ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В МАГНИТО-ОПТИЧЕСКОМ ЯВЛЕНИИ ФАРАДЕЯ

В. П. Русаков, Смоленск

I. Введение

В последнее время в иностранной периодической литературе, особенно американской, уделяется много места и внимания вопросу о существовании времени запаздывания в явлении Фарадея. Само явление, как известно, заключается в том, что плоскость поляризации света, проходящего через изотропные тела, испытывает вращение в сильном магнитном поле. Если магнитное поле создано соленоидом, внутри которого помещается испытуемое тело, то угол поворота

$$\alpha = VHl, \tag{1}$$

или

$$\alpha = 0{,}4\pi niV, \tag{1'}$$

где H — напряжение магнитного поля, l — длина светового пути, n — число оборотов проволоки на 1 *см* катушки, i — сила тока в амперах и V — постоянная Верде.

Ф. Эллисон [1], пытаясь объяснить некоторые результаты, наблюдавшиеся им с различными жидкостями, помещенными в магнитное поле, пришел к заключению, что между приложением магнитного поля и результирующим вращением плоскости поляризации существует хотя и небольшое, но измеримое время. Эта мысль высказывалась давно, но результаты ее проверки были отрицательны [2]. Эллисон предложил оригинальную установку [3], которая дала ему основание утверждать, что время запаздывания существует реально, что оно является характерным для каждого химического соединения и что этот эффект дает в руки исследователя чрезвычайно точный и тонкий метод анализа, пригодный для обнаружения химических соединений, когда их концентрация меньше 10^{-11} по отношению к растворителю. Краткое описание его установки имеется в моей предыдущей статье [4]. Работы Эллисона и его учеников [5] привлекли широкое внимание научных кругов, так как при подтверждении теории и результатов этих работ исследователь получал несравненный по точности и простой по выполнению

метод анализа веществ. В ряде лабораторий были поставлены опыты для проверки выводов Эллисона.

В настоящей статье преследовалась цель дать краткий обзор основных работ по этому вопросу.

II. Исследования Дж. Вебба и Д. Морея

Наиболее полный анализ установки Эллисона дали Дж. Вебб и Д. Морей[6]. Аппаратура, которую они применяли, была сходна с предыдущей и схематически представлена на рис. 1.

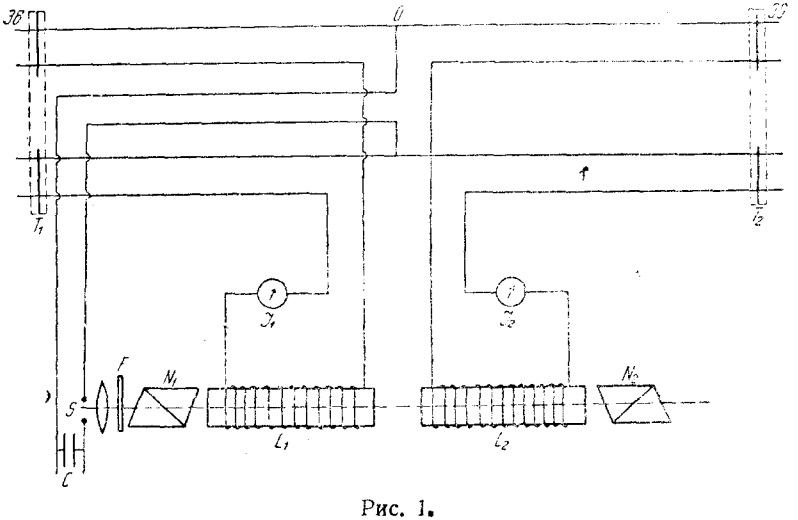

Рис. 1.

Переменный конденсатор C, который обычно выверялся до значения, близкого к 0,0005 mF, заряжался от источника высокого потенциала; таким источником служил трансформатор на 25 kV с кенотронным выпрямителем. Для образования искрового промежутка применялись магниевые электроды, расстояние между которыми поддерживалось постоянным и равным 4 *мм*. Число перерывов в секунду равнялось 60 и могло изменяться при помощи реостата, включенного в цепь первичного трансформатора; большее число перерывов делало искру неустойчивой. Катушки для создания магнитного поля L_1 и L_2 состояли каждая из 54 оборотов телеграфной проволоки 1,02 *мм* в диаметре, намотанной на стеклянные цилиндры 2,5 *см* в диаметре. Высокочастотное сопротивление каждой катушки равнялось 0,5 *ом*, и самоиндукция составляла 30 μH. Стеклянные цилиндры наполнялись испытуемыми жидкостями, закрывались прозрачными стеклами, которые прикреплялись цементом в случае органической жидкости, или пицеином, когда применялся водный раствор. Катушки соединялись с искровым промежутком и конденсатором C при помощи ряда проволок, по

которым перемещались подвижные контакты T_1 и T_2. Положение T_1 изменялось только через равные интервалы, тогда как контакт T_2 мог быть расположен в любом месте. Назначение проволочной системы и подвижных контактов сводилось к относительному изменению времени прибытия волны в катушки L_1 и L_2. J_1 и J_2—радиочастотные амперметры. Свет от искрового разряда в S проходил сквозь цветной фильтр F, который пропускал узкую полосу центрированной линии Mg $\lambda = 4481$ Å, потом сквозь николь N_1, через цилиндры с испытуемыми жидкостями L_1 и L_2 и, наконец, сквозь николь N_2, скрещенный по отношению к N_1, и попадал в глаз.

1. Основания к утверждению существования времени запаздывания. Время запаздывания в эффекте Фарадея определялось Эллисоном следующим образом. В обе трубки L_1 и L_2 наливалась одна и та же жидкость, чаще всего CS_2. При скрещенных николях липпиховского поляриметра свет обнаруживал минимум, когда подвижной контакт T_2 помещался в такой точке, что проволочный путь от искрового промежутка до L_1 и L_2 имел одну и ту же длину. В этом случае волна электрического тока прибывает в катушки L_1 и L_2 одновременно. Катушки связывались так, что магнитное поле, создаваемое током, имело противоположное направление в каждой из них; следовательно, результирующее направление было равно нулю, а поэтому свет задерживался николем N_2. Вследствие того, что расположение катушек в контуре симметрично, токи в L_1 и L_2 одинаковы. Когда подвижной контакт T_2 находился в отличном по сравнению с T_1 положении, проволочные пути были неравны, а поэтому волна прибывала в одну из катушек прежде, чем в другую. В течение того времени, когда волна доходила до второй катушки, плоскость поляризации вращалась в одной из них и не вращалась в другой. Отсюда некоторое количество света могло проходить через N_2. Если жидкости одинаковы, минимум света должен наблюдаться, когда проволочные пути до катушек одинаковы. При различных жидкостях, положим, CS_2 в трубке L_1 и NaCl в трубке L_2, минимум света наблюдался, когда подвижной контакт T_2 устанавливался в таком месте, что проволочные пути были неравны. Этим путем было найдено, что с CS_2 в одной из трубок и с рядом растворов солей в другой минимум наблюдался при положении контакта T_2, характерном для каждого соединения. Объяснение, которое дает этому явлению Эллисон, сводится к тому, что для двух различных растворов время, которое должно проходить между приложением магнитного поля и вращением плоскости поляризации, должно быть различно. Для того чтобы вращения в каждой из трубок происходили в один и тот же момент и давали минимум света, проволочные пути должны быть различными. В таком случае магнитные поля в катушках, образуемые прибывающими волнами, будут приложены в разное время.

Постоянная Верде обычно для различных жидкостей различна, а поэтому и вращения не могут полностью уравновесить друг друга

даже при равных токах. Различия в постоянной Верде не влияют, однако, на положение тех минимумов, которые наблюдал Эллисон, и оказывают влияние только на интенсивность этих минимумов.

В опытах Эллисона требовалось очень небольшое перемещение подвижного контакта T_2, чтобы наблюдать резкое изменение в интенсивности света и установить минимум. Положения минимумов при различных наблюдениях, но с одной и той же установкой, по утверждению Эллисона[7] лежали в пределах 3 *мм*.

2. Влияние волны. Рассмотрим, каким условиям должен удовлетворять ток в катушках, чтобы вызвать те резкие минимумы, которые наблюдались Эллисоном и его сотрудниками. Возрастание тока в катушках должно было быть настолько быстрым, что для прибывавшей в одну из катушек волны изменение во времени должно быть порядка $7 \cdot 10^{-11}$ сек. В самом деле, допустив, что скорость волны в контуре та же, что и скорость света, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ *см сек.*$^{-1}$, и увеличивая пределы смещения подвижного контакта, указанные Эллисоном, от 3 *мм* до 1 *см*, приходим к заключению, что относительное изменение длины контуров равно 2 *см*, а промежуток во времени составит $\frac{2}{3 \cdot 10^{10}} = 7 \cdot 10^{-11}$ сек. Этого времени должно быть более чем достаточно, чтобы вызвать необходимое изменение в токе, вызывающем заметное вращение плоскости поляризации.

Допустим, что неизбежной осцилляцией в контуре вследствие наличия сопротивления, самоиндукции и емкости можно пренебречь и что начальная волна, возникшая в момент проскакивания искры, определяет величину магнитного поля, а следовательно, и происхождение резкого минимума.

Волны должны быть чрезвычайно коротки и по своей длине сравнимы с шириной минимума, т. е. с длиной той части проволочного контура, на которую смещается подвижной контакт T_2, чтобы локализовать минимум.

Простой расчет на основании величин, характеризующих колебательный контур, показывает, что длина волн, распространяющихся в нем, должна быть порядка нескольких метров.

Далее при наших рассуждениях предполагалось, что фронт волны тока при вступлении его в катушку с самоиндукцией отвесный. Но это не совсем так: подъем его крутой, но не отвесный. Характер изменения силы тока, протекающего по линейному проводнику и встречающего самоиндукцию L или емкость C, происходит, как известно, по закону[8]

$$I_L = \frac{2E}{Z}\left(1 - e^{-\frac{Z}{L}t}\right) \tag{2}$$

и

$$I_C = \frac{2E}{Z} \cdot e^{-\frac{t}{LC}}, \tag{3}$$

где Z — полное сопротивление. Действие таких катушек, которые применялись при изучении явления Фарадея, является комбинацией

указанных выше двух случаев, так как здесь имеются индуктивное сопротивление и емкость (распределенная). Вследствие влияния емкости ток в катушке может расти только со скоростью, меньшей, чем это дается уравнением (2).

Из работ Эллисона следует, что перемещение контакта на 1 *см* или смещение вдоль волнового фронта на $7 \cdot 10^{-11}$ сек производит заметное действие на глаз. Рассмотрим, как сильно изменится ток в катушке в течение этого времени. Величины, которые имели место в установке, следующие: $E = 6\,500$ V, $Z = 790\ \Omega$, $L = 30\ \mu$H. Отсюда на основании уравнения (2) следует, что $I_L = 0{,}03$ A. Таким образом импульс тока, который будет протекать по одной из катушек без компенсирующего тока в другой катушке как результат смещения подвижного контакта T_2 от положения минимума, возрастает от нуля до наибольшего значения, равного 0,03 A.

Продолжительность импульса составляет около 10^{-10} сек. Концентрация раствора в некоторых случаях была меньше, чем 10^{-11} *г/см*^{3} при длине пути светового луча около 10 *см*. Трудно допустить, чтобы такое небольшое количество вещества могло произвести какое-либо заметное действие.

При аналитическом выводе уравнений, характеризующих колебательный контур, индуктивное сопротивление представляется сконцентрированным в одной точке. На самом деле, действие индукции не является мгновенным: ток входит в катушку на один или два витка, прежде чем скажется ее индуктивное действие. Допустим, что искровой разряд является мгновенным, что волна может проходить по цепи без уменьшения перпендикулярного волнового фронта, что не имеет места отражение в катушке, что катушка дает возможность току возрастать мгновенно и что весь ток протекает по виткам ($I_C = 0$), другими словами, предположим, что волна возрастает в катушке от нуля до возможного максимума в 20 A мгновенно. При этих, явно преувеличенных и нереальных условиях, посмотрим, какой оптический эффект должен наблюдаться в опыте.

Из предыдущего анализа следует, что если минимум света возникает вследствие существования запаздывания, то при наших предположениях ток в 20 A в течение 10^{-10} сек должен вызвать заметное вращение. Но линии Mg-искры существуют с достаточно сильной интенсивностью по крайней мере $5 \cdot 10^{-6}$ сек [9]. Число пульсаций за это время будет $\frac{5 \cdot 10^{-6}}{10^{-10}} = 5 \cdot 10^4$, а эквивалентный ток составит $\frac{20}{5 \cdot 10^4} = 4 \cdot 10^{-4}$ A. Огромное количество опытов с силой тока различной величины приводит к заключению, что для получения малейшего заметного вращения плоскости поляризации необходима сила тока в 1 A, когда в качестве источника света применялась искра Mg.

На основании проведенного анализа вывод напрашивается сам собой: волна тока не может быть причиной резкого минимума.

3. Влияние концентрации раствора. Еще из работ Верде был получен вывод, что вращение, производимое каким-либо раствором, пропорционально числу молекул растворенного вещества в 1 *см*³ раствора. Кроме того, Шенрок[10] показал, что постоянная Верде изменяется с концентрацией растворенного вещества, и дал этому явлению объяснение. Пусть V, V_1 и V_2—постоянные Верде для раствора, растворителя и растворенного вещества. Тогда

$$V = \frac{V_1 q_1}{d_1} + \frac{V_2 q_2}{d_2}, \tag{4}$$

где d_1 и d_2 — плотность растворителя и растворенного вещества, а q_1 и q_2 — их концентрации в *г/см*³.

Вращение, производимое CS_2, на основании (1) равно

$$\alpha_{CS_2} = H l V_{CS_2}.$$

Вращение, производимое NaCl, равно

$$\alpha_{NaCl} = H l \frac{V_2 q_2}{d_2}.$$

Когда подвижной контакт находится в положении минимума, результирующее вращение

$$\alpha = H l \left(V_{CS_2} - \frac{V_2 q_2}{d_2} \right). \tag{5}$$

Отсюда следует, что наименьшая интенсивность проходящего света, когда контакт T_2 находится в положении минимума, должна зависеть от относительной величины двух вращений, одно из которых определяется величиной V_{CS_2}, а другое $\frac{V_2 q_2}{d_2}$. Когда эти величины равны, изменение интенсивности будет наибольшим. Для длины волны $\lambda = 4\,481$ Å известно, что $V_{CS_2} = 0{,}0871$ и $V_{NaCl} = 0{,}056$. Так как в условиях опыта $q_2 = 0{,}3$ *г/см*³, что соответствует 25% раствору NaCl, и $d_2 = 2{,}16$, то $\frac{V_2 q_2}{d_2} = \frac{0{,}056\ 0{,}3}{2{,}16} = 0{,}0078$. Сравнивая эти две величины, мы видим, что даже при 25% растворе NaCl вращение, вызванное солью, будет составлять приблизительно 0,09 вращения, производимого CS_2.

Величина вращения пропорциональна концентрации. Согласно утверждению Эллисона концентрация достаточна, если она достигает значения $q_2 = 10^{-10}$ *г/см*³, что для NaCl составит $\frac{V_2 q_2}{d_2} = \frac{0{,}56 \cdot 10^{-10}}{2{,}16} = 0{,}26 \cdot 10^{-11}$, или приблизительно $3 \cdot 10^{-11}$ того вращения, которое производит CS_2. При наших расчетах было исключено влияние воды (растворителя), постоянная Верде для которой $V_1 = 0{,}0237$. Это влияние делает световой эффект NaCl еще меньшей дробью по отношению к сравниваемому. Приведенные рассуждения остаются в силе для любого раствора. Кроме того, концентрация

должна играть существенную роль, тогда как Эллисон[5] утверждает, что минимум не обнаруживал заметного изменения в яркости при различных степенях концентрации в пределах 10^{-11} — 10^{-12}.

4. Абсолютная величина времени запаздывания для CS_2. В своих работах Эллисон пишет[5], что время запаздывания для $TlCl_2$ короче на $27{,}65 \cdot 10^{-9}$ сек, чем для CS_2. Для хлористых соединений Sn и Re оно короче на $32{,}54 \cdot 10^{-9}$. Отсюда следует, что абсолютное значение времени запаздывания для CS_2 должно быть во всяком случае больше, чем $3{,}25 \cdot 10^{-8}$. Абрагам[11], измеряя время запаздывания для CS_2, нашел, что оно если и существует, то должно быть меньше, чем 10^{-8}. Эллисон по этому поводу замечает, что время запаздывания изменяется с длиной световой волны. Но длина волны, применяемая Абрагамом (синий свет), мало отличалась от той, которой пользовался Эллисон ($\lambda = 4\,481$ Å), а поэтому расхождение в выводах Абрагама и Эллисона этим объяснить нельзя.

5. Влияние колебательного контура. Дж. Вебб и Д. Морей, изучая явления, происходящие в описанной выше установке, нашли значительное затухание при пиках тока около 200 А, т. е. много бо́льших, чем какой-либо из начальных токов. Измерение декремента затухания показало до 30 колебаний, прежде чем ток достигал 1% максимального значения. Длина волн лежала между 500 и 110 *м* и зависела, главным образом, от емкости конденсатора, а также в небольшой степени от положения подвижного контакта. Кроме этой основной частоты, была найдена осцилляция меньшей интенсивности с длиной волны приблизительно в 70 *м*. Осцилляция последнего типа была связана с положением контактов, так как смещение контакта T_2 на 36 делений изменяло длину волны от 65 до 73 *м*, изменение же емкости конденсатора никакого влияния не оказывало. Положение контакта T_2 определяет величину общего сопротивления контура каждой из катушек, а отсюда может и должна возникать разность фаз между токами в L_1 и L_2. Обозначим изменение тока в контуре катушки L_1 через $I_0 \sin\varphi$, в контуре L_2 — через $I_0 \sin(\varphi - \alpha)$, где α — разность фаз, вызываемая смещением контакта T_2. Если через β обозначим величину, характеризующую разность времен запаздывания, то результирующее оптическое вращение должно быть пропорционально

$$I_0 \{\sin\varphi - \sin(\varphi - \alpha + \beta)\}. \tag{6}$$

Уравнение (6) получает максимум, когда $\varphi = \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$. В таком случае наибольшее оптическое вращение будет пропорционально

$$2 I_0 \sin \frac{1}{2}(\alpha - \beta), \tag{6'}$$

или при небольших углах пропорционально выражению

$$I_0 (\alpha - \beta). \tag{6''}$$

Для случая, когда в обеих трубках налита одинаковая жидкость, $\beta = 0$; следовательно, наибольшее результирующее вращение пропорционально разности фаз α, которая при постоянном положении контакта T_1 зависит от положения T_2. Экспериментальные наблюдения зависимости между положением контакта T_2 и величиной α, определяемой по резкому минимуму, даны на рис. 2. Кривые показывают плавное и постепенное возрастание, чем и подтверждается изменение интенсивности света в зависимости от перемещения контакта.

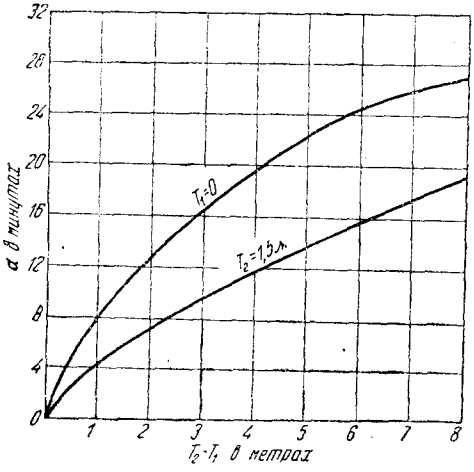

Рис. 2

Анализ результатов приводит к заключению, что если и допустить время запаздывания в явлении Фарадея, то для каждого случая возможны два минимума, один из которых образуется основным волновым током, а другой — осциллирующим. Два минимума действительно наблюдались, причем они были чрезвычайно широки и настолько медленно изменяли свою интенсивность, что не представлялось возможным их точно установить. Нередко один минимум накладывался на максимум другого тока, что делало их обнаружение еще более трудным.

6. Влияние смещения подвижного контакта на силу тока. Вследствие перемещения подвижного контакта T_2 изменяется и распределение общего сопротивления в контурах катушек, а отсюда изменяются и силы токов в каждой из них. Экспериментальные результаты относительно связи между положением T_2 (ось абсцисс) и силой тока в каждой из катушек (ось ординат) даны на рис. 3. Отсюда также следует, что положение T_2 влияет и на величину вращения плоскости поляризации, а следовательно, и на положение минимума. В самом деле, для каких-либо двух жидкостей минимум света должен находиться в такой точке, когда вращения будут равны, т. е. когда

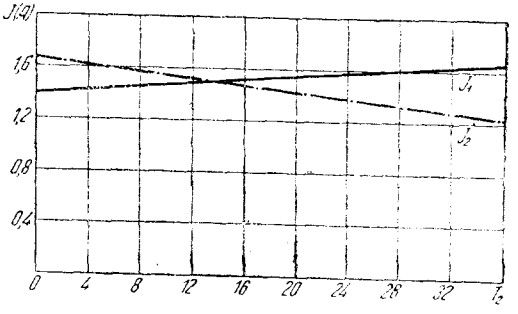

Рис. 3

$$I_1 V_1 = I_2 V_2, \tag{7}$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1}. \tag{7'}$$

Положим, что в L_1 помещен бензин, а в L_2 — сероуглерод. Так как сероуглерод имеет постоянную Верде большую, чем бензин, то чтобы сделать вращение в L_1 и L_2 одинаковыми, ток в L_2 должен быть уменьшен, что и достигается смещением T_2, т. е. дополнением сопротивления к ветви, включающей L_2. Опыты с ксилолом в трубке L_1 и с бензолом, ксилолом, толуолом, водой и др. в трубке L_2

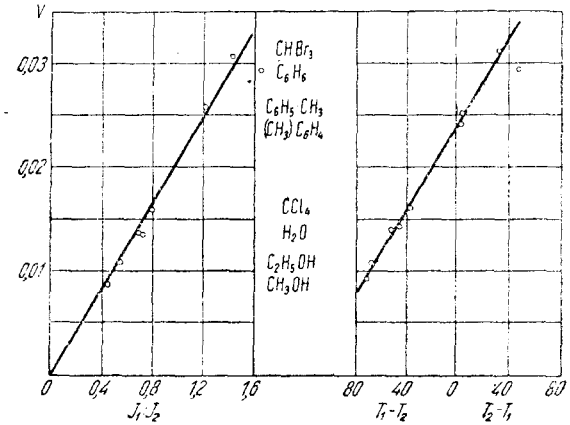

Рис. 4

подтвердили эти выводы, что можно видеть на рис. 4. Таким образом положение минимумов на шкале подвижного контакта является линейным по отношению к постоянной Верде; смещение контакта объясняется различной величиной вращения плоскости поляризации. Вводить допущение о запаздывании в эффекте Фарадея нет пока оснований. Можно с уверенностью утверждать на основании всего изложенного, что эффект Фарадея не может считаться причиной результатов, полученных Эллисоном, которые возникают от неизвестных пока причин и только при определенной аппаратуре.

III. Исследования Х. Фаруелла и Дж. Хокса

Несколько позже появилась работа Х. Фаруелла и Дж. Хокса [12], авторы которой видоизменили установку Эллисона в некоторых важных деталях и нашли ряд новых явлений, могущих вызвать изменение интенсивности света, проходящего через магнито-оптическую систему. Схема установки дана на рис. 5, где S — магниевая искра, B — линза, F — фильтр, D — диафрагма, N_1 — поляризатор для прямого луча, L_1 и L_2 — трубки для испытуемых жидкостей,

N_2 — анализатор, T — небольшая зрительная труба, M — полупрозрачное зеркало под углом в 45° к оси системы, P_1, P_2 и P_3 — прямоугольные стеклянные призмы, N_3 — поляризатор „шунтовой" части луча, параллельный N_2, N_4 — вращающийся николь, углы поворота которого служат шкалой для сравниваемых интенсивностей. Шунтовая часть луча служила для сравнения наблюдаемых полей света после прохождения его через поляризационную систему. Если интенсивность света изменялась одинаково как для прямого луча, так и для шунтового, то причина такого изменения должна была лежать вне магнитного поля катушек L_1 и L_2, а зависела от других условий, как, например, от искрового промежутка. Другое изменение состояло в том, что подвижной контакт T_2 перемещался по шкале при помощи шнура и блоков, так как было установлено, что прикосновение рук к контакту или к проволочному контуру

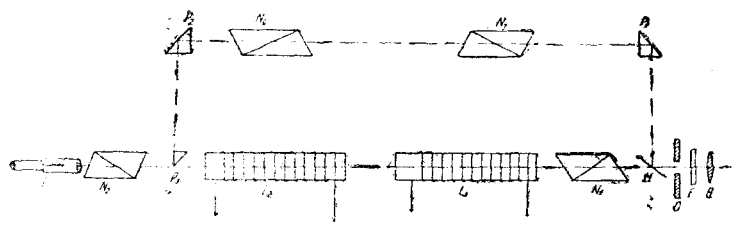

Рис. 5.

по которому последний перемещался, оставляло жирные следы, вследствие чего изменялась сила тока в катушках. Кроме того, при таком методе наблюдатель не мог установить соотношения по вращению колеса между наблюдаемым минимумом и положением контакта; следовательно отсчет был свободен от предвзятого ожидания. Наблюдения производили всегда два человека, один из которых определял минимум интенсивности в поляризационной системе, а другой вращал колесо, связанное с контактом. Наблюдатель, следивший за изменением интенсивности поля, чтобы подготовить глаз, оставался в темноте в течение 15 мин. перед началом отсчета. В остальном как установка, так и порядок опыта сходны с теми, которые применялись Эллисоном. Переходим к краткому изложению результатов трехлетней работы авторов.

После того как был установлен главный минимум с CS_2 в обеих трубках, во вторую трубку наливался раствор HCl.

Вывод, который был получен в этом случае, следующий: постоянного резкого минимума для HCl при некотором вполне определенном положении контакта T_2 не наблюдалось; минимумы носили случайный, беспорядочный характер. Положение минимума изменялось не только изо дня в день, но и от часа к часу. Наблюдение за магниевыми электродами показало, что они быстро изнашивались, причем с различной скоростью в одно и то же время. Изменения в искровом промежутке вызывали неустойчивость в про-

ходящем свете. Кроме того, иногда искра держалась в течение значительного периода в одном месте, а потом начинала смещаться в пределах искрового промежутка, что объясняется, повидимому, неоднородностью электродов.

Часть неустойчивого появления максимумов необходимо было отнести за счет нагревания трубок с жидкостью при прохождении тока по катушкам L_1 и L_2. Особенно чувствителен в этом отношении CS_2, коэфициент рефракции которого сильно изменяется в зависимости от температуры. Водяной охладитель устранил этот ряд трудностей.

Второй температурный фактор оказался связанным с испарением из отверстия, через которое наливалась жидкость в трубку. Сильное испарение из отверстия вызывало конвекцию жидкости, а отсюда и искажение пути луча.

Влияние на ход эксперимента этого фактора было устранено запаиванием трубок. Необходимо отметить, что кроме, визуальных наблюдений, производилось фотометрическое сравнение двух лучей — прямого и шунтового — и, кроме искрового источника света, применялся постоянный точечный источник.

Все полученные выводы могут быть сформулированы так:

1. Наблюдения с искровым промежутком являются ненадежными вследствие различных изменений в разряде, которые здесь имеют место.

2. На результатах наблюдений, несомненно, сказываются физиологические и психологические особенности наблюдателя.

3. Температурный эффект может в значительной степени искажать результаты наблюдений.

4. При учете всех посторонних влияний интенсивность луча, проходящего через поляризационную систему, находится в полном соответствии с вычислениями, полученными на основании постоянной Верде испытуемой жидкости, размеров и электрических свойств контура.

IV Другие исследования времени запаздывания в явлении Фарадея

1. Эффект Фарадея при высокой частоте

Г. Гарнуеллем, В. Бликнеем, Ворхисом и Дж. Купером[13] была сделана попытка наблюдать эффект Фарадея при высокой частоте тока. Для этой цели они сконструировали установку, аналогичную установке Эллисона. В качестве источника непрерывной осцилляции в контур была введена высокочастотная трубка с рядом усилителей. Источник света применялся постоянный, обычно Hg 5 461. При частоте осцилляции в 7,5 мегациклов никакого изменения в интенсивности света не наблюдалось, когда луч проходил через одну трубку с CS_2 при скрещенных николях. Когда постоянные контура были изменены так, что частота достигала 1,7 мегациклов,

прояснение поля наблюдалось при каждой трубке в отдельности. Когда же обе трубки были на своих местах, поле оставалось темным. При смещении подвижного контакта T_2 в границах до 5 *м* никакого изменения в интенсивности не наблюдалось.

2. Наблюдение витаминов

Интересное применение рассматриваемого явления было произведено Виссинком и Вудром[14]. Они также сконструировали установку Эллисона и исследовали рыбий жир, сок шпината, апельсина, томатов, раствор яичного желтка, облученный сок моркови. Эти вещества содержат витамин А. Во всех случаях наблюдался минимум света. Когда в качестве испытуемой жидкости применялись сильно облученный рыбий жир, чистый сок моркови, масло из китайских орехов и вессоновское масло, минимум не был замечен. При наблюдении рыбьего жира после продувания через него воздуха минимум был много меньше.

Так как все недостатки в установке Эллисона имели место и в данном случае, то результаты опытов должны вызвать сомнение.

3. Позднейшие исследования

а) Г. Слэк и Дж. Пиплс[15] пытались установить время запаздывания и произвести химический анализ ряда веществ, пользуясь установкой, сходной с той, которую применяли Фаруелл и Хокс[12]. Минимумы наблюдались. Но какого-либо постоянного соответствия между положением подвижного контакта и наблюдаемым минимумом установить не удалось. Изменение интенсивности как для прямого, так и для „шунтового“ луча было одинаково. Авторы считают, что существование минимума нужно приписать психологическим и физиологическим воздействиям.

б) Мак Фирсон[16] на основании большой серии наблюдений пришел к заключению, что появление минимумов носит совершенно случайный характер в таких же случайных группировках. В тех случаях, когда появлялись устойчивые минимумы, причины их всегда были связаны или с контактной системой или с колебательным контуром. Наиболее часто такой причиной были жирные или клейкие места на подвижном контакте, нанесенные рукой при его перемещении. Когда перемещение контакта производилось при помощи мотора, устойчивых минимумов совсем не было. Влияние искровых флюктуаций исключалось путем сравнения прямого и „шунтового“ луча. Кроме того, помимо визуальных наблюдений, применялся и фотографический метод[17]. Испытание глаза показало, что автор не мог обнаружить изменения интенсивности менее чем на 3%. В полном соответствии с этим отдельные серии наблюдений после вычисления средних результатов не обнаружили никаких минимумов в пределе 3%. Никаких минимумов, характерных

для различных химических веществ, реально не существует — таков краткий выход авторов.

в) М. Джеппенс и Р. Бэлл[18] применили новый способ испытания метода Эллисона. Было произведено свыше 4 тыс. отсчетов большим количеством наблюдателей, совершенно незнакомых с аппаратурой. Каждый из них следил за изменением интенсивности поля только в течение лишь небольшого промежутка времени и не знал ни того, где минимум должен был появиться, ни того, как много их (минимумов) должно быть. Второй наблюдатель контролировал перемещение контакта, а третий производил отсчет. Последний не знал, какой отсчет должен быть правильным. Нуль шкалы смещался несколько раз, чем устранялся повод „подгонять" минимум к определенному отсчету. Когда результаты были подсчитаны и нанесены на график, причем по оси абсцисс откладывалось положение контакта, при котором появлялся минимум, а по оси ординат — число отсчетов, соответствующих этому положению, то кривые показали ряд пик. Если допустить, что все положения минимума равно вероятны, а не определяются химической природой раствора, то все пики, которые имеют случайный характер, должны находиться в пределе ряда

$$np = 3\,(npq)^{\frac{1}{2}}, \tag{8}$$

где n — полное число отсчетов, p — вероятность того, что частные отсчеты будут сделаны, q — вероятность того, что они не будут сделаны. Из 1 074 отсчетов, полученных авторами с растворами HCl, $MgCl_2$, $NaCl$, $ZnCl_2$, и KCl, наблюдалось 11 минимумов из возможных 12, причем 8 из них совпадало с положением минимумов в работах Эллисона и 3 не совпадало. Одна пика, соответствующая положению контакта 21,4 шкалы Эллисона, выше, чем это можно было бы ожидать на основании теории вероятностей. Но так как главная область, в которой отсчеты производились, была известна авторам, то и результаты отсчета не могут быть вполне объективны. При той же установке было произведено 996 отсчетов 150 наблюдателями, также никогда раньше не наблюдавшими. Их результаты дали только 6 пик, причем 3 из них не совпадали с результатами Эллисона и ни одна не находилась выше, чем можно ожидать на основании теории вероятности. Кривая для 247 отсчетов, полученных тремя наблюдателями с теми же растворами, имела только 5 пик, из которых всего одна совпадала с положением, найденным Эллисоном.

Далее авторы сами произвели 140 отсчетов с укороченными катушками и получили результаты, сходные с теми, что и в первом случае, причем был отмечен тот же минимум (21,4), выходящий за пределы вероятного совпадения. Потом трубки с растворами были совсем удалены из катушек. Из 110 отсчетов, произведенных 23 наблюдателями, которые не знали об изменении условий опыта, были получены результаты, которые находились в хорошем соот-

ношении с результатами Эллисона для хлоридов. Наконец, был произведен ряд наблюдений с неправильным раствором в трубках. Отсчеты минимумов по шкале Эллисона следующие: 21,10; 21,08; 21,05; 21,38; 21,40; 21,45; 21,40; 21,75; 21,80; 21,70; 21,70; 21,95; 22,20; 22,20; 22,20; 22,45; 22,50; 22,50; 22,85; 22,85. Отсчеты производились наблюдателями из другого института, которые не знали, что растворы неправильны. Эллисоном для хлоридов даны следующие отсчеты: 21,08; 21,40; 21,73; 21,85; 22,20; 22,50; 22,87. Легко видеть, что последний ряд в пределе точности изменений совпадает с предыдущим.

Все полученные результаты могут быть кратко обобщены в виде следующих выводов: 1) минимумы существуют; 2) некоторые минимумы совпадают с данными Эллисона; 3) большинство полученных минимумов можно объяснить на основании случайных совпадений; 4) минимумы могут быть объяснены физиологическими и психологическими причинами или условиями электрического контура; 5) так как наблюдались минимумы без раствора, с неверными растворами, с укороченными катушками, причем все они находятся в хорошем согласии с опубликованными данными, то, следовательно, минимум не является функцией раствора в трубке.

4. Наблюдения с положительными результатами

а) Кроме упомянутой выше работы [14], положительные результаты проверки метода Эллисона были получены Г. Юзом и Р. Гослином [19], которые применяли в качестве анализатора вместо николя призму Волластона. Последняя помещалась так, что два поляризованные ею во взаимно-перпендикулярных плоскостях луча были расположены в горизонтальной плоскости. Поляризующий николь вращался до тех пор, пока оба луча не достигали приблизительно равной интенсивности. Вслед за призмой помещалась узкая вертикальная щель, изображение которой фокусировалось на фотографической пластинке. Снимки состояли из двух резких линий, образуемых каждым лучом в отдельности. Всякое вращение плоскости поляризации вызывало увеличение яркости одного луча и уменьшение другого. Синхронный мотор, приводящий в действие электрический переключатель, точно регулировал время выдержки, так что экспозиция для всех фотографий была одна и та же. Снимки делались поочередно; один в положении минимума, а другой вне его на 1—2 *см*. Ориентировочное положение минимума устанавливалось сначала визуально. Чтобы избежать неправильных результатов от случайных механических влияний или от могущих остаться незамеченными изменений в электрическом контуре, для каждого положения были сделаны двойные экспозиции с прямым и обратным токами в катушках. Всего получено 563 снимка, из которых 225 для воды и 338 для различных химических соединений. Интенсивность линий измерялась микрофотометром. Определялась сначала разность интенсивности двух линий, когда контакт был в положении минимума,

потом когда он был смещен и, наконец, разность между этими двумя измерениями выражалась в процентах. Результаты наблюдений для двух кислот и трех солей следующие:

Поле в катушках	Ток	Соединение		Вода		
		Число снимков	Разность в интенсивности в %	Число снимков	Среднее алгебраическое	Среднее арифметическое
усиливающее	прямой	137	+10,8	89	+0,05	1,9
усиливающее	обратный	103	— 9,95	54	—1,44	1,44
противоположное	прямой	30	— 8,0	46	—0,82	2,5
противоположное	обратный	68	+ 9,1	36	—0,11	2,7

Из рассмотрения таблицы видно, что изменения в направлении тока дали и соответствующие изменения в знаке процента независимо от того, были ли поля в катушках одного или обратного направления. Алгебраическое и арифметическое среднее для воды обнаружило случайные распределения знака. Следовательно, полученные результаты подтверждают реальность и воспроизводимость минимума. Минимум является резким потому, что разность в интенсивности установлена, а смещение подвижного контакта производилось на 1—2 *см*. Положение минимумов является характерным для каждого химического соединения.

б) Аналогичные результаты получил Т. Р. Болл [20] на основании метода „отождествления неизвестных", который заключался в следующем.

Растворы трех различных солей с концентрацией 10^{-7} он перенумеровывал и оставлял в лаборатории. Отдельные наблюдатели, которые ничего не знали ни о составе растворов ни о положении контакта, исследовали эти растворы при помощи магнито-оптического метода, причем концентрация их предварительно доводилась до 10^{-10}. Все три раствора были совершенно правильно определены и названы. Далее задача усложнялась. Были взяты растворы семи солей и кислот, причем был известен только список, но какой раствор принадлежал имеющемуся в списке химическому соединению— для наблюдателей оставалось неизвестным. Три раствора с концентрацией 10^{-7} были взяты, слиты в один, разбавлены до концентрации 10^{-10} и переданы для определения смеси. Двое наблюдателей работали поочередно, не обмениваясь результатами, и каждый из них установил три минимума, положения которых совершенно совпадали. Вероятность случайного совпадения в этом случае очень мала. Из большого ряда опытов 83,3% определения неизвестных было сделано правильно. Этод метод с успехом применялся и другими исследователями [21]. По мнению авторов отрицательные

результаты, полученные некоторыми наблюдателями при проверке установки Эллисона, объясняются сложностью этой установки и недостаточным усвоением экспериментаторами техники работы, положение же минимума является, несомненно, функцией раствора.

Из обзора литературы следует, что утверждение Эллисона о существовании времени запаздывания в явлении Фарадея пока еще мало обосновано. Минимумы света, которые наблюдались в сконструированной им установке, могут быть вызваны многими разнообразными причинами, как неустойчивость искры, осцилляции в колебательном контуре, температурные явления, несовершенства контактной системы и др. То обстоятельство, что устойчивые минимумы в большинстве случаев наблюдались Эллисоном и его сотрудниками, а также и другими лицами только в лаборатории Эллисона и при попытке их повторить в других условиях приводили к отрицательным или неопределенным результатам, заставляет предполагать, что причина их кроется в каких-то пока не выявленных особенностях его установки и только в этом. Тот большой интерес, который возбудили опыты Эллисона, объясняется утверждением последнего, что могут быть обнаружены вещества чрезвычайно слабой концентрации порядка 10^{-10} — 10^{-11}. До сих пор исследование концентрации такого порядка было доступно только радиоактивным методам. Но в отношении огромного количества элементов метод радиоактивного анализа неприменим. Если бы открытие Эллисона было подтверждено, оно положило бы начало новой эпохи в истории науки. К сожалению, есть все основания считать, что это не так, хотя, как мы видели, некоторые авторы и продолжают настаивать на реальности и применимости этого метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Allison a. W. Beams, Phys. Rev. **29**, 161, 1927.
2. Blondlot, C. R. 1882; Lodge, Phil. Mag. 1889; R. W. Wood, Phys. Optics 449, 1924.
3. F. Allison, Phys. Rev. **30**, 66, 1927; **31**, 313, 1928.
4. В. П. Русаков, Усп. физич. наук, **13**, 5, 762, 1933.
5. F. Allison a. E. Murphy, J. Am. Chem. Soc. **52**, 3796, 1930; F. Allison, Ind. and. Eng. Chem. **4**, 9, 1932; F. Allison, E. Bishop, A. Sommer a. J. Christensen, J. Am. Chem. Soc. **54**, 613, 1932; **54**, 616, 1932; F. Allison, J. Christensen a. G. Waldo, Phys. Rev. **40**, 1052, 1932; F. Allison, J. Chem. Ed. **10**, 70, 1933; Phys. Rev. **43**, 38—50, 1933.
6. J. Webb a. D. Morey, Phys Rev. **44**, 589, 1933.
7. F. Allison, J. Chem. Ed. **10**, 73, 1933.
8 Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge 396, 1929; Karapetoff, Trans. A. I. E. E. **48**, 508, 1929; Rogowski, Flegler a. Tamm, Arch. Electrotech. **18**, 4779, 1927.
9. Beams, Phys. Rev. **35**, 24, 1930.
10. Schönrock, Z. Physik **46**, 314, 1928.
11. Abraham a. Lemoine, Com. Ren. **130**, 499, 1900.

12. H. W. Farwell a. J. B. Hawkes, Phys. Rev., **47**, 78, 1935.
13. G. P. Harnwell, W. Bleakney, S. N. Van Voorhis, J. B. Kuper, Phys. Rev. **44**, 785, 1933.
14. G. M. Wissink a. J. W. Woodrow, Phys. Rev. **45**, 126, 1934.
15. F. Slack a. J. Peoples, Phys, Rev., **45**, 126, 1934
16. H. MacPherson, Phys. Rev. **47**, 254, 1935; 47. 310, 1935.
17. F. G. Slack, J. Frank. Inst. **218**, 445, 1934.
18. M. A. Jeppensen a. R M. Bell. Phys. Rev, **47**, 546, 1935.
19. G. Hughes a. R. Goslin, Phys. Rev. **47**, 317, 1935.
20. T. R. Ball, Phys. Rev. **47**, 548, 1935.
21. Mc. Ghee a. Lawrenz, J. Am. Chem. Soc. **54**, 405, 1932.