

М.А.БРАЖНИКОВ, г. Москва

Опыты Гастона Планте и его реостатическая машина

Кто внёс решающий вклад в создание специальной теории относительности?

А) Пуанкаре; Б) Минковский; В) Эйнштейн; Г) Лоренц; Д) Майкельсон.

Из тестов по физике для 11-го класса,
2006 г.

Кто более матери-истории ценен?

В.В.Маяковский, 1924 г.

Река времён в своём стремленьи

Уносит все дела людей

И топит в пропасти забвенья...

Г.Р.Державин, 1816 г.



Гастон Планте (1834–1889)

Изучение физики в школе не может обойтись без элементов истории. Как писал А.Пуанкаре, «задача учителя состоит в том, чтобы провести разум ребёнка тем путём, которым проходил ум его отцов, ускоряя определённые этапы развития, но не пропуская ни одного из них. В этом отношении история науки должна быть нашим проводником» [1]. Примеры из истории способны оживить урок, заинтересовать учащихся... Много похожих и правильных слов можно «нанизать» на эту простую мысль. Но кроме удовлетворения любопытства и развития любознательности есть ещё по крайней мере две вещи, которые существенны для воспитания и образования в целом. Благодаря истории физика становится «одушевлённой» – науку творят руки и умы людей. Но наука – труд многих. И.Ньютон, опираясь на работы Кеплера, а Э.Резерфорд указывал на роль ранних исследований сотрудников лаборатории, Э.Марсдена и Г.Гейгера, по рассеянию α -частиц в создании планетарной модели [2]. Вряд ли школьникам нужно запоминать сотни фамилий, но у них должно остаться ощущение, что много людей искренне посвятили свою жизнь познанию мира, слава же пришла к немногим.

Сейчас много говорят о «научном методе познания», с которым необходимо ознакомить

школьников. Но как это делать? Очень разные и сложные книги были написаны на эту тему (вспомним Ф.Энгельса, А.Пуанкаре, Э.Маха, В.Оствальда, И.Пригожина). На школьном уровне можно на небольших примерах из истории показывать, как продвигалось научное исследование [3].

Гастон Планте родился 22 апреля 1834 г. в Беарне (Франция). Уже в школе он выбрал физику в качестве своей специализации, а с 1855 г. его научные интересы сосредоточились в области электрических явлений. Результатом исследований 1859–1860 гг. стало изобретение свинцовых аккумуляторов. Современникам казалось, что «одного этого открытия было бы уже достаточно, чтобы прославить имя Планте и заслужить почёт и достояние» [4]. Однако самое полезное изобретение Планте лежало не на самом главном его научном направлении.

«Исследования свои Планте направил к разъяснению естественных атмосферных явлений электричества, на опытах он получал и исследовал шаровую¹ и другие формы молнии, наблюдал подобие северного сияния, получал искусственные смерчи и циклоны, воспроизводил образование града и т.п. <...> Так, 18 августа 1876 г. он записал: “Самая замечательная молния была та, которая, описав кривую линию, стремительно ударилась из-за туч в землю; она была видна в течение несколько секунд и имела вид чётков с блестящими шариками”», рис. 1 [4].



Рис. 1. Чёточная молния, наблюдавшаяся в Париже в 1876 г.

Изучение электрических явлений в атмосфере было, по сути, начато Б.Франклином в, так сказать, «природной лаборатории». Однако, чтобы тщательно их исследовать в обычной лаборатории, необходимо было располагать мощными источниками высокого напряжения в десятки и сотни киловольт. Известные в середине XIX в. источники электричества – гальванические элементы и электростатические машины – не вполне удовлетворяли этим целям. Первые, даже соединённые в батареи, давали не больше нескольких киловольт, вторые – лишь кратковременные импульсы. Высоковольтными источниками напряжения продолжительного действия, применявшимися и в первой трети XX вв., стали реостатическая машина Планте и индукционная катушка Румкорфа.

Работы Планте собраны в двух книгах, одна из которых – «Электрические явления в атмосфере»². Умер учёный 21 мая 1889 г., заканчивая книгу о природе земного магнетизма. Планте был удостоен медали им. Ампера и премии Лаказа, которую он истратил на материальную помощь бедным учёным [4].

Реостатическая машина Планте

В основу работы реостатической машины Планте положил свойства последовательного и

параллельного соединений конденсаторов. Пусть у нас есть батарея из n одинаковых конденсаторов ёмкостью C_0 каждый. Если зарядка происходит при параллельном соединении, то энергия батареи $W = nC_0U_1^2/2$. Если теперь, отключив от источника, включить конденсаторы последовательно, то эту же энергию можно выразить как $W = (C_0/n)U_2^2/2$. Здесь U_1 , U_2 – напряжение на обкладках батареи, причём U_2 в n раз больше напряжения заряжающего устройства U_1 . На рис. 2 показана реостатическая машина из двух конденсаторов. При вращении коммутационного валика из эбонита на две пары шин попеременно замыкались пружинные контакты: либо C и B (при этом конденсаторы соединялись параллельно между собой и подсоединялись к гальваническому элементу – происходила зарядка), либо C и E (последовательное соединение конденсаторов, разрядка – в этот момент между остриями разрядника проскакивала искра). Увеличить скорость вращения валика позволяла механическая передача из двух шестерёнок³. Отношение U_2/U_1 было около 2.

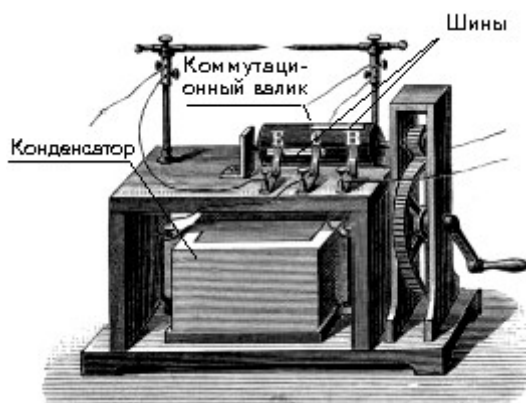


Рис. 2. Малая реостатическая машина (из двух конденсаторов, диэлектрик – эбонит) [6]

Более сложная конструкция изображена на рис. 3 [6, 7]: LL' – 32 конденсатора из слюдяных пластин, оклеенных с обеих сторон станиолем (оловянной фольгой)⁴. На коммутационном валике из эбонита смонтированы две диаметрально разнесённые металлические шины (верхняя видна на рис. 3). Под углом 90° к шинам расположен ряд металлических штифтов (по числу конденсаторов), которые могут входить в контакт с проводами от обкладок конденсатора (от одних обкладок провода подведены к валику с одной стороны, от других – с противоположной). К клеммам PP подключаются полюсы гальванической батареи. При одном положении валика его длинные шины соединяли обкладки конденсатора параллельно и подсоединяли их к гальванической батарее (зарядка), при повороте валика на 90° все конденсаторы соединялись последовательно друг с другом и с разрядником EE' . Быстрое переключение коммутатора достигалось за счёт зубчатой передачи, приводимой во вращение вручную.



Рис. 3. Реостатическая машина из тридцати двух конденсаторов

В качестве первичного источника энергии Планте использовал батарею из гальванических элементов (до 800) Бунзена. ЭДС одного Бунзен-элемента (рис. 4) оценивается как 1,734 В [8] или 1,9 В [9]. Следовательно, суммарная ЭДС такой батареи (U_1) 1400–1500 В. При 30–40 конденсаторах общей площадью 300 см² напряжение во вторичной цепи (U_2) составляло 45–48 кВ [7]. Длина искры в воздухе достигала 4 см. Удивительно, но в середине XIX в. этот опыт служил для подтверждения единой природы электричества, вырабатываемого и гальваническим элементом, и электростатической машиной (факт, который 150 лет спустя кажется очевидным). Доказательством истинности являлось известное положение, введённое в науку Ньютоном: «Одинаковые причины порождают одинаковые действия».

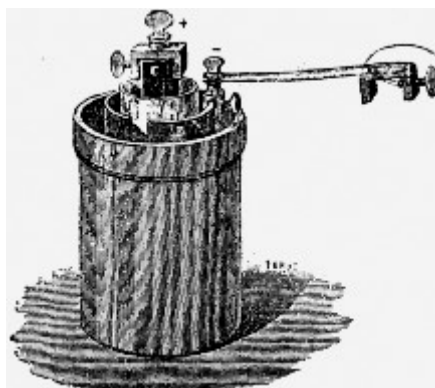


Рис. 4. Элемент Бунзена. Электрод «+» – уголь в растворе H₂SO₄, «-» – цинк в концентрированной HNO₃

Чтобы убедиться в верности расчёта напряжения U_2 , воспользуемся графиком на рис. 5. Характеристикой диэлектрической прочности является напряжение пробоя, которое зависит как от расстояния между электродами, так и от их формы⁵. Если разрядник, как и в машине Планте выполнен в виде острия, напряжение пробоя должно быть больше 41 кВ.

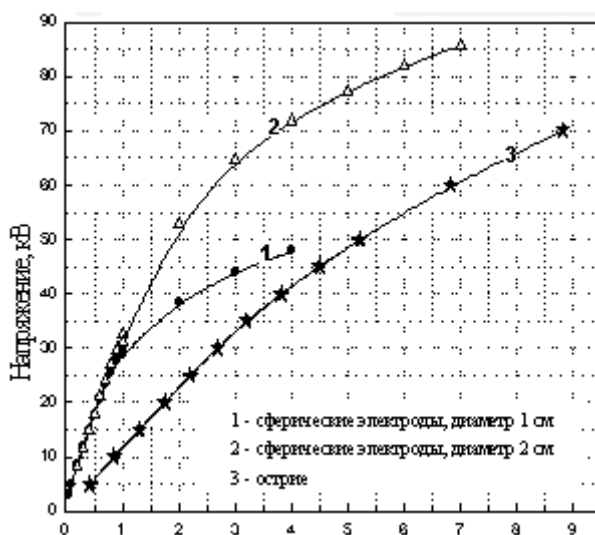


Рис. 5. Зависимость напряжения пробоя в воздухе от расстояния между электродами различной формы [9, 10]

При разряде напряжение на конденсаторе не остаётся постоянным. П.А.Флоренский⁶ приводит, с учётом этого фактора, следующую формулу для расчёта среднего напряжения во вторичной цепи:

$$\langle U_2 \rangle = nU_1 \left\{ 1 - \frac{nt}{2RC_0} \right\},$$

где t – время между двумя последовательными зарядами конденсатора, R – сопротивление внешней цепи [7].

Первые машины Планте не давали постоянного напряжения, т.к. время разрядки было меньше времени между зарядками конденсаторов. Вручную рукоятью коммутатора можно делать не более оборота в секунду, а простая передача, как это видно из соотношения диаметров шестерён, позволяет повысить эту скорость не более чем в 5 раз, т.е. $t = 0,2$ с. Если толщина слюды 1 мм, то $C_0 \approx 2$ нФ. Эффективное сопротивление цепи меняется при искровом пробое, но если принять $R = 100$ кОм...1 МОм, тогда $RC_0 \approx 2$ мс.

Машина Планте была усовершенствована Траубриджем в 1898 г. для питания рентгеновских трубок и давала напряжение 1200 кВ, а длина искры была 150 см (а иногда до 2 м). Идея передачи электрической энергии постоянным током высокого напряжения, как казалось в 20-е гг. XX в., должна была вывести реостатическую машину «за пределы лабораторий» [7]. Замена ручного привода коммутатора на электрический позволила поднять частоту вращения до 500 об/с, и с использованием конденсаторов большей ёмкости (0,5 мкФ) увеличить постоянную разрядки до 50 мс (при $R = 100$ кОм), а t – до 2 мс. При таких условиях $\langle U_2 \rangle = 0,8nU_1$, и реостатическая машина может рассматриваться как источник постоянного тока напряжением $0,8nU_1$, причём колебания напряжения в цепи, рассчитываемые по формуле $nU_1t/(2RC_0)$, составляют всего 2,5% от $\langle U_2 \rangle$. Реостатическая машина была эффективнее катушки Румкорфа, поскольку в ней не было потерь на джоулево тепло, магнитный гистерезис и токи Фуко. Так, при равном выходном эффекте индукционная катушка потребляла 22 кВт, а машина Планте – только 0,2 кВт.

Опыты Г.Планте

Обычно на вводном уроке, посвящённом электрическому току, рассказывают о его действиях – магнитном, тепловом, химическом и т.п. Говоря о механическом действии тока, упоминают прежде всего о взаимодействии проводников с током, и это понятно, поскольку оно стало основой современной техники. Но ударная волна, порождаемая молнией в воздухе и воспринимаемая как гром, пробой твёрдого диэлектрика высоковольтным разрядом, т.е. в конечном итоге его разрушение, также можно рассматривать как проявления механического действия тока высокого напряжения. Планте исследовал действие высокого напряжения с помощью своей реостатической машины и платиновых электродов (они не окисляются), опущенных в жидкость или расположенных над её поверхностью⁷. Эти опыты моделируют взаимодействие высоковольтного электрического разряда с жидкостью, происходящего, например, при попадании молнии в водоём.

Электрический фонтан. В сосуд с солёной водой, посередине, наполовину погружалась очень короткая, около 3 мм, капиллярная трубочка (рис. 6) и опускался платиновый провод от положительного полюса реостатической машины (800 элементов Бунзена), а внутрь трубочки вводился на 1 мм платиновый провод от отрицательного полюса. Когда машину приводили в действие, то в узком канале трубочки возникал электрический пробой, и искры, вылетая стремительно и с сильным шумом, увлекали за собой воду, образуя при этом фонтан высотой около метра. Если поменять полярность, то также образовывался фонтан, но его струя была рассеянной и не такой высокой [6].

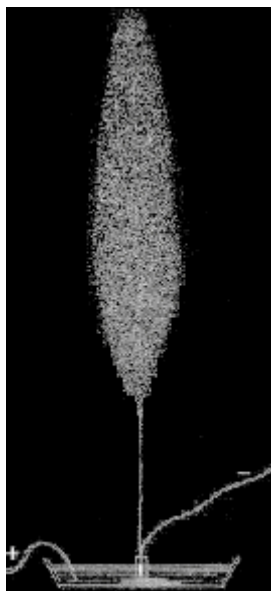


Рис. 6. Электрический фонтан

Электрический прилив. В стеклянный сосуд, наполненный солёной водой, опускался платиновый провод, соединённый с отрицательным полюсом реостатической машины (рис. 7, а); другой провод от положительного полюса подводился к внутренней стенке сосуда. При включении напряжения от стенки сосуда по поверхности шли волны и возникала струя пара, сопровождаемая свечением на высоте около 1,5 см. Сама жидкость приходила в сильное волнение. Если сосуд был неглубоким и плоским (рис. 7, б), в верхнем слое распределение напряжения оказывалось сильно неравномерным и наблюдался «прилив».

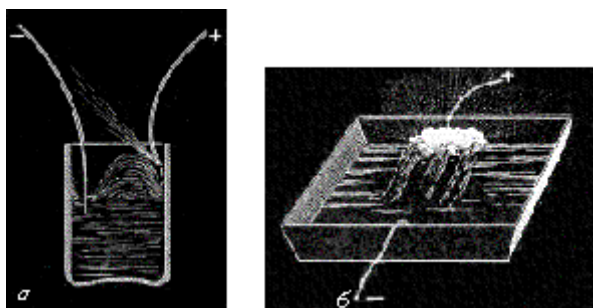


Рис. 7. Электрический прилив

Механическое действие в описанных опытах является результатом совместного теплового и химического действия – солевой раствор вскипает, происходит электролиз, появляющийся водяной пар оказывает давление на верхний слой жидкости, вызывая тем самым боковое выдавливание волны вверх.

Электрические светящиеся шарики. Если опыт, показанный на рис. 7, а, проводился при невысоких напряжениях (ниже 100 В) и отрицательный электрод опускали в воду неглубоко, то вблизи положительного электрода образовывался светящийся водяной шарик, рис. 8. Если положительный полюс постепенно отодвигали, то шарик, заметно потрескивая, быстро вращался, увеличивался в диаметре (до 1 см), сплющивался и в конце концов лопался.

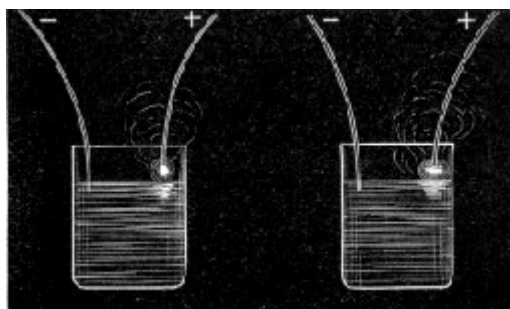


Рис. 8. Электрические светящиеся шарики

Форма разряда натолкнула исследователей на мысль, что наблюдаемое свечение есть шаровая молния. Аналогичный опыт Планте ставил с дистиллированной водой, а реостатическую машину подключал к батарее из 800 элементов Бунзена. Приблизив отрицательный полюс к поверхности воды, Планте получал жёлтое тюльпанообразное пламя диаметром около 2 см (рис. 9). Платиновый провод начинал плавиться, образовывалась закрытая дуга из водяного столба, электрический ток спадал, а свечение принимало форму шарика диаметром около 1 см. При отодвигании отрицательного электрода наблюдалась серия последовательных фигур (рис. 10): из воды возникал световой шар со светящимися голубыми точками, которые постепенно начинали вращаться с возрастающей скоростью, и наблюдателю казались светящимися концентрическими кругами. Продолжая исследования, Планте получил между двумя горизонтальными электродами в виде двух влажных картонок вращающийся и неправильно движущийся огненный шар. На основании этого он объяснил появление шаровой молнии при приближении грозовой тучи, когда туча и земля заряжены противоположно, а дождя, превращающего разряд в линейную молнию, ещё нет [8]. Открытия в области спектроскопии, сделанные Бунзеном и Кирхгофом, позволили Планте исследовать состав наблюдаемого разряда: он состоял из паров воды и её составляющих.

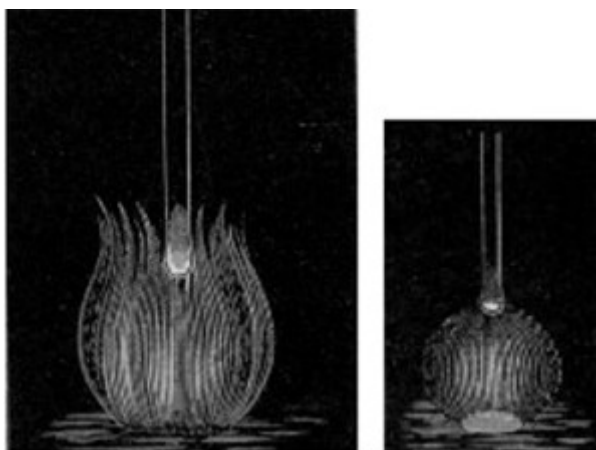


Рис. 9. Электрическое шарообразное пламя

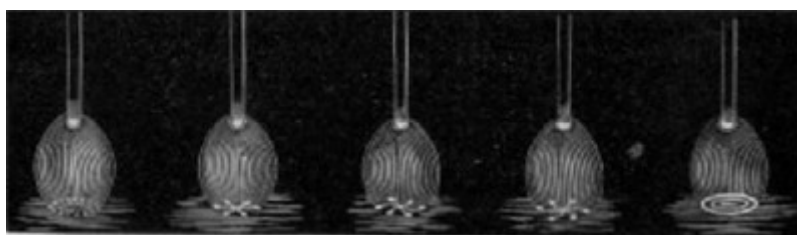


Рис. 10. Свечение при высоком напряжении

Заключение

Цикл работ, которые провел Г.Планте, включают в себе все элементы классического

исследования в области физики: наблюдение природного явления, создание прибора для исследований в лаборатории, постановку лабораторного эксперимента, изучение явления в условиях лаборатории, и, наконец, попытку его объяснения. Можно сказать, что это была первая законченная попытка построить научно обоснованную модель шаровой молнии. Через полвека стало ясно, что явление шаровой молнии сложнее. «Г.Планте получил явление, несколько напоминающее шаровую молнию, погружая отрицательный электрод сильной батареи в воду или раствор соли и касаясь поверхности воды. Когда этот полюс был несколько приподнят, то от него отделялся светящийся шарик, который скользил по поверхности воды. **Однако случайному подобию двух явлений нельзя придавать значения**, и нельзя строить объяснение шаровой молнии, исходя из опытов Г.Планте» [11]. Внешнее подобие явлений – фактор, который может как помогать в продвижении исследования, так и тормозить его.

Загадка шаровой молнии до сих пор не разрешена. «Проблема исследования шаровой молнии может быть разделена на следующие части: а) образование шаровой молнии; б) хранение и преобразование её энергии; в) устойчивость квазистационарного состояния и механизмы гибели» [5]. При этом производятся и систематизируются наблюдения, разрабатываются приборы для воспроизведения шаровой молнии в лабораторных условиях, исследуется её состав, т.е. научные работы идут в целом в тех же направлениях, в каких работал Г.Планте, но на современном уровне знаний.

Поскриптум

Интерес к шаровой молнии не только не исчез за последние полтора столетия, но даже возрос. Так, в 2006 г. журнал «Химическая физика» посвятил полностью мартовский номер (№ 3) проблеме её исследования. А как же опыты Г.Планте? Казалось бы, в учебнике О.Д.Хвольсона им вынесен окончательный «приговор». Однако это не совсем так. То, что впервые наблюдал Планте, получило название ДСО – *долгоживущие светящиеся образования*: «Отличительная особенность данных объектов – аномально большое время их существования (время свечения) по сравнению с временем их генерации разрядным источником или типичным временем их гибели... Другая особенность светящихся образований – их автономность, т.е. способность свободно перемещаться в пространстве, сохраняя свою форму, размер и цвет в течение времени, сравнимого со временем существования. По этим свойствам ДСО аналогичны шаровым молниям <...> К исторически первому направлению (экспериментов по получению ДСО. – М.Б.) можно отнести образование светящихся шаров в экспериментах типа проведённых Планте в XIX в.» [12].

Интересно, что в рамках современного исследования остаётся интерес и к работам самого Планте, они подробно описываются (см., например, [13]). А в начале XXI в. подобные опыты получили развитие в работах учёных (эксперимент «Гатчинский разряд») [12]). Будем надеяться, что имя Гастона Планте останется на тех страницах истории физики, которые с интересом читаются школьниками, и что оно не окажется в «пропасти забвения»...

Желающие могут сравнить описания опытов Г. Планте и современного эксперимента

Опыты Планте. В одной серии экспериментов использовались расположенные горизонтально металлические пластины, разделённые экраном из слюды. К ним подключалась батарея, дающая напряжение около 4 кВ. Разряд возникал в результате пробоя экрана в самом слабом месте. Он совершал движение над поверхностью пластин. Эксперимент продолжался несколько минут (!), пока батарея могла поддерживать разряд.

Появление шарика, по-видимому, вызывалось испарением материалов электродов.

В другой серии экспериментов использовались заострённые электроды и блюдо, наполненное водой. Использовались стержни из меди и железа, а также из угля. Источником напряжения служила система батарей. При уменьшении расстояния между электродом и поверхностью воды возникал разряд. Обычно на воду подавался отрицательный заряд. Было обнаружено, что вблизи поверхности воды образуется разряд сферической формы. Цвет и интенсивность свечения шара менялись при изменении материала электрода и величины приложенного напряжения.

Эксперимент «Гатчинский разряд». Полиэтиленовая чаша заполняется слабо проводящей водой. На дне чаши находится медный электрод в виде кольца, соединённый изолированной медной шиной с положительным полюсом конденсаторной батареи. Отрицательный полюс батареи соединён с электродом, расположенным в центре чаши у поверхности воды и направленным вверх, в воздух. Этот цилиндрический электрод из угля, меди или алюминия окружает кварцевая трубка, возвышающаяся над поверхностью воды на 3–5 мм. Конденсаторная батарея имеет ёмкость 0,6 мФ и заряжается до 5,5 кВ. Для получения ДСО центральный электрод смачивается каплей воды. При быстром замыкании разрядника из электрода с резким хлопком вылетает плазменное образование, которое трансформируется в сферический объект.

Публикация статьи произведена при поддержке компании «Веллтон». Если Вы ищите

[большие типографии](#), предоставляющие рекламные услуги в Москве, то предложение

компании «Веллтон» для Вас. Типография полного цикла компании «Веллтон»

осуществит полный спектр необходимых работ, от разработки логотипа компании, до

производства сувенирной продукции и оперативной полиграфии. Подробнее

ознакомиться с предлагаемыми услугами можно на официальном сайте компании

«Веллтон», который располагается по адресу <http://www.welltonart.ru>

Литература

1. Пуанкаре А. Логика и интуиция в математической науке и преподавании»: В сб. «Последние работы А.Пуанкаре». – М.: Ижевск, R&C Dynamics, 2001.
2. Резерфорд Э. Рассеяние α -частиц. Строение атома: В сб. «Строение атома и искусственное разложение элементов». – Москва–Петроград: ГИЗ, Сер. «Современные проблемы естествознания», 1923, № 3.
3. Кабардин О.Ф. История физики и развитие представлений о мире: Элективный курс. 10–11 кл. – М.: АСТ «Астрель», «Транзиткнига», 2005.
4. Дари Ж. Электричество во всех его применениях. – СПб.: Типография А.С.Суворина, 1903.

5. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – М.: Научный мир, 1996.
6. N. von Schweiger-Lerchenfeld. Das Buch der Experimente. Physikalische Apparate und Versuche. Mechanische Operation. Naturwissenschaftliche Liebhabereien; Wien, Pest, Leipzig, A. Hartleben's Verlag (без указания года выпуска).
7. Флоренский П.А. Реостатическая машина: Техническая энциклопедия. Гл. ред. Мартенс Л.К. – М.: ОГИЗ РСФСР, 1934. т. XIX.
8. Брокгауз Ф.А., Ефрон И.А. Энциклопедический словарь. – СПб., 1892. т. VIII, IX (репринт, изд. «Терра», 1991).
9. Енохович А.С. Справочник по физике. – М.: Просвещение, 1978.
10. Handbook of Chemistry and Physics, 33-th edition, ed. in Chief Ch. D. Hodgman, Chemical Rubber Publishing Co, 1951.
11. Хвольсон О.Д. Курс физики. – Берлин: РСФСР ГосИздат, т. IV, 1923.
12. Бычков В.Л. Эксперименты с долгоживущими светящимися образованиями. – Химическая физика, 2006, т. 25, № 3.
13. Дж.Барри. Шаровая и чёточная молнии. – М.: Мир, 1983.

¹Только позже стало понятно, что наблюдавшиеся Планте разряды не являлись шаровой молнией [5].

²Книга переведена на русский язык: Г. Плантэ. Электрические явления в атмосфере. – СПб., типография Безобразова и Ко, 1891.

³Из соотношения диаметров зубчатой пары на рис. 2 видно, что передаточное число около 5, так что можно затронуть и вопросы механики!

⁴Это так называемые *доски Франклина* – конденсаторы, впервые сделанные Б.Франклиным в середине XVIII в.

⁵График можно использовать для оценки напряжения пробоя в электрофорной машине, которое зависит от диаметра шариков разрядника!

⁶Проф. П.А.Флоренский, учёный богослов и философ, сотрудник Электротехнического института, был заявлен в 1927 г. как один из авторов «Технической энциклопедии». Том, в котором опубликована цитируемая статья, вышел в свет уже после его ареста.

⁷Если о самой реостатической машине уместно упомянуть, изучая соединения конденсаторов, то опыты, описанные ниже, могут как «анонсировать» тему «Токи в средах», так и рассматриваться при прохождении самой темы, ведь здесь, по сути, реализуется сочетание проводимостей жидкости и газа.

