rot } E = -\frac{4\pi\rho}{c} H - \frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t}.$$

В медленно протекающих процессах и в не слабых полях что обычно имеет место на практике, магнитная проводимость может быть определена по теплу гистерезиса Q :

$$\rho = \frac{2Q}{TH_0^2}, \quad (1)$$

где H_0 — амплитуда магнитного поля, а T — период. При расчетах, однако, чаще всего приходится иметь дело не с ρ ,

а с произведением $2\rho T$, которое я называю „магнитный натек“ и обозначаю ρ' , так что

$$\rho' = 2\rho T = \frac{4Q}{H_0^2}.$$

Эта величина в наших уравнениях постоянно фигурирует на-ряду с магнитной проницаемостью μ и часто входит с ней в различные комбинации (μ_k и μ_n).

Коэффициент ρ в нашей теории электромагнитного поля в магнитных металлах столь же необходим для полной характеристики вещества с магнитной стороны, как в старой максвелловской теории для полной характеристики вещества с электрической стороны кроме ϵ необходима еще σ .

Поэтому в настоящее время для оценки магнитных свойств того или иного материала следует указывать не только его магнитную проницаемость μ для магнитных полей разной силы, но и его магнитную проводимость ρ . Высокие значения первой указывают на легкую намагничиваемость данного образца, высокие значения второй — на большую задерживательную силу и большое тепло гистерезиса. Для изготовления постоянных магнитов мы будем требовать от завода материал с большим магнитным натеком, а для динамной и трансформаторной стали — образцы с большой проницаемостью и малым магнитным натеком.

Работы по магнитным спектрам и работы, из них вытекавшие, привели к следующим основным результатам:

1. Уравнения Максвелла была придана новая форма, удобная для учета тепла гистерезиса и магнитного трения.
2. Была разработана теория нового вида дисперсии и абсорбции электромагнитных волн, именно обусловленной колебаниями магнитных центров, заложенных в веществе.
3. Были получены новые опытные данные относительно поведения магнитных веществ в переменных магнитных полях, т. е. были получены и изучены магнитные спектры.

В настоящем обзоре мы рассмотрим, что достигнуто нового по этим трем линиям за 3 года, прошедшие после появления в „Успехах“ первой статьи о магнитной спектроскопии.

1. ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОПОЛНЕННЫХ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА.

При вычислении сопротивления железных проволок переменному току, учета тепла токов Фуко, при исследовании магнитных свойств металлов в высокой частоте и в ряде других случаев в прежнее время применялись формулы, полученные без учета магнитных потерь, т. е. без введения магнитной проводимости. В настоящее время, когда нашими работами выяснена возможность введения этого фактора в уравнения электромагнитного поля Максвелла, пришлось пересмотреть и реформировать старые формулы Сте-

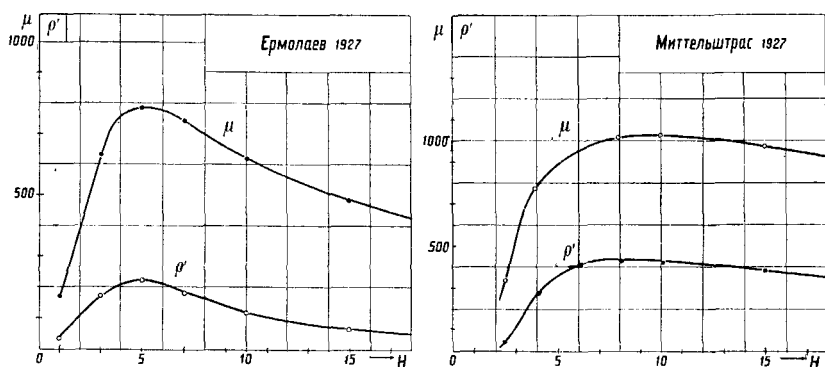


Рис. 1. Кривые магнитной проницаемости и магнитной проводимости в постоянных полях.

фана, Релэя и Ценнека. Эта работа выполнялась за границей Гансом, Уллером, Трукса и Тонксом; у нас Введенским и Шиллеровым она была доведена до конца. Последние получили формулы и кривые, которые позволяют вычислить действительное сопротивление и проницаемость цилиндрических проволок в переменном поле при любых потерях на гистерезис. Эти формулы предполагают однако, что проницаемость μ и магнитная проводимость ρ не зависят от силы поля. Между тем μ , ρ и ρ' не постоянны. Впервые значения ρ' для полей разной силы параллельно с значениями μ были вычислены для железа разных образцов в моей статье 1925 г. в „Трудах ГЭИ“. В 1926 и 1927 гг.

такие двойные характеристики магнитных материалов, подлежавших практическому испытанию, были получены у нас А. А. Ермолаевым в Москве¹⁾, а за границей Миттельштрассом в Иене (рис. 1).

Дипломная работа одного и докторская диссертация другого в сущности касались одного и того же вопроса: они имели целью определить величину погрешности, которую мы делаем в вычислениях, считая, что μ и ρ' постоянны.

Ермолаев это делал, измеряя сопротивление железных проволок для переменного тока и сравнивая полученные значения с вычисленными по формулам Введенского и Шиллерова, а Миттельштрасс измерял глубину, на которую проникает в проволоку электрический переменный ток, и затем вычислял эту глубину, пользуясь нашей магнитной проводимостью ρ .

Замечательны методы, которыми оказалось возможно воспользоваться в Иене: для исследования глубины проникания электромагнитной волны в железный цилиндр были использованы все средства, имеющиеся в Иене благодаря соседству фирмы Цейсса: чтобы заложить в железный цилиндр особые зонды для прослеживания проникания тока, цилиндр был разрезан на две части и половинки были так отшлифованы, чтобы на приложенной плоской стеклянной пластинке выступали параллельные интерференционные полосы; после вложения проводов обе половины были сжаты, чем был достигнут совершенный магнитный контакт.

Обе работы, сделанные одновременно и независимо друг от друга, показали, что введение вычисленного по формуле (1) нашего коэффициента магнитной проводимости ρ дают хорошие значения сопротивления проволок и коэффициента затухания волн, проникающих вглубь проволоки. От дальнейших работ следует ждать устранения еще остающегося небольшого разногласия между опытными и теоретическими величинами.

¹⁾ Не безынтересно отметить, что первую кривую проницаемости железа μ впервые получил и построил А. Г. Столетов в 1872 г., выполняя у Кирхгофа свою докторскую диссертацию.

2. НОВОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРИИ МАГНИТНОЙ ДИСПЕРСИИ И АБСОРБЦИИ.

В 1908 — 1911 гг. я исследовал двумя методами магнитные свойства железа, стали и никеля в магнитных полях быстрых электрических колебаний. Один метод¹⁾ состоял в измерении поглощения энергии волн, распространяющихся по параллельным проволокам из исследуемого металла. Измеряя коэффициент поглощения, можно вычислить кажущуюся проницаемость μ_k . Оказалось, что эта величина убывает к коротким волнам и при волне около 1 см близка к единице, что видно из следующей таблицы:

λ см		1,3	2,3	3,0	6,0	12	30
Fe	μ_k	1,9	5,5	10,0	32	42,5	52
	μ_n	—	—	0,92	0,85	3,0	14,1
Ni	μ_k	—	1,22	1,6	4,1	7,5	12,4
	μ_n	—	—	0,74	0,88	1,4	5,35

Кривая зависимости коэффициента поглощения от длины волны имеет вид, подобный кривым $f = \frac{\mu_k}{\lambda}$ на рис. 2; она обнаруживает максимум поглощения для волн определенного периода. Максимум f , убывание магнитных свойств с λ , а также другие особенности зависимости от длины волны функций f и μ_k , являющихся магнитными спектрами, хорошо объясняются нашей теорией магнитной дисперсии и абсорбции, основанной на гипотезе упруговязкого движения элементарных магнитов.

Особые правила анализа кривой $f = \frac{\mu_k}{\lambda}$ позволяют легко найти три основных параметра, характеризующих частицы вещества, в котором происходит дисперсия; именно, собственную длину волны элементарных магнитов λ_0 , меру затухания

¹⁾ Ж. Р. Ф. О. 44, 165, 1912, Ann. d. Phys. 38, 105, 1919.

собственных колебаний магнитов θ и долю участия магнитов с собственной волной λ_0 в общей поляризации вещества постоянным полем, характеризующую „парциальным коэффициентом поляризации“ k_{∞} . При помощи этих трех коэффициентов λ_0 , θ и k_{∞} можно вычислить вытекающие из теории колебаний элементарных магнитов значения μ и ρ' :

$$\mu = 1 + \frac{m(1-v^2)}{\theta^2 v^2 + (1-v^2)^2} \quad (2)$$

и

$$\rho' = \frac{m\theta v}{\theta^2 v^2 + (1-v^2)^2}, \quad (3)$$

где $v = \lambda_0/\lambda$ и $m = 4\pi k_{\infty}$.

По этим величинам μ и ρ' могут быть определены $\mu_k = \sqrt{\mu^2 + \rho'^2} + \rho'$ и $f = \mu_k/\lambda$; полученные таким образом величины в виде кривых были сопоставлены с опытными, причем обнаружилось удовлетворительное согласие тех и других. Эти кривые и были приведены в моей первой статье в „Успехах“.

За истекшие 3 года мне удалось обработать опыты, произведенные по второму методу¹⁾, который состоял в сравнении коэффициента отражения волн от редких герцовых решеток из магнитных проволок с таковым для немагнитных проволок.

Измерения показали, что в этом случае магнитные свойства сказываются значительно слабее и что они исчезают при более длинной волне, чем в случае поглощения волн в проволоках. Подробный теоретический анализ отражения волн от решеток Герца мне позволил в 1924—1925 гг. выяснить причину такого резкого различия в выражении магнитных свойств. Оказывается, что при отражении от редких решеток магнитные свойства обусловлены другим видом кажущейся проницаемости, именно μ_k ; теория решеток мне позволила вычислить из опыта ее значения. Эти величины представлены в той же таблице.

¹⁾ Ж. Р. Ф. О. 45, 46, 1913. Ann. d. Phys. 45, 135, 1914.

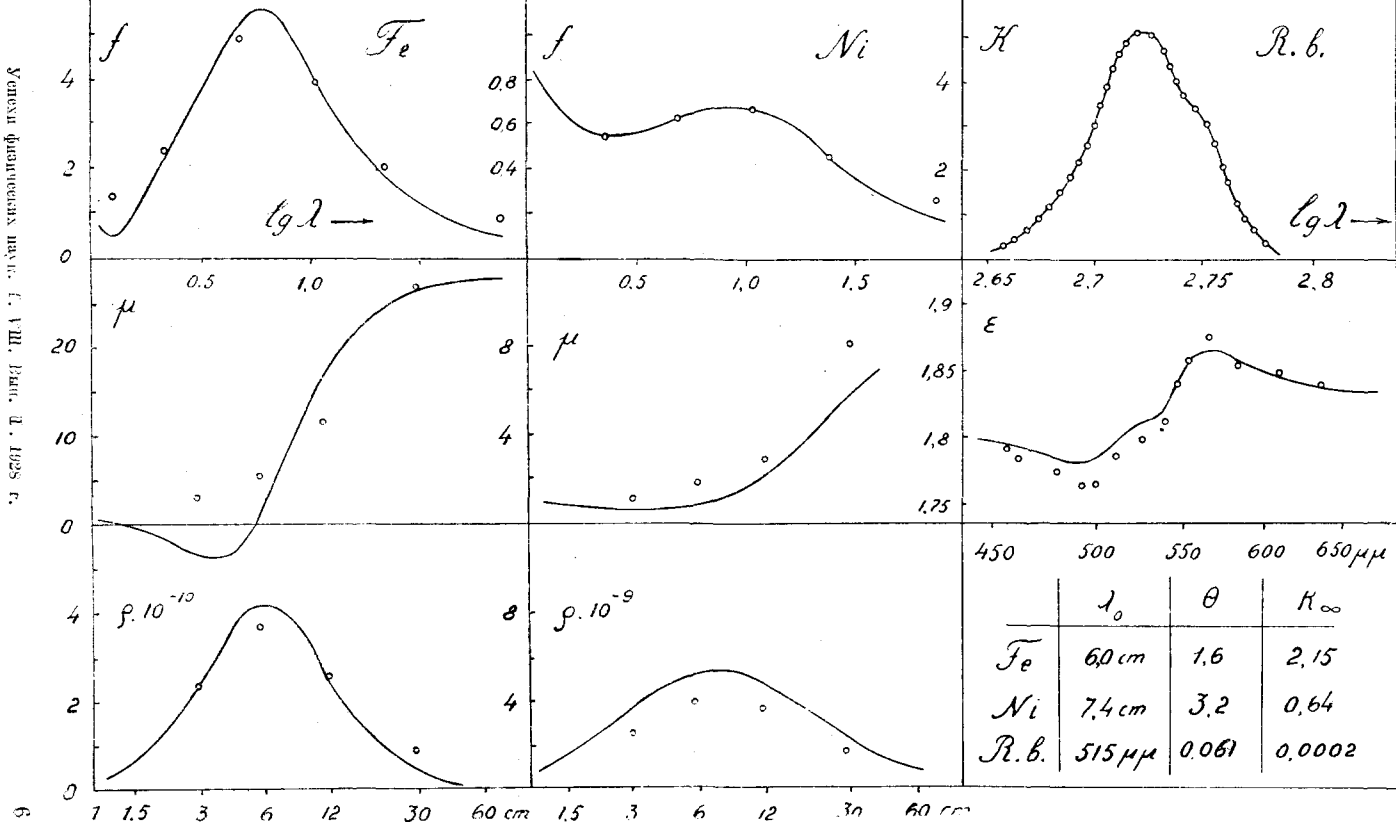


Рис. 2. Полосы поглощения и дисперсии герцевых волн в железе и никеле (магнитные спектры) и световых волн — в краске „роз бенгаль“ (электрические спектры).

Различие μ_k и μ_n по нашей теории электромагнитного поля заключается в следующем:

$$\mu_k = \sqrt{\mu^2 + \rho'^2} + \rho' \quad (4)$$

$$\mu_n = \sqrt{\mu^2 + \rho'^2} - \rho' \quad (5)$$

Эти формулы прежде всего объясняют, почему проницаемость, найденная при отражении от проволок, меньше, чем таковая, полученная при поглощении волн в проволоках. Из (4) и (5) легко найти, что:

$$\mu = \sqrt{\mu_k \mu_n} \text{ и } \rho = \frac{\mu_k - \mu_n}{4T}.$$

Вычисления, выполненные мной в 1926 г., используя значения μ_n , полученные из опытов с решетками, и старые значения μ_k , дают экспериментальные значения μ и ρ , которые, как видно на рис. 2, хорошо согласуются с теоретическими, представленными в виде кривых. Точки, представляющие опытные значения ρ , в случае железа и в случае никеля лежат вблизи кривых и хорошо вырисовывают максимум ρ . Кривые μ вследствие небольшого числа экспериментальных точек выявляются не во всех деталях; точки, однако, хорошо следуют за извивами теоретических кривых.

В области оптики, где теория дисперсии родилась и выросла, где она имеет все права гражданства и где экспериментальная методика значительно проще и совершеннее, и там сопоставление теоретических и экспериментальных чисел и теперь еще не приводит к полному совпадению. Для примера я привожу одну кривую из лучшего исследования в этой области, принадлежащего фан дер Платьсу.

Кривая K на рис. 2 представляет собой коэффициент поглощения света в 10% растворе краски роз бенгаль. На основании анализа этой кривой были получены характеризующие это вещество параметры λ_0 , θ и k_{∞} ; при помощи формулы, аналогичной (2), были получены значения ϵ . Теоретическая кривая ϵ заметно уклоняется от экспериментальных точек. Однако и в случае магнитной и в случае электрической дисперсии точки близко лежат к кривым,

обнаруживая тем самым удовлетворительное согласие опыта с предсказаниями теории. В области оптики согласие бывает еще лучше при более слабых растворах краски. В области магнитных явлений заметное расхождение обусловлено прежде всего недостаточной точностью вычисления μ_n из наблюдения отражения волн от проволок; кроме того, здесь не учтено влияние других полос абсорбции, особенно лежащих около $\lambda = 100$ см. Несмотря на это, экспериментальные точки во всех случаях следуют за извилами теоретических кривых. Это можно рассматривать как доказательство близости к действительности лежащего в основе теории дисперсии предположения о резонансе структурных элементов вещества, в частности о резонансе элементарных магнитов.

3. НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СПЕКТРОВ.

Магнитные спектры в области наиболее коротких герцевых волн, от 20 до 1 см длины, были исследованы в 1911 г.; до сих пор еще эта работа остается единственной, что объясняется трудностью получения коротких волн. Для исследования магнитных спектров в области еще более коротких, ультрагерцевых волн, смежных с тепловыми, будет полезен недавно открытый массовый излучатель, испускающий непрерывный спектр волн до десятых долей мм. В 1921 г. Гансу и Лоярте удалось проследить спектр никеля от волн 100 см до 20 см длины; около 24 см они обнаружили максимум, подобный полученному нами в 1911 г. В интерпретации его они следуют всецело нашей теории и вычисляют из него по нашим формулам введенные нами параметры θ , λ_0 и k_{∞} . За последние 3 года появился за границей ряд работ в этой области: Израэль, Гюттона и Миюль, Уэйта, Буша и Соколова; два исследования, Митяева и Малова, выполнены у нас.

Наибольшей тщательностью отличаются немецкие работы—Израэль и Буша и Соколова. В работе Израэль был исследован спектр никелевых проволок в 0,6 и 1,16 мм диаметром. При помощи вибратора Ми были получены

электрические волны от 30 до 200 см длины. Производилось определение спектра μ_k по сопротивлению проволок, вычисленному из декремента затухания проволочного прямоугольника, резонирующего на вибратор¹⁾. На параллельные проволоки прямоугольника, натянутые на расстоянии 10 мм друг от друга, могла надвигаться намагничивавшая их ка-

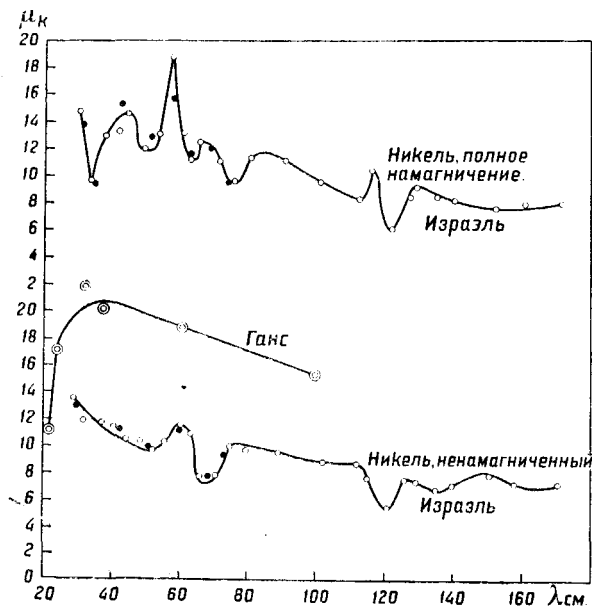


Рис. 3. Магнитные спектры никелевых проволок по Гансу и по Израэль (от 20 до 175 см).

тушка длиной 120 см, дававшая поле до 600 гаусс. На рис. 3 представлены спектры никелевой проволоки 0,6 мм диаметром; нижняя кривая относится к ненамагниченной проволоке, верхняя — к сохраняющей остаточное намагничение; черные точки относятся к повторным наблюдениям после возвращения проволоки к начальному состоянию после намагничивания или размагничивания. Кривые Израэль и Ганса в общем указывают на падение μ от волн 30 см до волн

¹⁾ О методах магнитной спектроскопии см. XVII гл., II части, дополнительного тома курса физики О. Д. Хвольсона.

на 204 см. Кривая Ганса вследствие недостаточного числа точек не дает тех деталей, которые видны на кривых Израэля.

Израэль целиком принимает нашу теорию и самый факт существования магнитных спектров¹⁾. Он подтверждает многие из московских наблюдений, как, например, то, что магнитные спектры зависят от диаметра проволоки, и что толстые проволоки дают более сложные спектры, чем тонкие.

На V Съезде физиков, состоявшемся в Москве в декабре 1926 г., Г. Буш (Иена) сделал доклад „Магнитная

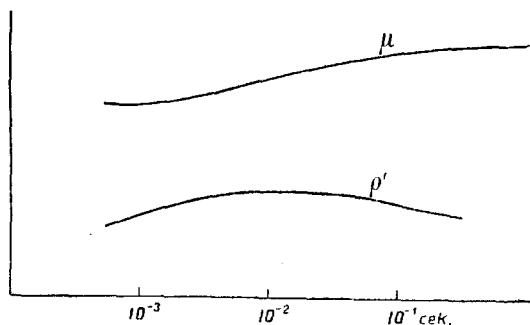


Рис. 3а. Спектр мягкого железа в малых частотах и слабых полях.

спектроскопия высокой разрешающей силы“. Буш говорит²⁾: „Если мы спросим себя, в каком направлении должно прежде всего развиваться исследование этой области, то,

¹⁾ Зависимость магнитных свойств от периода поля в технических частотах известна каждому электротехнику. В Московской магнитной лаборатории поставлено на очередь исследование магнитных спектров в области малых технических частот. На основании данных, которые можно найти в литературе (преимущественно исследование М. Вина, 1898 г.), можно составить приблизительное представление о характере магнитного спектра в области периодов в сотые и тысячные доли секунды, — см. рис. 3а. В мягких сортах железа подобную же полосу можно встретить у периода в 60 секунд. Кроме того еще никто не проверил факта, являющегося исходным пунктом при создании учения о магнитных спектрах, именно того, что в световых и тепловых волнах сталь и никель немагнитны, а в герцевых волнах и технических частотах они сильно магнитны: где-то должен быть переход от одних свойств к другим и там, где он есть (около сантиметровых волн), есть несомненная полоса магнитной дисперсии.

²⁾ Цитирую по переводу с рукописи, выполненному Н. А. Никитиным и печатающемуся в Ж. Р. Ф. О., т. 60, вып. I.

полагаю, мое мнение совпадает с мнением проф. В. К. Аркадьева, что ближайшая, нужнейшая и важнейшая задача заключается в основательном изучении этой новой области во всех направлениях, т. е. нужно исследовать зависимость магнитных спектров от всех влияющих на них обстоятельств: от химического состояния, кристаллической структуры, физических факторов (например, температуры, натяжения, степени намагничивания), геометрической формы — диаметра проводов и т. д.

„К задачам этим отчасти уже приступлено в лаборатории В. К. Аркадьева. При этом от методов измерения требуется не столько точность, сколько быстрота определений, ввиду чего методы, выработанные Аркадьевым и его учениками, равно как Гансом и Лойярте, оказываются здесь очень удобными; достаточную точность этих методов, по крайней мере для того, чтобы в основных чертах установить явление, — доказывает хорошее согласие результатов, полученных совершенно различными методами.

„Следующей за этой важной задачей мне представляется повышение точности измерений, чтобы исследовать более тонко структуру магнитных спектров. Совершенно такое же распределение работы мы наблюдаем в оптической спектроскопии: часть ее задач, именно нахождение спектральных линий, требует спектрографа или спектроскопа с незначительной степенью точности (призма или маленькая решотка), с которыми можно быстро и удобно работать.

„Наоборот, для изучения тонкой структуры спектральных линий нужны сложные методы интерференционной спектроскопии: майкельсоновская ступенчатая решотка, пластинка Луммера-Герке, пластинки Фабри и Перо, обладающие большою разрешающей силой, т. е. большою точностью¹⁾.

¹⁾ Понятия „разрешающая сила“ и „точность измерений“ не вполне покрывают одно другое, так как разрешающая сила, строго говоря, касается измерений длин волн, в то время как повышение точности, главным образом, касается измерения интенсивностей. Обратно, в оптической спектроскопии введение регистрирующего фотометра Коха, только вследствие повышения точности измерения силы света, повысило в 10 раз пределы разрешающей способности. Это показывает, что оба понятия очень тесно связаны и замена одного другим оправдывается.

Представив себе, сколь большая часть успехов современной спектроскопии возникла из второй названной выше области работ, придем к заключению, что и в магнитной спектроскопии следует ожидать более глубокого изучения явлений в результате повышения разрешающей силы установок.

Первым шагом в этом направлении можно считать мои опыты и работу моего ученика Вуккеля, направленные к уточнению метода Аркадьева — измерения волн в проволоках⁴.

После этого Буш излагает метод измерения сопротивления проволок высокочастотному току, разработанный Вуккелем и усовершенствованный другим его учеником Л. Соколовым; последний применил его к исследованию спектра железной проволоки. Работа Соколова была потом напечатана в *Annalen der Physik*. На рис. 4 представлены кривые, им полученные. Буш говорит о них следующее: „Измеренные значения k и μ_k представлены на рис. 4, который изображает результаты измерений, выполненных Соко-

ловым над проволоками чистого электролитического железа (от Гереуса, Ганау), диаметром 0,50 мм, в пределах длин волн от 3,21 до 10,9 м; k есть измеренный коэффициент абсорбции, μ_k — определяемая отсюда обычным путем магнитная проницаемость, μ_n — соответствующая проницаемость из самоиндукции, которую, по Аркадьеву, находят по разнице длин волн в железных и медных проводах. В согласии с теорией Аркадьева μ_n всегда меньше μ_k кроме точки $\lambda = 4,71$ м, $\mu_n = 82$, чему, впрочем, вследствие небольшой точности измерения μ_n , не приходится придавать значения.

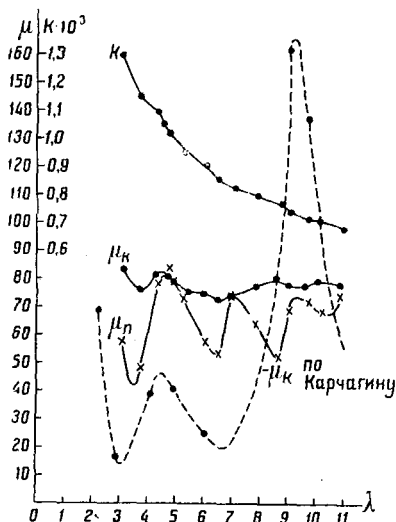


Рис. 4. Магнитные спектры железных проволок по Бушу и Соколову (от 3 до 11 м) и по Карчагину.

„Для сравнения начерчена кривая для μ_k , полученная Карчагиным в той же области волн. Как видно, она значительно отклоняется от кривой, найденной Соколовым. Различие могло бы быть объяснено различием материала проволоки: электролитическое неотожженное железо у Соколова, шведское кованое отожженное у Карчагина. Гораздо больше значения я придаю тому, что максимумы μ_k , наблюдаемые Карчагиным, выступают также и у нас, хотя слабо, но все же несомненно; это значит, что на месте полос, наблюдавшихся Карчагиным, имеется аномалия даже у самого чистого железа.

„Как эти полосы располагаются в отдельности и как они зависят в частности от химического состава проволоки, ее предыдущей термической обработки, кристаллического строения и т. д., могут выяснить только дальнейшие измерения.

„То, что описанный метод дал уже результаты — еще очень немного; в большей части своей „Магнитная спектроскопия повышенной разрешающей силы“ еще является программой. Но это понятно, так как существующая методика, как ясно из предыдущего, чрезвычайно затруднительна и берет много времени.

„Мы имеем все основания надеяться, что дальнейшие работы будут идти быстрее. В этом отношении электрическая спектроскопия может нам служить примером.

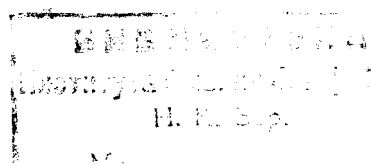
„Если мы вспомним, как до крайности хлопотливы и утомительны были первые методы интерференционной спектроскопии, какой громадный труд и время положил даже такой гениальный экспериментатор, как Майкельсон, чтобы исследовать строение только одной спектральной линии кадмия, и если мы сравним это с быстротой современных изящных методов интерференционной спектроскопии, то мы можем надеяться, что рано или поздно появятся также и точные методы магнитной спектроскопии, пользуясь которыми, мы сможем измерять не только точно, но и быстро“.

Иначе смотрит на магнитные спектры Гюттон. История этих исследований такова.

В 1924 г. его ученик Лавиль опубликовал обширную работу, в которой он проверял при помощи незатухающих колебаний теорию поглощения электрических волн в проволоках. С теоретической стороны его работа очень ценна, что же касается его вычислений, то они вызывают ряд недоумений. Для коэффициента β поглощения волн в проволоках из алюминиевой бронзы он приводит следующие значения $\beta \cdot 10^5$, полученные из опыта и вычисленные теоретически:

λ см	649,1	447,3	401,5	341,5	297,4
Опыт. Лавиль . . .	3,30	3,97	4,19	4,63	4,91
Вычисл. Лавиль . . .	3,305	3,985	4,21	4,66	4,98
Вычисл. Аркадьев .	3,48	4,24	4,41	4,79	5,11

Из таблицы видно, что вычисленные им числа сходятся с опытными до долей процента. Если же проверить его вычисления, то окажется, что по формулам Лавиля получаются значения на 1—3% больше; кроме того и самые формулы его неточны: при вычислении сопротивления проволок переменному току он берет упрощенное выражение (между тем согласно Ценнеку, следует прибавлять еще известный член 0,277). Если это сделать, то получаются числа, приведенные в последней строке таблицы, на 3,4—6,8% большие наблюдаемых. Таким образом проверка теории распространения волн в проволоках в действительности у Лавиля дает систематическое отклонение, превосходящее 5%. Лавиль исследовал также проволоки и из магнитного материала. Последние все дали исключительно постоянное значение проницаемости железа при разных волнах от 3 до 87 м: 74, 73,5, 73,6 73,5, 75 и 74. Ошибка, допущенная Лавилем при проверке теории, ставила этот результат под большое сомнение. Кроме того ошибки измерений β у него иногда составляли, как он сам говорит, 4%, что не могло обещать согласия значений проницаемости большего, чем внутри 8%. Все это заставило меня обратиться к Гюттону с письмом и выслать ему оттиски наших работ. Оказалось, что наши исследования им не были известны; постоянство



μ_k у Лавиля Гюттон объясняет тем, что Лавиль не попал в полосу дисперсии. После этого Гюттон предпринял исследование магнитных свойств железа совместно с Миюль, которое дало результаты, представленные в виде точек на рис. 5¹⁾.

Как мы видим, ими получено недостаточное число точек, чтобы вырисовались все максимумы¹⁾ кривых Никитина; однако точки, лежащие в области кривой Буша и Соколова, достаточно хорошо воспроизводят два их макси-

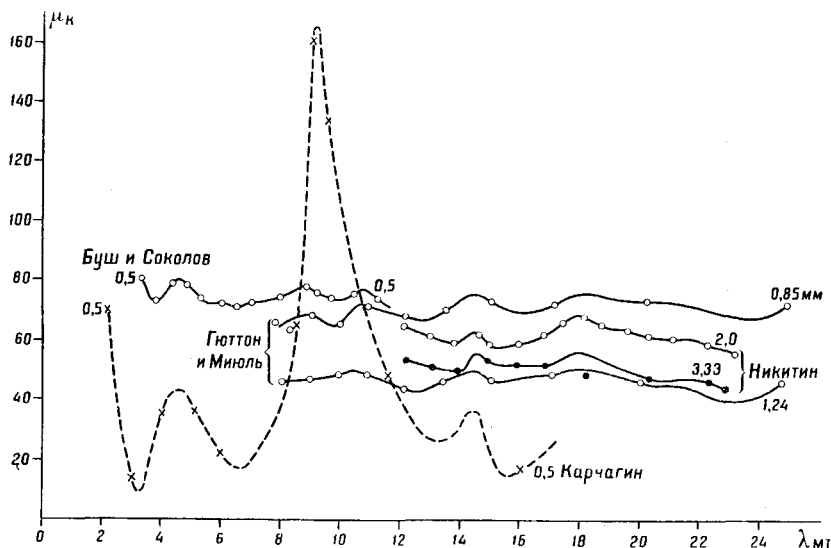


Рис. 5. Магнитные спектры железных проволок по Гюттону и Миюль, по Бушу и Соколову, по Карчагину и по Никитину.

муму и минимум. Сами Гюттон и Миюль, не зная наблюдений Буша и Соколова, объясняли колебания своих величин ошибками измерений. Когда в *Annalen der Physik* появилась статья Соколова, я сообщил о ней Гюттону и выслал чертеж рис. 5. Они повторили вновь свои измерения и, как он пишет мне в письме от 28 октября 1927 г., в исследованной им области они не могли признать реальным существование большого числа полос магнитной

¹⁾ Кривая через точки Гюттона проведена мной так, чтобы показать, что его данные не противоречат данным Никитина.

абсорбции. Малое число полос, следовательно, ими допускается. При взгляде на рис. 5 трудно все же представить себе, что оба максимума при волне в 8,8 и 10,6 μ обоих авторов случайны. Характерен еще спуск кривых в области от 11 до 12,5 μ , который наблюдается на всех шести кривых всех трех работ. Едва ли это есть результат ошибок наблюдений.

Теперь остается еще сказать о работах в области сантиметровых волн. Все исследования, сделанные в Москве, дают более или менее согласные результаты, представленные на рис. 6. На чертеже указаны имена авторов, года выполнения исследования, сила многопеременного магнитного поля и диаметр железных проволок: 0,1, 0,5 и 1,4 мм. Некоторые из спектров были получены в проволоках, намагниченных постоянным магнитным полем, достигавшим 600 гаусс у Митяева и 8000 гаусс у Малова. При этом наблюдалось только снижение кривой без заметного смещения максимумов и минимумов. Последнее находится в полном согласии с теоретическим исследованием Акулова, изучавшего вопрос о влиянии дополнительного постоянного поля на положение полос магнитной дисперсии.

Вследствие того, что обнаруженный еще в 1921 г. в Московской магнитной лаборатории своеобразный ход магнитной проницаемости в этой области волны является весьма неожиданным и парадоксальным, было обращено особое внимание на влияние ошибок наблюдения на вычисление приведенных кривых. Вследствие этого Малов измерял величину проницаемости немагнитных материалов, т. е. веществ с проницаемостью, равной 1 и заведомо постоянной. Такими материалами ему служили проволоки из нейзильбера, фосфористой бронзы и манганина. Их проницаемость при изменении длины волны оказывалась постоянной в пределах 1—4%, в то время как у железа она при этом менялась на 20—50%.

В Америке эти явления пробовал воспроизвести Уэйт, пришедший при оценке своих результатов к заключению об отсутствии аномалии проницаемости вблизи волны в 100 μ ; его кривая, представляющая кажущуюся проницаемость μ

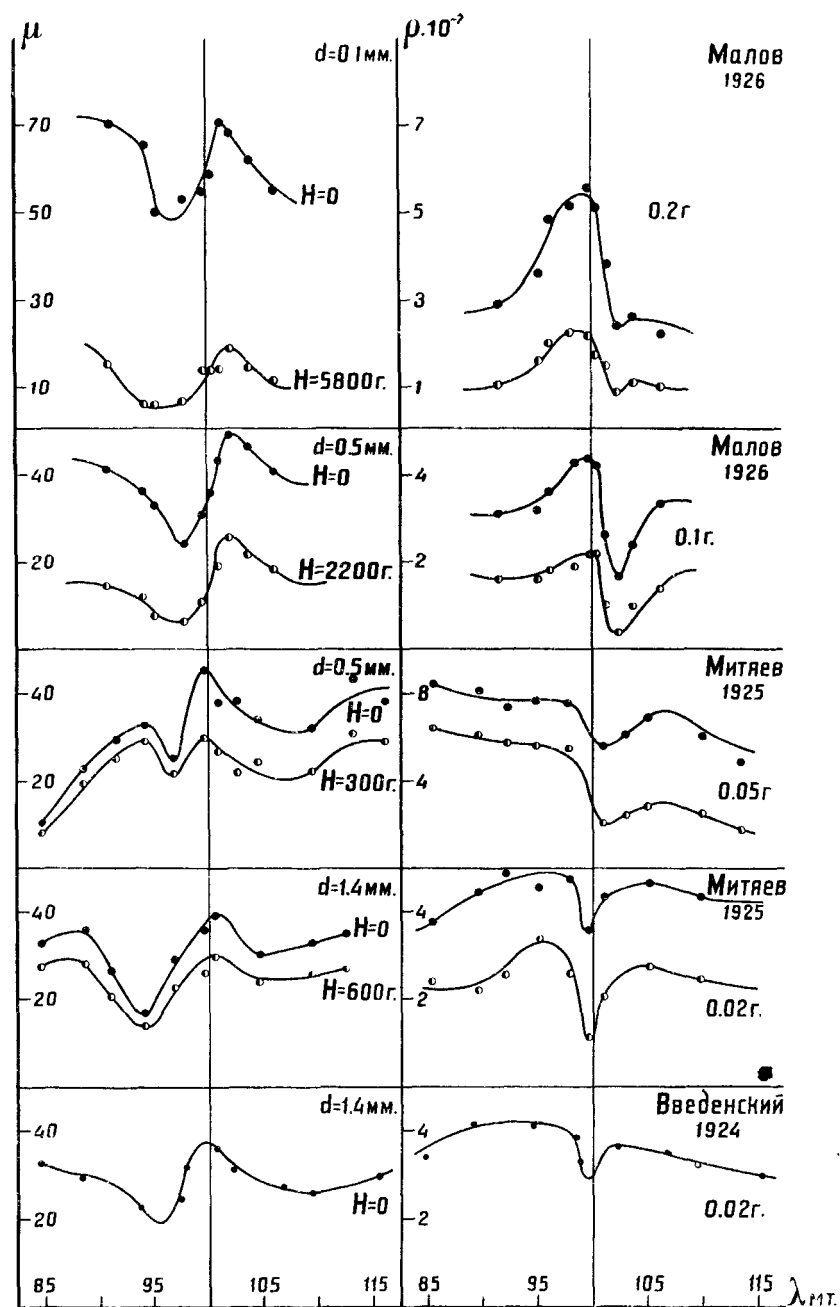


Рис. 6. Полоса в магнитном спектре железа около волны в 100 метров по Введенскому, Митяеву и Малову.

железных проволок, определяемую по увеличению самоиндукции катушки, в которую их вносят, дана на фиг. 7.

Работа Уэйта была выполнена в Отделе земного магнетизма института Карнеги в Вашингтоне. Это исследование вызывает еще больше недоумений, чем работа Лавиля и заключения Гюттона.

Прежде всего нельзя не выразить удивления по поводу ряда неточностей и ошибок в ссылках на работу Введенского и Теодорчика, которая является в статье Уэйта предметом критики.

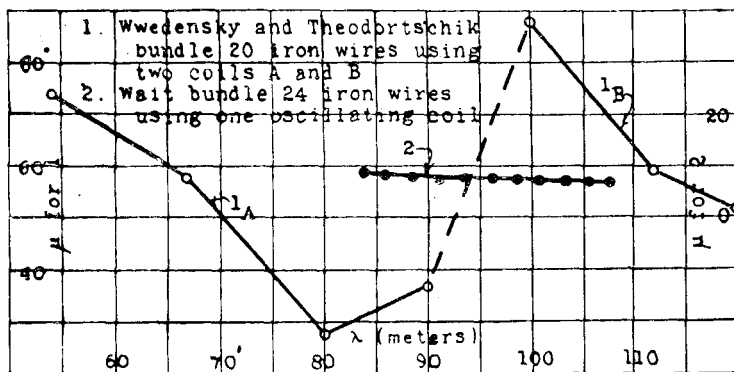


Рис. 7. Полоса Введенского и Теодорчика в интерпретации Уэйта.

Кривые проницаемости Введенского и Теодорчика, представленные на рис. 4 их статьи в *Annalen der Physik*, воспроизведены здесь на рис. 8. Различным способом обозначенные точки получены при помощи разных катушек А, В, С и D, вводившихся в колебательный контур. Ясно видно, что точки, соответствующие разным катушкам, чередуясь, лежат на общей плавной кривой и что, следовательно, от перемены катушек в приборе результат измерений не меняется.

После того как была тщательно проверена точность метода, были исследованы проволоки и другой толщины; для них было достаточно получить точки лишь в наиболее характерных местах кривых; наименьшее число точек пало на проволоки в 82 и 97 микронов; последнюю кривую Уэйт избирает объектом своих возражений.

1. Уэйт объясняет максимум, полученный Введенским и Теодорчиком, тем, что последние после волны в 90 м (см. диаграмму Уэйта. фиг. 7) переходят на другую катушку. Мы видели, что Введенский и Теодорчик на ряде

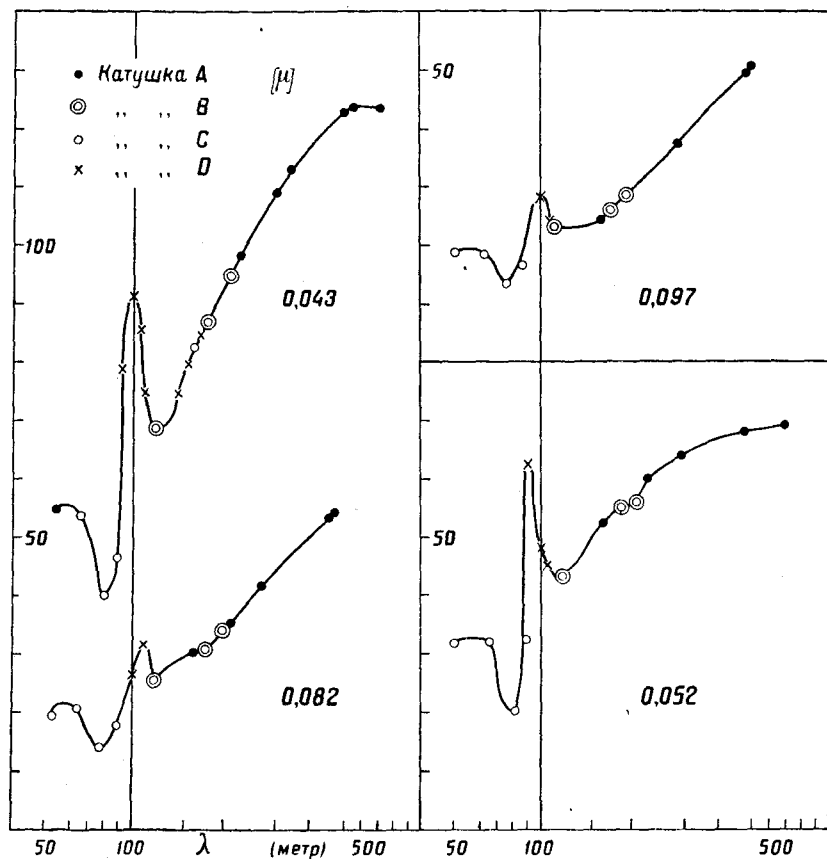


Рис. 8. Полоса около 100 м для разных проволок по Введенскому и Теодорчику.

кривых показали, что перемена катушки не влияет на результат.

2. Уэйт приводит в пример свою кривую, которая якобы «режет» максимум Введенского и Теодорчика. Достаточно, однако, обратить внимание на то, что она искусственно приподнята над осью абсцисс и представляет притом совсем другую величину, именно кажущуюся проницаемость μ ,

не исправленную на токи Фуко. На правильно сделанном чертеже она должна бы лежать значительно ниже кривой Введенского и Теодорчика.

3. На рис. 9. представлена та же кривая Уэйт, только исправленная мною на токи Фуко. Мы видим, что в действительности проницаемость Уэйт систематически падает в сторону длинных волн: при изменении от 84 до 114 м μ падает от 32,5 до 12,9 и притом не по плавной кривой, а образуя заметную ступень. Падение проницаемости на 60%

не может быть рассматриваемо, как отсутствие аномалии; вероятнее, однако, что здесь сказываются недостатки установки Уэйт, недопустимые, конечно, в работе, которая должна быть выполнена образцово, раз ее ставят с целью проверки других работ. Аномалия, найденная Введенским и Теодорчиком, имеет совсем другой характер и резко себя проявляет только в очень слабых полях, порядка сотых и десятых долей гаусса (см. рис. 6); у Уэйт же поле в этих опытах составляло „всегда меньше чем 20 гаусс“.

Интересно однако, что в других опытах Уэйт, где поле составляло 0,05—0,6 гаусса в случае исследования порошков, а в случае исследования тонких железных проволок (около 20 м диаметром) все-таки 0,6 гаусса, изменения проницаемости наблюдались; однако Уэйт приписал их особенностям установки и в последующих опытах он подавил их (намечавшиеся спектры?) каким-то усовершенствованием приборов (может быть усилением поля?) Однако подробного описания и результатов этих опытов Уэйт не приводит в своей статье.

4. Уэйт приводит кривую Введенского и Теодорчика с указанием, что она относится к пучку в 20 проволок, рис. 7. В действительности, как то следует из табл. IV статьи

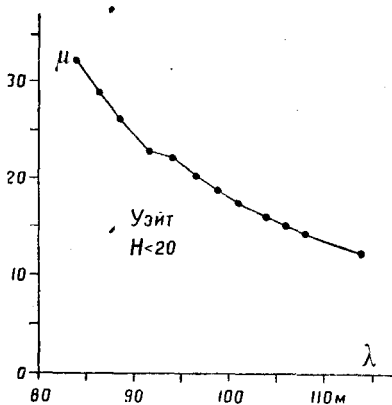


Рис. 9. Спектр, в действительности полученный Уэйт о м.

Введенского и Теодорчика, их кривая относится к 4 проволокам, натянутым на стеклянной трубке. Это, как и другие недосмотры, указывает на недостаточное внимание Уэйта к критикуемой им работе ¹⁾).

5. Уэйт говорит, что и у них наблюдались максимумы и минимумы на спектральных кривых, однако они зависели от способа соединения приборов и переходили один в другой при изменении длины проволок, соединявших отдельные конденсаторы емкости колебательной системы. В Москве это проверялось Маловым, который пришел к отрицательному заключению о влиянии на спектр соединительных проводов в его приборах.

6. Уэйт не затрагивает того факта, что Введенский и Теодорчик проверяли найденную ими аномалию около 100 м еще тремя другими методами и нашли во всех случаях согласные результаты.

7. Уэйт не объясняет также того обстоятельства, что сталь в опытах Введенского и Теодорчика дает свой спектр, отличный от спектра железа и никеля.

Опыты, произведенные в 1921 г. Введенским и Теодорчиком, а в 1927 г. Маловым, указывают на большое влияние силы многопеременного поля на резкость спектральных полос в этой области: чем больше сила магнитного поля, тем более размыты полосы; при силе поля в 10 гаусс Введенский и Теодорчик наблюдали только слабый признак полосы (см. их фиг. 7 в *Annalen d. Physik*).

Возможно, что при силе поля до 20 гаусс, которое было у Уэйта, и при том сорте железа, с которым он имел дело, от спектральных полос и должен остаться тот слабый след, который мы находим на его исправленной кривой, представленной на рис. 9.

¹⁾ Недавно в *Physical Review* появился второй реферат о работе Уэйта и др., опять-таки не лишенный недоразумений, посланную мной директору Института земного магнетизма д-ру Бауэру проволоку в 0,5 мм они приписывают Введенскому и Теодорчику называя ее „образец Введенского и Теодорчика“, между тем как последними описано исследование проволок от 0,043 до 0,097 мм диаметром.

Несомненно, что химический состав, обработка и температура железа не могут остаться без влияния на получаемые спектры; опыты, произведенные Акуловым, показывают, что натяжение железной проволоки влияет на ее сопротивление многопеременному току. Вследствие кропотливости методов получения магнитных спектров влияние этих факторов еще не исследовано.

Нужно заметить, что и электрические спектры в герцевых волнах поддаются исследованию с большим трудом. Эта область существует в течение 30 лет, а рациональная методика получения спектров в герцевых волнах только теперь начинает выясняться благодаря работам школы проф. Ми во Фрейбурге. Один из его учеников, Франкенбергер, так начинает свою диссертацию 1927 г.: „Работы Колли, Рукопа и Вейхмана, которые до сих пор были сделаны по вопросу об абсорбции и дисперсии дециметровых электрических волн в воде, дали сильно отличающиеся друг от друга результаты. Настоящая работа имеет целью внести окончательную ясность в небольшую часть спектра воды, именно между волнами от 52 до 58 см длины, где Вейхман нашел резкую полосу аномальной дисперсии“.

Действительно, в 1921 г. Вейхман первый получил в воде характерные полосы электрической дисперсии и абсорбции, лежащие между волнами от 29 до 56 см. Прошло 6 лет и Франкенбергер в той же лаборатории Ми выяснил, что в совершенно чистой воде полосы у 55 см нет, но при прибавлении к дистиллированной воде миллионных долей кремнекислого натрия полоса появляется вновь; это значило, что у Вейхмана она была обусловлена растворенным в воде веществом стеклянного сосуда, в котором производился опыт. Точные измерения показали, что эта полоса состоит из трех элементарных полос, обусловленных центрами со следующими собственными волнами λ_0 : 54,49, 55,55 и 53,29 см. С этой точки зрения легко объяснить, почему при исследовании проволоки из химически чистого железа у Соколова не получились те резкие полосы, которые наблюдались Карчагиным: в железе Соколова и Гютона, может быть, не было тех составных частей, кото-

рые были в проволоке Карчагина. Как резко меняется спектр смеси алкоголя с водой при малейшем изменении концентрации — показал еще в 1907 г. Колли; его ученик Иванов в 1915 г. обнаружил резкую зависимость спектра воды от температуры: при повышении ее до 50° совершенно исчезает ряд полос, лежащих между волнами от 60 до 124 см длины.

Так сильно зависит электрический спектр жидкостей от разных условий. Но жидкости — наиболее определенные в физическом отношении тела; недаром за единицу сопротивления берется известной длины столб ртути, вода служит мерой удельного веса и теплоемкости, бензол — диэлектрического коэффициента. Твердые тела не употребляются как мерило тех или иных физических свойств потому, что свойства их, даже в кристаллическом состоянии, весьма непостоянны. Они с трудом поддаются химической очистке и всегда, в зависимости от обработки, могут иметь ту или иную плотность, электропроводность, диэлектрический коэффициент, показатель преломления и т. д. Что касается ферромагнитных веществ, то последние особенно чутки ко всяким вариациям тепловой и механической обработки, к предыдущей магнитной истории данного образца, к его механическим вибрациям и натяжениям, не говоря уже о зависимости от химического состава. Меняя последний, мы можем получить материал с проницаемостью в постоянном поле от десятков тысяч до сотен единиц и с задерживающей силой от сотых долей гаусса до сотен гаусс и т. д. Нетрудно понять поэтому, что магнитные спектры, получаемые в твердом железе, стали или никеле, не могут не различаться друг от друга; как показывают московские и немецкие работы, в некоторых областях волн они сильно меняются еще в зависимости от диаметра проволоки. Это все должно объяснить те кажущиеся противоречия, которые наблюдаются в результатах работ разных авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Подводя итог сказанному, приходим к заключению, что магнитные спектры на всем громадном протяжении шкалы электромагнитных волн еще недостаточно изучены. По самой

сущности дела они должны зависеть от множества параметров и теперь перед нами возникает задача установления нормального вида магнитных спектров вместе с детальным выяснением влияния на них всех тех условий, в которых может находиться твердое тело. Пока в этом направлении сделано очень немного; московские исследования являются первыми, за границей к этим задачам только приступают, и вся работа в этой области носит больше рекогносцировочный характер. В стремлении охватить поведение ферромагнитных веществ в возможно более широком интервале волн, железо начали исследовать на таком широком протяжении шкалы, на каком в старой электрической спектроскопии не изучено еще ни одно вещество.

Иногда приходится слышать мнение, что наблюдения Миюль и Уэйта опровергли существование полос в магнитных спектрах и результаты связанных с ними работ по электромагнетизму вообще. По этому поводу можно сказать следующее:

1. Приведение к симметричной форме уравнений Максвелла введением магнитной проводимости, оправдываемой требованиями реального опыта, ни в какой мере не зависит от существования полос в магнитных спектрах. Поэтому базирующиеся на пополненных сравнениях Максвелла московские работы Введенского, Шиллерова и Ермолаева, так же как немецкие исследования Трукса, Уллера и диссертация Миттельштрасса, ни в какой мере аннулированы быть не могут.

2. Разработка общей теории магнитных спектров и общей теории магнитной дисперсии и абсорбции, основанной на гипотезе упруговязкого движения магнитных центров, выполненная в Москве, не может быть лишена своего принципиального значения; она имеет настолько общий характер, что не зависит от того, в каких частях электромагнитной шкалы волн есть полосы магнитной дисперсии и где их нет.

3. Мы видели, что достаточно прочно установлено существование полос в магнитных спектрах в периодах около минуты и сотых секунды (рис. 3а) и около миллиардных

долей секунды (рис. 2). Они не могут не существовать и в области перехода от герцевых к тепловым волнам, где наверняка исчезают магнитные свойства.

Поэтому теория новой дисперсии и абсорбции не может быть лишена не только принципиального, но и практического значения.

ЛИТЕРАТУРА.

(Продолжение, начало см. т. IV, стр. 263, 1924.)

26. В. Аркадьев. О расчете железных проводов для переменного тока. Тр. ГЭИ. № 15, стр. 70, 1926.

27. K. A. Mittelstrass. Untersuchungen über die Hautwirkung in Eisenleitern. Arch. f. Elektrot. 18, 595, № 6, 1927.

28. Б. Введенский Я. Расчет поверхностного эффекта в ферромагнитных цилиндрах с магнитной проводимостью. Труды ГЭИ. № 6, стр. 39, 1925. № 15, стр. 14, 1926.

29. Б. Введенский и Б. Шиллеров. Таблицы и кривые для расчета поверхностного эффекта в ферромагнитных цилиндрах с магнитной проводимостью. Труды ГЭИ. № 15, стр. 23, 1926. Ж. Р. Ф. О. 58, 241, 1926. Zs. f. Phys. 34, 309, 1925.

30. В. Аркадьев. О решетках Герца. Труды ГЭИ. № 15, 1926. Ann. d. Phys. 75, 426, 1924.

31. В. Аркадьев. Отражение электромагнитных волн от магнитной среды. Ж. Р. Ф. О. 58, 148, 1926. ZS. f. Phys. 38, 903, 1926.

32. В. Аркадьев. Огражение электрических волн от ферромагнитных решеток Герца. Ж. Р. Ф. О. 58, 159, 1926. Ann. d. Phys. 81, 649, 1926.

33. В. Аркадьев. Колебания и резонанс элементарных магнитов. Доклады Ак. Наук. А. 1927, стр. 12, C. R. d. S. d. l'Ac. d. S. 183, 777, 1926.

34. Bern. J. Vander Plaats. Ann. d. Phys., 47, 42), 1915.

35. В. Аркадьев. Электромагнитная спектроскопия металлов. XVII глава дополнит. тома курса физики О. Д. Хвольсона, 1926.

36. В. Аркадьев. О магнитной дисперсии и абсорбции. Ж. Р. Ф. О. 56, 194, 1924.

37. В. Аркадьев. Об анализе спектральных кривых. Ж. Р. Ф. О. 56, 217, 1924.

38. В. Аркадьев. Магнитные спектры железных и никелевых проволок в области сантиметровых герцевых волн. Ж. Р. Ф. О. 57, 24, 1925, ZS. f. Phys., 28, 11, 1924.

39. В. Аркадьев. Задачи общей спектроскопии. (Речь на открытии IV съезда физиков в Ленинграде). Ж. Р. Ф. О. 57, 57, 1925.

40. H. Israëli. Magnetospektroskopische Untersuchungen an Nickel-drähten mit kurzen Hertzschen Wellen. ZS. f. Phys., 39, 841, 1926.

41. H. Busch. Магнитная спектроскопия повышенной разрешающей силы. Ж. Р. Ф. О. 60, № 1, 1928.

42. Leo Sokolow. Eine Präzisionsmethode zur Messung der magnetischen Permeabilität bei sehr schnellen Schwingungen. Ann. d. Phys. 83, 1136, 1927.

43. C. Gutton et J. Mihul. Sur la perméabilité du fer aux fréquences élevées. C. R. 184, 1234, 1927.

44. G. Laville. Recherches expérimentales sur la propagation des ondes électromagnétiques le long des fils. Annales d. Physique. 2, 328, 1924.

45. G. R. Wait. Magnetic permeability of iron and magnetite in high frequency alternating fields. Phys. Rev. 29, 566, 1927. См. еще Phys. Rev. 31, 330, 1928.

46. В. К. Митяев. Влияние постоянного магнитного поля на магнитные спектры. Ж. Р. Ф. О. 58, 181, 1926. ZS. f. Phys. 38, 716, 1926.

47. Н. С. Акулов. О магнитной проницаемости в случае пульсирующих магнитных полей. Ж. Р. Ф. О. 58, 577, 1926. Тр. ГЭАН. № 15, 1926.

48. Н. Н. Малов. Влияние сильных магнитных полей на магнитные спектры. V съезд русских физиков. Стр. 62. 1926.

49. Ernst Frankenberger. Die anomale Dispersion einer Silikatlösung zwischen 50 und 60 cm Wellenlänge. Ann. d. Phys. 82, 394, 1927.

50. К. Иванов. Исследование дисперсии в электрическом спектре воды. Изв. Варшавск. университета 1915. Ann. d. Phys, 65, 481, 1921.