

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53(09)

ИСТОРИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ КОГЕРЕРА*Л.Н. Крыжановский*

История когерера — физического прибора и радиодетали — вызывает особый интерес в связи с приближающимся столетием радио. По решению ЮНЕСКО, эта годовщина будет отмечаться в 1995 г. во всем мире. История когерера восходит к XVIII в., когда складывались понятия об основных электрических величинах, таких, как напряжение, ток, сопротивление и проводимость.

В первой трети XVIII в. было обнаружено, что некоторые вещества, названные позднее, в 1738 г., проводниками, могут передавать "электрическую силу" на расстояние [1]. Для передачи на значительное расстояние оказалось необходимым изолировать проводники (термин "изолировать" встречается в работе 1746 г. [2]). Была отмечена различная способность изолировать и проводить электричество у различных веществ. Так, в первой трети XVIII в. Стивен Грэй (1666 — 1736) установил, что из всех шелковых шнуров наилучшими изоляционными свойствами обладают шнуры голубого цвета. В 1747 г. Вильям Ватсон (1715 — 1787) заметил, что металлы наилучшим образом проводят электричество, хотя вода тоже отличный проводник [3].

Термин "сопротивление" (*нем.* Widerstand) встречается в книге Иоганна Генриха Винклера (1703 — 1770), изданной в 1744 г. Ученый писал о возможности передавать электричество "хоть на край света", заметив, что "при этом электрическая атмосфера должна преодолевать некоторое сопротивление" [4, с. 147 — 148]. Более четкое физическое содержание термин "сопротивление" (*фр.* resistance) имеет в работе Луи-Гийома Лемонье (1717 — 1799) [2].

В связи с опытами Ватсона по передаче электричества на расстояние Бенджамин Франклин (1706 — 1790) заинтересовался электропроводностью земли. Он утробовал землю в стеклянную трубку, открытую с обоих концов, воткнул в нее по проволочному крюку с каждой из сторон и стал разряжать лейденскую банку (конденсатор со стеклянным диэлектриком) через свое тело и последовательно соединенную с ним трубку с землей разного вида. В письме 1748 г. Франклин констатировал, что сухая земля не передает электрического удара. Франклин не пользовался термином "резистор", хотя снабженная проволочными выводами стеклянная трубка с землей выполняла в этих опытах функцию резистора, точно так же как тело экспериментатора выполняло функцию амперметра [5, с. 36 — 37].

Несколькими годами ранее Жан-Антуан Нолле (1700 — 1770) успешно разряжал лейденскую банку через цепочку людей, в которую была включена стеклянная трубка с водой. Вода оказалась хорошим проводником [6].

Термин "резистор" и описание устройств, к которым безусловно подходит этот термин, встречается в письме от 15 марта 1759 г. любителя науки Эдварда Делаваля (1729 — 1814) члену Лондонского Королевского общества (академии наук) Бенджамину Вильсону (1708 — 1788) [7]. Правда, Делаваль употреблял термин "резистор" (в написании *resister*, от латинского *resistere* "сопротивляться") для обозначения не прибора, а вещества, "оказывающего сопротивление прохождению электрического флюида".

Резисторы Делаваля представляли собой стеклянные трубки, плотно заполненные сухим порошком окалина различных металлов. Делаваль вставил в концы трубок по куску проволоки и заделал торцы сургучом. Один проводочный вывод резистора Делаваль подвешивал к кондуктору электризационной машины, а другой держал в руке. Отводя таким способом заряд с кондуктора в землю через резистор и свое тело, Делаваль оценивал сопротивление различных резисторов по собственному ощущению "прохождения электрического флюида" и искре.

Делаваль сделал вывод, что сопротивление обусловлено не измельчением металла в порошок, а прокаливанием. Он писал: "Мельчайшие опилки или порошки металлов проводят так же хорошо, как эти вещества в целом виде". Впрочем, как следует из дальнейшего, этот тезис нуждается в уточнении.

Делаваль установил, что сопротивление резистора зависит от температуры. Наибольшее сопротивление у него получалось при температуре, которую еще выдерживает рука.

Влияние температуры на электропроводность стекла исследовали Джон Кантон (1712 — 1772) и Чарльз Кавендиш (1703 — 1783), отец знаменитого Генри Кавендиша (1731 — 1810). Кантон, вероятно, первым показал, что "умеренно нагретое стекло становится в некоторой степени проводником электричества" [5, с. 205 — 207].

Смола — один из первых известных изоляторов. Однако Франц Карл Ахард (1753 — 1821) успешно разряжал лейденскую банку через кипящую смолу [8, с. 248].

Возвращаясь к работе Делаваля, следует отметить, что конструкция его резисторов восходит к франклиновским трубкам с землей и проводочными выводами. Что же касается материала резисторов Делаваля, то необходимо упомянуть об одном исследовании Ватсона. В работе, опубликованной в трудах Королевского общества за 1748 г. [9], Ватсон пишет, что "окалина металлов [...] препятствует в значительной степени быстрому распространению электрической силы" и что свинцовые белила, свинцовый сурик, оксид серебра, ржавые железные опилки и т.п. непригодны для электродов лейденской банки. В примечании к публикации своей работы Делаваль отмечает, что не был знаком с этим исследованием Ватсона, когда выполнял свою работу.

Работе Делаваля предшествовали также оригинальные исследования, проведенные в Петербурге.

Первому русскому электрику Георгу-Вильгельму Рихману (1711 — 1753), немцу по национальности, но уроженцу Российской империи, принадлежит заслуга создания в 1745 г. первого в мире электроизмерительного прибора — снабженного угловой шкалой электрометра на основе льняной нити, прикрепленной верхним концом к вертикально установленному металлическому бруску. Угол отклонения нити позволял судить об "электрической силе". Нить была стандартизирована: она имела полтора фута в длину, а к ее концу прикреплялось полграна свинца. Такой электрометр, или "электрический указатель", как его называл Рихман, дал возможность провести важные опыты [10].

Свой доклад на конференции Петербургской академии наук 30 апреля 1753 г. Рихман начал словами: "Ломоносов передал мне три порции стекла, различающиеся между собой степенью измельчения, и высказал желание, чтобы я исследовал, что произойдет, если на этих порошках будет покоиться электризуемая масса, дав мне таким образом случай открыть истины немаловажные" [11, с. 232; 12, с. 283].

Оказалось, что электрические свойства стеклянных порошков существенно зависят от влажности: чем выше влажность, тем выше электропроводность порошка. Влияние влажности на электрические свойства вещества было известно давно (см., например, [5, с. 1671]), но лишь в излагаемой работе этот вопрос впервые исследовался систематически.

Вот как выглядел опыт, который Рихман проделал с каждым из порошков.

Ученый насыпал порошок в металлический сосуд. В порошок погружалась проволока, свисавшая с кондуктора электризационной машины, к которому был подключен электрометр.

Рихман установил, что чем выше влажность, тем быстрее стекает с кондуктора заряд, измеряемый электрометром. По показаниям электрометра — докладывал Рихман — "можно в разных местах и в разное время узнавать состояние воздуха" [11, с. 323]. Таким образом, мы видим первый в истории резистивный датчик влажности, или влагорезистор.

Рихман нашел, что "более тонкий порошок сильнее притягивает влагу, чем более крупный". Это указание на возможность получения датчиков влажности различной чувствительности.

Итак, на примере стекла была показана возможность превращения изоляторов в проводники, обладающие разной электропроводностью. С другой стороны, Ватсон и Делаваль решили обратную задачу, показав, что, хотя металлы как таковые являются проводниками, их оксиды оказывают сопротивление прохождению электрического тока.

В книге, изданной в 1767 г., Джозеф Пристли (1733 — 1804) представил ряд электропроводности металлов (в порядке возрастания): железо, латунь, медь, серебро, золото. Вот как Пристли получил этот ряд.

Он разряжал батарею лейденских банок — по методу Франклина — через цепь, состоящую из двух последовательно соединенных проволок одинаковых размеров из разных металлов. Параметры установки подбирались так, чтобы одна из проволок перегорала при разрядке. Франклин и Пристли полагали, что это будет проволока с более высоким сопротивлением [13, с. 728 — 729]. Конечно, результаты таких опытов зависят от чистоты металлов и их температуры плавления.

Продолжая исследования электрических свойств материалов, друг и коллега Франклина по электрическим опытам Эбенезер Киннерсли (1711 — 1778) писал ему в 1770 г. о хорошей электропроводности (conducting quality) угля из некоторых древесных пород: дуба, березы и клена. Киннерслей сообщал также, что успешно разряжал лейденскую банку через свое тело и жирную линию, проведенную на бумаге графитовым карандашом [14].

В 1772 г. Джамбаттиста Беккариа (1716 — 1781) констатировал: "Металлы, хотя они значительно более податливы (т.е. проводящи), чем все другие тела, все же оказывают некоторое сопротивление, пропорциональное длине пути, который пробегает в них искра" [15, с. 179].

Цитированные выше работы подводят вплотную к формуле сопротивления $R = \rho l/S$.

В конце XVIII в. возникло деление проводников на проводники 1-го класса

(металлы) и проводники 2-го класса ("влажные проводники") [16, с. 404 — 411].

Основываясь на воззрениях Франклина, Франц Ульрих Теодор Эпинус (1724 — 1802, с 1757 г. в России) так сформулировал различие между проводниками и непроводниками: электрический флюид в непроводниках, в отличие от проводников, при движении по порам тела встречает сопротивление и не может быстро растекаться по телу [17, с. 196]. Сколь ни расплывчаты были такие представления, развитие науки привело к появлению в 1799 г. источника постоянного тока — вольтова столба.

Возникли условия, позволившие открыть законы электромагнетизма. Обобщив эти законы, Джеймс Клерк Максвелл (1831 — 1879) создал теорию электромагнитного поля, из которой вытекало существование электромагнитных волн. В 1888 г. Генрих Рудольф Герц (1857 — 1894) экспериментально подтвердил предсказание Максвелла, благодаря чему появились предпосылки для создания радиотехники. Детектором в опытах Герца служил искровой промежуток резонатора, посредством которого Герц с трудом наблюдал миниатюрные искры, проводя свои знаменитые опыты в темном подвале. Для практических целей требовался другой детектор электромагнитных волн.

Роль такого детектора сыграла "трубка Бранли", которую сэр Оливер Джозеф Лодж (1851 — 1940) назвал когерером и которая по своей конструкции восходит к резисторам Делаваля. Появлению "трубки Бранли" непосредственно предшествовали исследования, проведенные после Делаваля, которые могли подсказать ее идею Эдуарду Бранли (1844 — 1940).

В статье, опубликованной в 1835 г., шведский физик П.С. Мунк ав Росеншёльд (1804 — 1860) сообщает о своих опытах с порошками из сульфида ртути, измельченного олова или угля и т.п. в стеклянной трубке, снабженной проволочными выводами. Ученый экспериментировал также с отвердевшими массами типа сплава серы с угольным порошком и т.п. [18, с. 347 — 349; 19]. Как и Франклин, Мунк разряжал через порошок (или отвердевшую массу) лейденскую банку. Когда лейденская банка была заряжена до достаточно высокого напряжения, после разрядки сопротивление порошка (массы) резко снижалось и сохраняло низкое значение. Если порошок после опыта высыпали из трубки, то при повторной засыпке этого же порошка его сопротивление снова оказывалось высоким и т.д. При встряхивании трубки сопротивление порошка, ставшее низким после разрядки, резко повышалось. Как и его предшественники Франклин и Делаваль, Мунк сам "работал амперметром". Так, пользуясь методикой, доступной еще в XVIII в., Мунк сделал шаг на пути к созданию когерера. Кроме того, опыты Мунка предвосхитили изобретение валиста.

Подобные результаты были получены и другими исследователями, которые уже пользовались современными им электроизмерительными приборами и источниками питания. В 1866 г. братья Варлей (Англия) запатентовали устройство молниезащиты телеграфной аппаратуры, которое содержало два медных электрода, разделенных тонким слоем угольного порошка, смешанного с порошком изолирующего материала. При низком напряжении порошок оказывал большое сопротивление прохождению тока, а при высоком — малое [20, с. 11; 21, с. 58 — 59].

В 1884 г. итальянский физик Т. Кальчекки-Онести (1853 — 1922) исследовал сопротивление металлических опилок в эбонитовой и стеклянной трубках [18, с. 350 — 352; 21]. Под действием токов размыкания цепи, содержащей индуктивность и трубку с опилками, сопротивление опилок значительно уменьшалось.

Изобретателем угольного когерера и даже первооткрывателем электромагнитных волн мог стать Дэвид Эдвард Хьюз (1831 — 1900), но ему не повезло.

Хьюз родился в Англии. В возрасте семи лет был перевезен в США. Автор важных изобретений в области электросвязи. В 1867 г. возвратился в Англию.

В 1879 г., за девять лет до опытов Герца, Хьюз заметил, что при работе индукционной катушки (в модификации Румкорфа) по соседству с цепью, содержащей телефон и угольный микрофон, сопротивление микрофона изменяется, при этом в телефоне слышны звуки. Хьюз справедливо предположил, что это можно объяснить воздействием электромагнитных волн на угольный порошок, но коллеги, которых он пригласил на демонстрацию опытов, убедили его, что наблюдаемый эффект обусловлен просто электромагнитной индукцией. Публикация об этом эпизоде из истории науки появилась лишь в 1899 г. [20, с. 10; 21, с. 43 — 44]. Вспоминаются слова Джона Бернала (1901 — 1971): "Трудность в науке часто представляет не столько то, как сделать открытие, сколько понять, что оно сделано" [23, с. 339].

Осознанное изобретение когерера — прибора, сопротивление которого резко изменяется под действием электромагнитного излучения, — принадлежит Бранли, профессору физики Парижского католического университета. В 1890 г. Бранли обнаружил [18, с. 353 — 355; 22], что под действием соседних электрических разрядов резко уменьшается (от многих мегаомов до нескольких омов) сопротивление нанесенного на стеклянную или эбонитовую пластину отполированного слоя тонко измельченной меди (иногда с добавкой олова для улучшения адгезии). Контактное взаимодействие порошка с внешней цепью осуществлялось с помощью медных пластинок, прижимаемых струбцинками. Бранли успешно проводил подобные опыты также с опилками железа, алюминия, сурьмы, кадмия, цинка, висмута и т.д., иногда смешанными с изолирующими жидкостями, в трубках из стекла или эбонита. Разряды производились с помощью электризационной машины (с конденсатором или без него), катушки Румкорфа и т.п. В статье 1890 г. Бранли писал: "Пользуясь мостиком Уитстона, я мог констатировать эффект на расстоянии более 20 м, причем искровой аппарат работал в зале, отделенном от гальванометра с мостиком тремя большими комнатами, так что шум от искр не мог быть услышан" [18, с. 353]. Сопротивление оставалось низким иногда более суток, а при встряхивании сразу восстанавливалось прежнее, высокое значение сопротивления.

Проведя успешные опыты с "трубкой Бранли", Лодж сразу понял ее ценность как "прибора для обнаружения электрических колебаний" [18, с. 358]. "Этот прибор, который я называю когерером, — писал Лодж в статье, опубликованной в 1894 г., — удивительно чувствителен как детектор герцевых волн" [18, с. 435; 24]. Термин "когерер" Лодж образовал от латинского *cohaerere* "сцепляться", имея в виду сцепление опилок между собой под действием электромагнитных волн. Термином "когерер", получившим широкое распространение, Бранли не пользовался, будучи несогласным с механизмом проводимости, который предложил Лодж. Бранли назвал свой прибор радио-кондуктором. Этим термином подчеркивается, что прибор становится проводником под действием электромагнитного излучения. Спорный физический механизм, до конца не выясненный и в наши дни, не затормозил практического применения когерера (нередко человек "больше умеет, чем знает").

Когерер оказался последней необходимой деталью, позволившей реализовать идею беспроводного телеграфа, неоднократно высказывавшуюся после опытов Герца. Лодж весьма близко подошел к реализации этой идеи, но,

как и Браили, не претендовал на приоритет изобретения радио. Лодж отмечал большие заслуги А.С. Попова в этой области [20, с. 262], а Бранли явно отдавал пальму первенства русскому ученому [20, с. 187].

Когерер, действие которого, вообще говоря, основано на несовершенном электрическом контакте между опилками, подсказал также идею грозоотметчика. Так, в заметке 1894 г. [18, с. 358] сообщается о воздействии грозы на контакт, как оказалось, некачественный, в одной гальванической мастерской. "Это навело на мысль, — говорится в заметке, — о возможности применения остроумного прибора [когерера. — Л.К.] к исследованию волн, распространяющихся во время грозы".

Когереры первых приемников А.С. Попова и Г. Маркони были выполнены по-разному. Стремясь добиться высокой чувствительности и стабильности когерера, Попов остановился на горизонтально расположенной стеклянной трубке $\phi 1 \times 6 \dots 8$ см с приклеенными к внутренним стенкам, почти на всю длину трубки, тонкими платиновыми электродами, выведенными наружу с разных торцов трубки. Зазор между продольными краями электродов составлял около 2 мм. Трубка была почти наполовину заполнена железным порошком, который покоился на электродах. Трубка закрывалась пробками с торцов [18, с. 453].

Маркони применил стеклянную трубку с плотно вставленными в нее поршнеобразными серебряными электродами, отстоящими друг от друга приблизительно на полмиллиметра. Этот промежуток, расположенный в центре трубки перпендикулярно ее оси, был заполнен смесью серебряных и никелевых опилок с небольшим количеством ртути. Трубка откачивалась до вакуума 4 мм рт. ст. и запаивалась.

В Центральном музее связи им. А.С. Попова в Санкт-Петербурге хранятся таганчики — плитки, на которых отжигались опилки различных металлов, и ситечки для просеивания опилок. Эти плитки и ситечки входили в комплект промышленных радиостанций системы Попова—Дюкрете (начало 1900-х годов) [28]. Кроме того, в музее имеются когереры фирмы Маркони в заводской упаковке. Они несколько отличаются от только что описанного когерера Маркони. Так, опилки в откачанной стеклянной трубке содержат 96% никеля и 4% серебра со следами ртути. Когереры прикреплены к державке из слоновой кости, с которой они и монтировались в приемнике [21, с. 66].

Первые приемники Попова и Маркони содержали автоматический встряхиватель, который срабатывал от принятой посылки и тем самым осуществлял декогерирование, т.е. подготавливал когерер к приему следующей посылки. В опытах Лоджа, проведенных до Попова и Маркони, автоматический встряхиватель когерера отсутствовал. Впоследствии появились самодекогерирующие когереры. Впрочем, таким когерером был угольный микрофон в вышеописанных опытах Хьюза.

Когерер применялся примерно до 1906 г., прежде чем окончательно уступить место другим детекторам.

Создатель когерера Эдуард Бранли практически не интересовался промышленным применением своего изобретения, но, как физик, занимающийся фундаментальными исследованиями, посвятил себя изучению механизма проводимости порошковых материалов [26].

Рассмотрим гипотезы, касающиеся работы когерера, которые были предложены в последнее десятилетие XIX в. Первую гипотезу выдвинул, вероятно, Лодж. Он предположил, что под действием напряжений, индуцируемых электромагнитными волнами, между опилками возникают микроскопические искры, в результате чего опилки привариваются друг к другу и сцепляются по



Э. Бранли (1844 — 1940)

(с фотографии 1896 г., любезно присланной автору внучкой ученого г-жой Турнон-Бранли через проф. Габильяра [26])

параллельным цепям. Эту гипотезу поддерживал Попов [20, с. 60].

Немецкий исследователь Фромме предположил, что зерна опилок окружены твердым диэлектриком в виде оксидов, который пробивают искры. В 1898 — 1999 г. ряд исследователей в самом деле наблюдали искры между опилками. Предположение Фромме, несомненно, справедливо для тех случаев, когда когерер располагается в нескольких метрах от мощного передатчика, но в обычных условиях дальнего приема искры между опилками когерера не наблюдались.

Гипотеза другого рода исходила из электростатического эффекта, который должен приводить к движению опилок, соединяющихся в цепочки. Действительно, в 1897 г., если не раньше, экспериментаторы вызывали сцепление опилок, прикладывая к когереру достаточно высокое напряжение, при котором происходило внезапное "когерирование". Это позволило предположить, что вследствие электростатической индукции опилки становятся диполями, притягиваются друг к другу и слипаются, образуя проводящие цепочки. Поскольку этот эффект не зависит от полярности приложенного напряжения, он должен иметь место и при переменном напряжении, индуцируемом электромагнитной волной. Данная гипотеза подкрепляется тем фактом, что из кучки опилок, расположенных на металлической пластине, с помощью металлического острия можно вытянуть нити, если подать напряжение между острием и пластиной и если при этом произвести рядом электрический разряд.

Еще одна гипотеза предполагала сварку опилок друг с другом вследствие

повышения температуры под действием индукционных токов, при этом указывалось, что опилки соприкасаются остриями, плотность тока в которых должна быть очень высокой. В самом деле, исследователи наблюдали на опилках следы плавления. И в этом случае источники искр, вероятно, были расположены весьма близко от когерера. Совершенно очевидно, что при больших индукционных токах опилки будут плавиться, но это не объясняет дальнего приема.

Рассмотрим теперь позицию Бранли. С самого начала он возражал против интерпретаций, в которых фигурировали либо искры, пробивавшие диэлектрик, либо движение опилок, собиравшихся в цепочки. Подобные явления, полагал Бранли, наблюдаются вблизи мощного разряда и не имеют никакого отношения к дальнему радиоприему.

Согласно Бранли суть проблемы заключается в свойствах диэлектрика, разделяющего опилки. Когда его толщина достаточно мала, то под действием радиоволн он может стать проводником. Бранли не объясняет, почему. Похоже, он считает, что эта гипотеза связана с фундаментальным свойством материи, которое еще предстоит открыть. Такая позиция в 1890 г. была вполне оправданной.

Этой гипотезы французский ученый придерживался до конца жизни, множа эксперименты, которые должны были привести к ее утверждению. Чтобы доказать отсутствие движения опилок, он погружает их в твердый диэлектрик — воск, парафин, смолу, шеллак, серу, озокерит и т.п. Он смешивает опилки с изолирующим порошком и сильно спрессовывает смесь. Полученные этим способом стержни, которые могут быть твердыми, как мрамор, обнаруживают такое же свойство, как и трубки с опилками. "Каким же образом проводящие частицы проходят через твердый изолятор, чтобы выстроиться в ряд?" — вопрошает Бранли на Международном конгрессе по физике в 1900 г.

Чтобы еще нагляднее показать отсутствие движения опилок, он заменяет их... полированными стальными шарами диаметром до 5 мм в стеклянной трубке примерно такого же внутреннего диаметра. Далее, чтобы исключить вращение, он помещает в стеклянную трубку металлические диски примерно такого же диаметра, как внутренний диаметр трубки. "Какое же изменение расположения мы можем вызвать в столбике из тяжелых стальных шаров или из широких железных или алюминиевых дисков? — продолжает Бранли. — И тем не менее эти столбики являются радиокондукторами".

Модифицировав столь сильно свой первоначальный прибор, Бранли осознает новый факт: "В случае столбиков из шаров и дисков начинает играть роль природа металла, которая не проявлялась у трубок с мелкими опилками, при этом металлы делятся на две группы. Из металлов первой группы (цинк, медь, серебро, латунь) нельзя изготовить радиокондукторы. Из металлов второй группы (железо, алюминий, висмут, свинец, олово и т.п.), т.е. из металлов, которые самопроизвольно покрываются тонким оксидным слоем, получаются хорошие радиокондукторы: сопротивление столбика уменьшается под действием искры и восстанавливает свое значение после удара".

В чем же тогда состоит роль этого изолирующего слоя? И почему он необходим здесь, а не в металлических опилках? Бранли выдвигает два положения:

— изолирующий слой, который разделяет проводящие частицы, становится проводящим под кратковременным воздействием токов высокой частоты;

— "частицы проводника не обязательно должны соприкасаться между собой, чтобы проводить электрический ток. В этом случае изоляция служит в основном для поддержания определенного промежутка между частицами".

Так Бранли предсказал туннельный эффект за 33 года до возникновения квантовой механики.

Для выяснения роли изоляции, разделяющей два соприкасающихся металла, Бранли пришел к идее радиокондуктора с одним-единственным контактом типа стального острия на железной или стальной плоскости. Бранли изготовил основанный на этом принципе детектор, который впоследствии применялся некоторое время в радиотехнике [26].

Можно сказать, что история радиотехники с самого начала явилась историей освоения полупроводников [27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крыжановский О.Н. К 250-летию открытия электропроводности//УФН. 1988. Т. 155. С. 129.
2. *Le Monnier L. -G. Recherches sur la communication de l'électricité//Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris. 1746. P. 447 — 464.*
3. *Watson W. An account of the experiments made by some gentlemen of the Royal Society, in order to measure the absolute velocity of electricity//Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1748. V. 45. Pp. 491 — 496.*
4. *Winkler J.H. Gedanken von den Eigenschaften, Wirkungen und Ursachen der Electricitat. — Leipzig: Breitkopf, 1744. — 168 S.*
5. *Франклин В. Опыты и наблюдения над электричеством/Пер. с англ. В.А. Алексеева. Ред. ст. и комм. Б.С. Сотина. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.*
6. *Nollet J.-A. Observations sur quelques nouveaux phénomènes d'électricité//Mémoires de l'Ac. ... Paris. 1746. P. 1 — 23.*
7. *Delaval E. A letter ... containing some electrical experiments and observations//Phil. Trans. 1759. V. 51, pt. 1. Pp. 83 — 88.*
8. *Achard F.C. Chymisch-physische Schriften. — Berlin: Weber, 1780. — 367 S.*
9. *Watson W. A collection of the electrical experiments ...//Phil. Trans. 1748. V. 45. Pp. 49 — 120.*
10. *Richmann G.W. De indice electricitatis ...//Novi Commentarii Acad. Sci. Imper. Petropolitanae. 1758. T. 4. P. 301 — 340.*
- [11] *Рухман Г.-В. Труды по физике/Подгот. текста, вступ. ст., прим. и ред. А.А. Елисеева, В.П. Зубова, А.М. Мурзина. Ред. А.Т. Григорьян. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.*
12. Протоколы заседаний конференции Императорской Академии наук с 1725 по 1803 г. Т. 2. 1744 — 1770. — СПб., 1899.
13. *Priestley J. The History and Present State of Electricity, with Original Experiments. — London: Dodsley, Johnson & Davenport, and Cadell, 1767.*
14. *Kinnersley E. Extract of a letter ... to Benjamin Franklin ... on some electrical experiments made with charcoal//Phil. Trans. 1773. V. 63, pt. 1. Pp. 38 — 39.*
15. Льюис М. История физики/Пер. с итал. Э.Л. Бурштейна. — М.: Мир, 1970.
16. *Гальвани А., Вольта А. Избранные работы о животном электричестве/Пер., биогр. очерк и прим. Е.Э. Гольденберга; вступ. ст. А.В. Лебединского. — М.; Л.: ОГИЗ, 1937.*
17. *Эпинус Ф. У. Т. Теория электричества и магнетизма/Ред. и прим. Я.Г. Дорфмана. — Л.: Изд-во АН СССР, 1951.*
18. Из предыстории радио: Сборник оригинальных статей и материалов/Сост. С.М. Рытов. Ред. Л.И. Мандельштам. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — (50 лет радио/Вып. 1).
19. *Munck af Rosenschöld P.S. Vereuche iiber die Fahigkeit starrer Korper zur Leitung der Elektrizität//Annalen der Physik und Chemie. 1835. Bd. 34. S. 437 — 463.*
20. Изобретение радио: А.С. Попов: Документы и материалы/Под ред. А.И. Берга. — М.: Наука, 1966.
- [21] *Blake G.G. History of Radio Telegraphy and Telephony. — London: Chapman & Hall, 1928.*
22. *Branly E. Variations de conductibilité sous diverses influences électriques//Comptes Rendus ... de l'Ac. des Sci. de Paris. 1890. T. 111, Nr. 2. P. 785 — 787.*

23. *Бернал Дж.Д.* Наука в истории общества. — М.: ИЛ, 1956.
24. *Lodge O.* The work of Hertz//Nature. 1894. V. 50. Pp. 133 — 139.
25. *Иоффе Х.А.* Приборы А.С. Попова//Памятники науки и техники/АН СССР. — 1984. — С. 139.
26. *Gabillard R.* Le **cohéreur** de Branly et les premiers **radio-détecteurs ... ancêtres du transistor?**//L'Onde Electrique. 1991. T. 71, Nr. 3. P 7.
27. *Кузин Е.И.* Когереры А.С. Попова//Из истории энергетики, электроники и связи. — М., АН СССР, 1983. — Вып. 14. С. 24.

Статья поступила 3.12.91 г.