

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2020
Том 3
№ 2

2020
Vol. 3
No. 2

Sevastopol

Почетный главный редактор

Президент РНТОРЭС им. А. С. Попова, академик РАН ГУЛЯЕВ Ю. В.

Главный редактор

д. т. н., проф. ГИМПЛЕВИЧ Ю. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

д. ф.-м. н., проф. АБРАМОВ И. И. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. ф.-м. н. ВОЛЬВАЧ А. Е. (КрАО, Крым, Россия)

д. т. н., проф. ГРОМОВ Д. В. (МИФИ, Москва, Россия)

к. т. н. ЕРМОЛОВ П. П. (СевГУ, Севастополь, Россия — зам. главного редактора)

д. т. н., проф. ИВАНОВ В. Э. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КАЛОШИН В. А. (ИРЭ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. ЛЕРЕР А. М. (ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия)

д. ф.-м. н., проф. МАГДА И. И. (ННЦ «ХФТИ», Харьков, Украина)

д. т. н., проф. НОСКОВ В. Я. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н. ОБУХОВ И. А. (НПП «Синергетика», Москва, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРИКОВ В. М. (СПбГИКиТ, Санкт-Петербург, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРЯКОВ А. В. (МТУСИ, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КУРАЕВ А. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. т. н., проф. СОВЛУКОВ А. С. (ИПУ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. СТАРОСТЕНКО В. В. (КФУ, Симферополь, Россия)

д. т. н., проф. ШИРОКОВ И. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

д. т. н., проф. АФОНИН И. Л. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. ф.-м. н., проф. БОГУШ В. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

проф. ИЛЬЧЕВ С. Д. (Durban University of Technology, South Africa)

проф. КАРМАКАР Н. Ч. (Monash University, Australia)

д. т. н., проф. КНЯЗЕВ С. Т. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. п. н. НЕЧАЕВ В. Д. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. т. н., проф. НОВИКОВ В. В. (ЧВВМУ им. П. С. Нахимова, Севастополь, Россия)

Заведующая редакцией: *В. П. Коломийченко*

Сайт журнала: <https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1268-njirt>

Подписано к печати 16.06.2020

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 8,40. Уч.-изд. л. 8,3. Тираж 300 экз.

Адрес редакции: ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Адрес для переписки: а/я 63, Севастополь, 299053

Тел. +7 (978) 745-27-51, e-mail: icrt.mail@gmail.com

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Отпечатано в типогр. Printex

ул. Кулакова, 59а, Севастополь, 299011. Тел.: +7 8692 464 744, +7 8692 455 678

Honorary Chief Editor

President of RNTORES n. a. A. S. Popov, Academician of RAS GULYAEV Yu. V.

Editor in Chief

D.Sc., Prof. GIMPILEVICH Yu. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

Editorial Board

D.Sc., Prof. ABRAMOV I. I. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc. VOLVACH A. Ye. (CrAO, Crimea, Russia)

D.Sc., Prof. GROMOV D. V. (MEPhI, Moscow, Russia)

C.Sc. YERMOLOV P. P. (SevSU, Sevastopol, Russia – Deputy Editor in Chief)

D.Sc., Prof. IVANOV V. E. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc., Prof. KALOSHIN V. A. (IRE of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. LERER A. M. (SFU, Rostov-on-Don, Russia)

D.Sc., Prof. MAGDA I. I. (KhIPT, Kharkov, Ukraine)

D.Sc., Prof. NOSKOV V. Ya. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. OBUKHOV I. A. (Sinergetika Ltd., Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. PESTRIKOV V. M. (SPbSUFT, Saint-Petersburg, Russia)

D.Sc., Prof. PESTRYAKOV A. V. (MTUSI, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. KURAYEV A. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc., Prof. SOVLUKOV A. S. (ICS of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. STAROSTENKO V. V. (CrFU, Simferopol, Russia)

D.Sc., Prof. SHIROKOV I. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

D.Sc., Prof. AFONIN I. L. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. BOGUSH V. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

Prof. ILCEV D. S. (Durban University of Technology, South Africa)

Prof. KARMAKAR N. Ch. (Monash University, Victoria, Australia)

D.Sc., Prof. KNYAZEV S. T. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. NECHAYEV V. D. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. NOVIKOV V. V. (P. S. Nakhimov ChHNS, Sevastopol, Russia)

Head of Editorial Board: *V. P. Kolomiychenko*

Address:

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

E-mail: icrt.mail@gmail.com

Website: icrtjournal.com

Содержание — Contents

Астрономия (01.03.00) — Astronomy

- Вольвач А. Е., Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н.** Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах
- A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, and L. N. Volvach,** Comparison of ground-based and satellite measurements of surface air temperature from the point of view of exoplanet sciences 139

Радиотехника и связь (05.12.00) — Radio engineering and communication

- Семенова Т. И., Шакин В. Н., Фриск В. В., Кудряшова А. Ю.** Анализ эффективности средств пакета Scilab при решении задач оптимизации
- T. I. Semenova, V. N. Shakin, V. V. Frisk, and A. Y. Kudryashova,** Analysis of the effectiveness of Scilab software tools in solving optimization problems 149
- Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В.** Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток
- V. P. Denisov, D. V. Dubinin, and D. V. Erofeev,** Angular resolution of phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays 162
- Синицын Е. А., Фридман Л. Б.** Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов
- E. A. Sinitsin and L. B. Fridman,** Features of time synchronization of multilateral aircraft surveillance systems 171
- Синицын Е. А., Фридман Л. Б.** Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации
- E. A. Sinitsin and L. B. Fridman,** The analysis of precision of the range measuring channels for short-range navigation systems 181

История науки и техники (07.00.10) — History of science and technology

- Пестриков В. М.** Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей
- V. M. Pestrikov,** Discovery and some scientific research of cathode rays 190
- Пестриков В. М.** Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков
- V. M. Pestrikov,** On the way to the vacuum diode 227

УДК 523.31-1/-8

Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах

¹ Вольвач А. Е., ¹ Курбасова Г. С., ¹ Вольвач Л. Н.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 22 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 25 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 25 сентября 2020 г.

Аннотация: Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и исследовать солнечно-планетные связи в ней. В статье обсуждаются результаты анализа измерений среднегодовой приземной температуры воздуха на интервале 1980—2017 гг. Сопоставление данных показало, что расхождения в наземных и космических измерениях приземной температуры воздуха до 1990 г. не превышают погрешности данных ($s=\pm 0,7$ °C). После 1990 г. наблюдаются наиболее значимые кратковременные расхождения в 2014 г. (-1.12 °C) и 2016 г. (1.33 °C).

Ключевые слова: космические измерения; наземные измерения; среднегодовая температура Земли.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н. Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 139—148.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах / А. Е. Вольвач, Г. С. Курбасова, Л. Н. Вольвач // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 139—148.

Comparison of ground-based and satellite measurements of surface air temperature from the point of view of exoplanet sciences

A. E. Volvach¹, G. S. Kurbasova¹, L. N. Volvach¹

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: September 22, 2020

Peer-reviewed: September 25, 2020

Accepted: September 25, 2020

Abstract: To understand the influence of stellar activity on (exo) planetary systems, we can consider the Sun and the planetary system as the closest and most studied space laboratory and investigate the solar-planetary relationships in it. The paper discusses the results of the analysis of measurements of the mean annual surface air temperature in the interval 1980–2017. Comparison of the data showed that the discrepancies in ground-based and space-based measurements of surface air temperature before 1990 do not exceed the data error ($s=\pm 0.7$ °C). After 1990, the most significant short-term discrepancies are observed in 2014 (-1.12 °C) and 2016 (1.33 °C).

Keywords: space measurements; ground measurements; the average annual temperature of the Earth.

For citation (IEEE): A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, L. N. Volvach, “Comparison of ground-based and satellite measurements of surface air temperature from the point of view of exoplanet sciences,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 139–148.

1. Введение

Свойства локальной окружающей среды экзопланеты во многом определяются ее родительской звездой. Отсюда следуют такие хорошо известные характеристики, как равновесная температура экзопланеты, в свою очередь, определяющая зону потенциальной обитаемости планетной системы.

Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и исследовать солнечно-планетные связи в ней.

В то же время, в практическом плане прогнозы и сценарии поведения климата Земли в будущем имеют большое прикладное значение, в том числе и в связи с проблемой глобального потепления.

Основными целями исследований является исследование связи солнечной активности и климата Земли. Главным источником изменений климата является Солнце: от угла падения солнечных лучей на Землю зависит изменение климата на планете. При этом наблюдаются кратковременные вариации параметров климата, такие как чередование времен года и даже изменение температуры в течение дня. Вся жизнь на Земле и ее будущие условия непосредственно зависят от интенсивности поступающего интегрального потока излучаемой Солнцем энергии — так называемой астрономической солнечной постоянной. Солнце своей деятельностью задает временные масштабы практически всех физических процессов в системе Солнце — Земля. Интенсивность излучаемого Солнцем потока энергии динамично определяет климат Земли [1].

По вопросам изменения климатических параметров на Земле в настоящее время существует большой объем публикаций, в которых обсуждаются альтернативные предположения о развивающемся процессе потепления, уточняется физическая основа изменения климата, роль астрономических факторов в этом процессе. Авторами настоящей статьи ранее исследовались изменения инсоляции и температуры в различных пунктах Крыма: обнаружены и установлены когерентные колебания между отдельными вариациями в данных об инсоляции и температуры приземного воздуха, параметрами магнитного поля, параметрами вращения Земли и солнечными циклами [2, 3, 4].

Изменения климата происходят постепенно, на протяжении тысячелетий и сопровождается циклическими колебаниями температуры на отдельных интервалах, интенсивность которых возрастает с проявлением экстремальной эндогенной и экзогенной активности в системе Земля [5, 6, 7, 8, 9]. В настоящее время не существует строгой теории генерации и взаимодействия циклов в Солнечной системе. В то же время, солнечные циклы влияют на энергетические изменения в глобальных гелио-геодинамических циклах [10, 11].

2. Измерения приземной температуры воздуха

На основе среднемесячных данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации числены среднегодовые величины приземной температуры воздуха с 1981 по 2017 годы в пункте Краснодар [12]. Дискретные статистики ненорми-

рованного белого шума в этих данных определены параметрами: среднее $\bar{x} = 0.02^\circ\text{C}$, стандартное отклонение случайной составляющей $s = \pm 0.7^\circ\text{C}$.

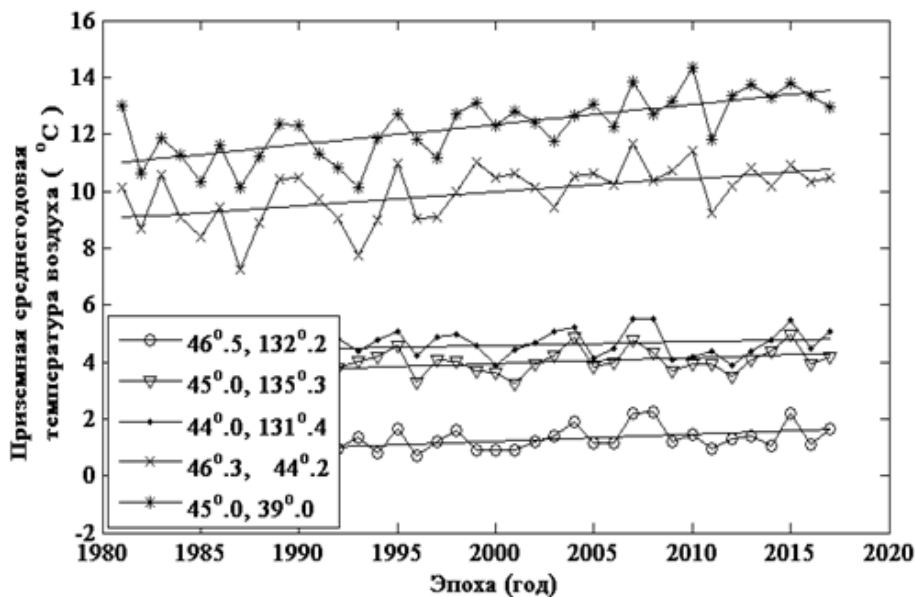


Рис. 1. Графики среднегодовой приземной температуры на 5 станциях России. Для каждой станции приведены графики исходных данных и линейных трендов, величины широт и долгот.

Fig. 1. Graphs of the average annual surface temperature at 5 stations in Russia. For each station, graphs of initial data and linear trends, values of latitudes and longitudes are shown

Космические измерения приземных температур воздуха в виде месячных и усредненных по годам величин получены в рамках программы исследований в области наук о Земле POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) [13].

Графики на рисунке 1 демонстрируют наземные измерения и тренды среднегодовой температуры в 5 пунктах России [10]. Как следует из рисунка 1, смещение в западном направлении по одной и той же параллели приводит к существенному росту температуры.

3. Сопоставление и анализ наземных и космических данных

Приведенные на рисунке 2 графики (а, б) наземных и космических наблюдений приземной среднегодовой температуры воздуха на станции Краснодар демонстрируют хорошую сходимость этих двух методов изме-

рений. График линейного тренда (рис. 2b) имеет не существенный наклон. Его математическое описание имеет вид

$$ftr(x) = p1 \cdot x + p2, \quad (1)$$

где коэффициенты (с 95 % доверительными интервалами — диапазоном значений, внутри которого с вероятностью 95 % лежат значения коэффициентов) в единицах °C равны:

$$\left. \begin{aligned} p1 &= 0.00496 (-0.004489, 0.01441), \\ p2 &= 0.4319 (0.2259, 0.6378). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Присутствие в последовательности измерений приземной температуры воздуха резких импульсов (а они, как правило, непредсказуемы и связаны с экстремальными событиями на Земле, Солнце и в Космосе) важно выявить их величину на фоне гладкого процесса изменения температуры.

В нашем анализе нелинейная тенденция изменения приземной температуры воздуха получена с помощью вейвлет преобразования данных. Метод вейвлет-анализа незаменим в случае нерегулярных изменений пространственно-временных параметров анализируемого процесса и наличия в преобразуемых данных импульсов.

Земля непрерывно получает от Солнца почти неизменный поток энергии, обеспечивающий наблюдаемый уровень освещенности и среднюю температуру ее поверхности. Однако количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, распределяется неравномерно и зависит, прежде всего, от положения Земли на орбите, скорости ее вращения, локальных и региональных условий [14]. Колебания земных условий существенно зависят от солнечной активности [15].

Под активностью Солнца, прежде всего, понимают рост числа солнечных пятен и сопровождающие его процессы. В цепочке солнечно-земных взаимодействий влияние солнечной активности на внешние и внутриземные процессы проявляется в событиях, период повторения которых составляет в среднем 11 лет. На результат воздействия солнечной активности влияют региональные и локальные условия [16].

Колебания среднегодовой температуры приземного воздуха носят импульсный характер. Такого вида нестационарные процессы требуют пространственно-временного анализа. В этом случае сглаживание по 5 годам методом скользящего среднего, принятое в практике анализа подобных природных рядов наблюдений, сглаживает кратковременные скачки температуры и смещает их локализацию во времени (см. рис. 3).

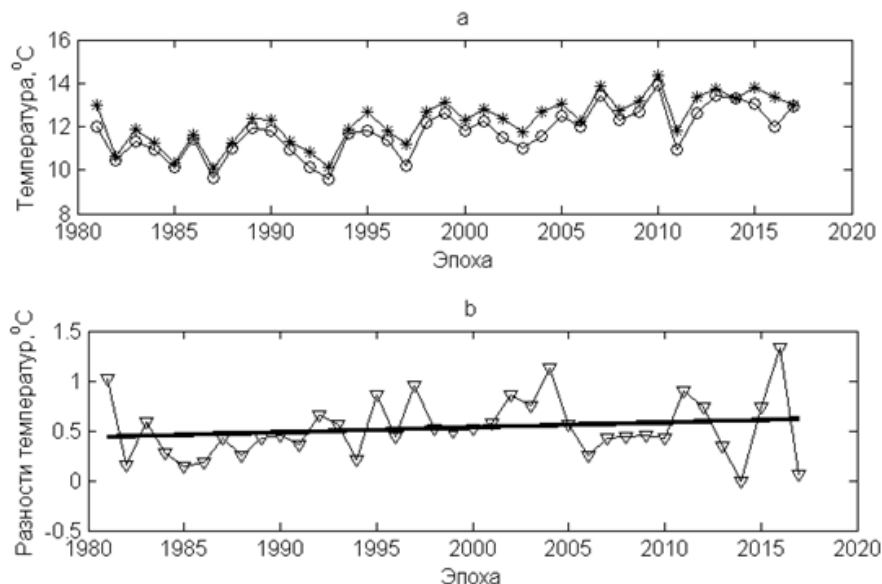


Рис. 2. Сопоставление наземных и космических наблюдений приземной среднегодовой температуры воздуха на станции Краснодар: а — графики наземных измерений (звездочки) и космических измерений (кружки); б — графики разностей между наземными и космическими измерениями приземной температуры (треугольники) и линейного тренда (непрерывная линия).

Fig. 2. Comparison of ground-based and space-based observations of the surface average annual air temperature at Krasnodar station: a – graphs of ground measurements (asterisks) and space measurements (circles); b – plots of differences between ground-based and space-based measurements of surface temperature (triangles) and a linear trend (continuous line)

Сопоставление наземных и космических измерений, создание численных моделей и изучение тенденций в изменениях локальной температуры способствует созданию прогноза ее изменения на ближайшие годы. Этот прогноз может отличаться от глобального, но может быть более достоверным и полезным для данного пункта. Для построения численных моделей изменения параметров климата в отдельно взятом пункте необходимы как наземные, так и космические наблюдения.

Построим численную модель долгопериодического тренда (рис. 3) в виде суммы трех гармоник ряда Фурье. Математическое описание этой модели соответствует наилучшим оценкам качества приближения нелинейного тренда и имеет вид

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i \cos(ivx) + b_i \sin(ivx)), \quad (3)$$

где x — временной интервал, отсчитываемый в годах от начала моделируемого временного ряд; i — номер гармоники.

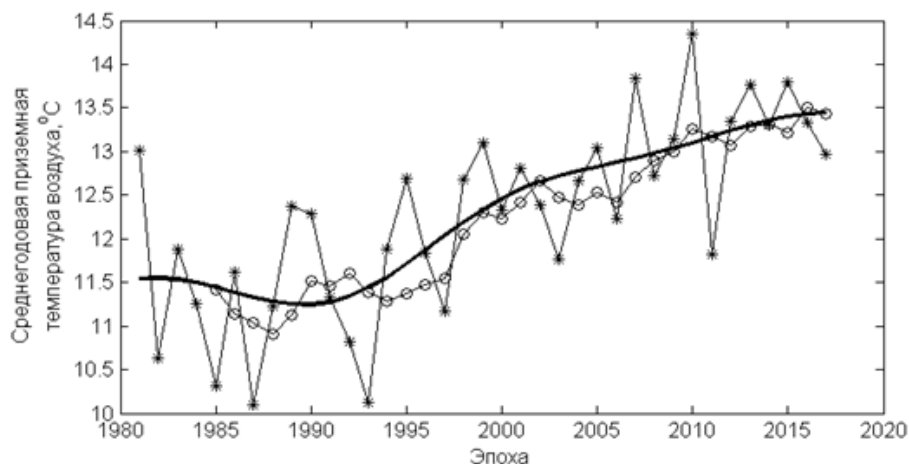


Рис. 3. Графики данных о приземной среднегодовой температуре воздуха на станции Краснодар: исходные наземные наблюдения (отмечены звездочками); сглаженные методом скользящего среднего на 5-летних интервалах величины (отмечены кружками); сплошная кривая — гладкий нелинейный тренд, получен с помощью вейвлет преобразования исходных данных.

Fig. 3. Graphs of data on the surface mean annual air temperature at Krasnodar station: initial ground observations (marked with asterisks); values smoothed by the moving average method on 5-year intervals (marked with circles); solid curve – smooth nonlinear trend, obtained using the wavelet transform of the original data

Коэффициенты (с 95 % доверительными интервалами), вычисленные по наземным наблюдениям в единицах $^{\circ}\text{C}$, равны:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 12.04 \text{ (11.83, 12.26)}, \\ a_1 &= -1.108 \text{ (-1.289, -0.9273)}, \\ b_1 &= -0.06834 \text{ (-0.5709, 0.4342)}, \\ a_2 &= 0.2561 \text{ (-0.01327, 0.5254)}, \\ b_2 &= 0.2986 \text{ (0.1702, 0.427)}, \\ a_3 &= 0.3104 \text{ (0.2164, 0.4044)}, \\ b_3 &= 0.001608 \text{ (-0.138, 0.1413)}, \\ \nu &= 0.1044 \text{ (0.09735, 0.1114)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a_0 — постоянный член; ν — частота главной гармоники, соответствует периоду 60,18 лет. Оценки точности приближения нелинейного

тренда этой моделью: R квадрат равен 1; среднеквадратическая погрешность ($RMSE$) равна $\pm 6.358 \times 10^{-5} ^\circ\text{C}$.

Аналогичная численная модель получена по данным о космических измерениях среднегодовых температур на станции Краснодар.

5. Заключение

1. Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и в ней исследовать солнечно-планетные связи.

2. Временное осреднение в анализе наблюдений позволяет выделить долговременные колебания, игнорируя влияние кратковременных вариаций и единичных выбросов, которые могут быть рассмотрены отдельно и предсказание которых часто невозможно из-за недостатка знаний о порождающих их явлениях.

3. Анализ отклонений измеренных приземных температур воздуха от модели не обнаруживает долговременной систематической компоненты.

4. Анализ прогноза приземной среднегодовой температуры указывает на постепенное снижение среднегодовой приземной температуры воздуха даже при наличии кратковременных скачков.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта 13.1902.21.0039 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции вне-солнечных планетных систем их характеристик экзопланет» (А.Е.В., Л.Н.В.).

Список литературы

1. Абдусаматов Х. И. Солнце определяет климат Земли. СПб. : Логос, 2009. 197 с.
2. Дайсон Ф. Публичная лекция фонда «Династия», 23 марта 2009 года / Москва, ФИАН ; Институт перспективных исследований, Принстон, Нью-Джерси, США. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elementy.ru/lib/430801> (дата обращения: 20.08.2020).
3. Кокорин А. О. Изменение климата : обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
4. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Геомагнитное поле и климат Кара-Дага : когерентные колебания // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. №3 (27). С. 84—90.

5. Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Обзор внегалактических радиоисточников на длине волны 1,35 см // Изв. Крым. астрофиз. Обсерватории. 1979. Т. 60. С. 3—13.
6. Баренбаум А. А. Мегацикличность геологических процессов и эволюция Галактики. В кн. : Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 1 / Ред. С. Л. Афанасьев, Б. Л. Бери, О. Л. Кузнецов. М. : Ассоциация «Прогнозы и циклы», 1991. С. 27—43.
7. Белов С. В., Шестопалов И. П., Харин Е. П. О взаимосвязях эндогенной активности земли с солнечной и геомагнитной активностью // ДАН. 2009. Т. 428, № 1. С. 104—108.
8. Берри Б. Л. Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины // Вестник МГУ. 1991. Сер. 5, № 1. С. 20—27.
9. Борисенков Е. П., Пасецкий В. М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М. : Мысль, 1988. 522 с.
10. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. М. : Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1996. 188 с.
11. Авсюк Ю. Н. Глобальные изменения среды и климата в сопоставлении с приливной моделью эволюции системы Земля — Луна // В кн. Геофизика на рубеже веков. М. : ГЕОС, 1999. С. 93—106.
12. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2014621485. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (дата обращения: 22.08.2020).
13. Stackhouse P. W. et al. POWER Release 8 (with GIS Applications) Methodology [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/391325308/POWER-Data-v8-Methodology> (дата обращения: 24.08.2020).
14. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Сезонные колебания в наблюдениях параметров солнечной энергии и деформаций земли в Крыму // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 3. С. 253—265.
15. Вольвач А. Е., Якубовская И. В. Исследование солнечной активности радиотелескопами Службы Солнца KRIM // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 3. С. 266—274.
16. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Геомагнитное поле Крыма : изменения отдельных компонентов за период 1900—2014 гг. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 4. С. 331—340.

Информация об авторах

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Курбасова Галина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией геодинамики ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Information about the authors

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBIS “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Galina S. Kurbasova, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

УДК 621.396

Анализ эффективности средств пакета *Scilab* при решении задач оптимизации¹

Семенова Т. И., Шакин В. Н., Фриск В. В., Кудряшова А. Ю.

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

ул. Авиамоторная, 8а, Москва, 111024, Российская Федерация

semtata@yandex.ru, victor.shakin@yandex.ru, frisk@mail.ru, asykka@bk.ru

Получено: 5 октября 2020 г.

Отрецензировано: 13 октября 2020 г.

Принято к публикации: 16 октября 2020 г.

Аннотация: В данной работе рассматриваются решатели *optim*, *fminsearch* и *plot*, включенные в библиотечные функции математического пакета *Scilab*, с точки зрения скорости и трудоемкости их применения при решении задач оптимизации на примерах функций Розенброка различных порядков. Приведен пример использования описанных решателей при расчете электрических цепей, найдено оптимальное значение локального минимума падающего напряжения вдоль длинной линии как функции одной переменной. Сделаны выводы об эффективности применения разных решателей математического пакета *Scilab* для расчетов цепей.

Ключевые слова: математические пакеты, *Scilab*, оптимизация, целевая функция, решатель, функции Розенброка, алгоритм Нелдера — Мида, метод *BFGS*, итерация, критерий эффективности.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Семенова Т. И., Шакин В. Н., Фриск В. В., Кудряшова А. Ю. Анализ эффективности средств пакета *Scilab* при решении задач оптимизации // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 149—161.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Семенова, Т. И. Анализ эффективности средств пакета *Scilab* при решении задач оптимизации / Т. И. Семенова, В. Н. Шакин, В. В. Фриск, А. Ю. Кудряшова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 149—161.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо-2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Analysis of the effectiveness of *Scilab* software tools in solving optimization problems

T. I. Semenova, V. N. Shakin, V. V. Frisk, and A. Y. Kudryashova

Moscow Technical University of Communications and Informatics

8a Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russian Federation

semtata@yandex.ru, victor.shakin@yandex.ru, frisk@mail.ru, asykka@bk.ru

Received: October 5, 2020

Peer-reviewed: October 13, 2020

Accepted: October 16, 2020

Abstract: *This paper considers the optim, fminsearch and nmpplot solvers included in the library functions of the Scilab mathematical software from the point of view of the speed and complexity of their application in solving optimization problems using examples of Rosenbrock functions of various orders. An example of using the described solvers for calculating electrical circuits is given; the optimal value of the local minimum of the falling voltage along a long line as a function of one variable is found. Conclusions are made about the effectiveness of using different solvers of the Scilab mathematical software for circuit calculations.*

Keywords: *mathematical software, Scilab, optimization, objective function, solver, Rosenbrock functions, Nelder–Mead algorithm, BFGS method, iteration, efficiency criterion.*

For citation (IEEE): T. I. Semenova, V. N. Shakin, V. V. Frisk, and A. Y. Kudryashova, “Analysis of the effectiveness of Scilab software tools in solving optimization problems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 149–161. (In Russ.).

1. Введение

Любой исследуемый объект или процесс характеризуется своими конкретными параметрами (размерами, свойствами, показателями). В математическом моделировании взаимосвязь между параметрами описывается функциональными зависимостями. При проектировании рабочего узла конкретного объекта, или даже при организации и управлении производственным процессом, нас интересует наилучший вариант решения проблемы, то есть такой набор значений параметров целевой функции, описывающий моделируемый объект, который обеспечивает, как правило, ее экстремум.

Решение реальной задачи оптимизации далеко не всегда является тривиальной [1]. Это связано с тем, что количество параметров функции может быть достаточно велико, а кроме того на них могут быть наложены ограниче-

ния. Именно поэтому средства решения задач оптимизации включены в программное обеспечение практически всех современных математических пакетов [2, 3, 4]. В статье рассматриваются средства оптимизации математического пакета *Scilab*, современного, мощного, но в тоже время свободно распространяемого на сегодняшний день математического пакета. Они позволяют решать сложные и трудоемкие задачи оптимизации практически за несколько секунд, обеспечивающие при этом требуемую точность вычислений.

2. Основная часть

В пакете *Scilab* для решения задач оптимизации функций предназначен специальный набор средств, которые называются решателями [3]. Под решателем здесь понимается набор функций и алгоритмов, объединенных общим именем, предназначенный для решения конкретной задачи, в данном случае задачи оптимизации. Следует отметить, что некоторые функции, входящие в состав этого класса решателей, имеют и самостоятельное назначение (например, функция *costf*, предназначенная для вычисления производных).

В *Scilab* имеется несколько решателей, предназначенных для решения задач оптимизации. Каждый из них на выходе позволяет получить набор значений аргументов целевой функции, при которых она достигает своего оптимального значения. Кроме того, каждый решатель имеет и свой дополнительный (необязательный) набор параметров, по которым можно судить об успешном окончании процесса оптимизации, количестве итераций, количестве обращений к функции и многое другое. Исследование значений этих параметров и позволяет оценить эффективность применения решателя при решении конкретной задачи.

Исследования эффективности применения трех наиболее часто используемых решателей (*optim*, *fminsearch* и *nmplot*) были проведены на примере функций Розенброка от одной, двух и пяти переменных, которые являются тестовыми функциями для многих методов оптимизации:

$$f(x) = (x - 1)^2 \quad (1)$$

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (2)$$

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (x_1 - 1)^2 + 100(x_5 - x_4)^2 + (x_4 - 1)^2 \quad (3)$$

Отметим, что функция Розенброка относится к разряду овражных функций, для которых результат поиска сильно зависит от выбора началь-

ных условий, поэтому целевую функцию целесообразно предварительно исследовать (аналитически, таблично или графически). Так, например, для функции Розенброка от двух переменных $f(x_1, x_2)$ можно построить график линий уровней [5], где в качестве начального приближения можно взять точку, расположенную на линии уровня, отмеченную наименьшим значением функции, например, с координатами $(0,0)$, что представлено на рисунке 1.

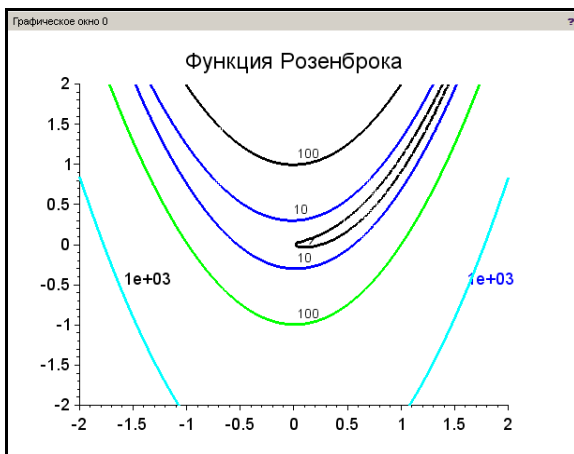


Рис. 1. Графическое представление линий уровня функции Розенброка от двух переменных.

Fig. 1. Graphical representation of the level lines of the Rosenbrock function in two variables

Optim — это решатель, предназначенный для решения задач как условной, так и безусловной нелинейной оптимизации. В основу алгоритмов этого решателя положены квази-ньютоновские методы. Эти методы представляют собой смешанную процедуру поиска с использованием квадратичного или кубического полиномов и алгоритм BFGS для аппроксимации и корректировки гессиана. Решатель *optim* использует внешнюю функцию *cost*, которая позволяет вычислять гессиан даже в тех случаях, когда вторые частные производные аналитически получить достаточно проблематично. Общий формат решателя *optim* имеет следующий вид:

$$[fopt, xopt [, gopt, work, iters, evals, err], ti, td] = optim(costf, x0, <contr>, algo, ...)$$

Обязательными входными параметрами решателя являются: *costf* — функция, которая вычисляет значение функции в точке x и находит направление градиента и x_0 — вектор начальных значений аргументов функции (начальная точка поиска). К необязательным входным параметрам относятся: *<contr>* — список параметров, содержащий границы изме-

нения переменных, *algo* — строка, фиксирующая используемые алгоритмы и т. д. [4]. Каждый алгоритм, реализованный в *optim*, имеет свои собственные критерии завершения, которые используют параметры, полученные от пользователя. При использовании входных параметров, представляющих собой списки, требуется предварительная настройка.

Очевидно, что представляющими интерес для пользователя выходными параметрами являются: *fopt* — значение целевой функции в точке оптимума, *hopt* — вектор аргументов, обеспечивших оптимальное значение функции и *gopt* — градиент целевой функции в точке *hopt*. Такие выходные параметры как *ti* — количество итераций, *td* — количество обращений к целевой функции и многие другие [4] используются в основном более узкими специалистами.

В основу решателя *fminsearch* положен алгоритм Нелдера — Мида, основанный на обновлении симплекса, представляющего собой набор из $k \geq n + 1$ вершин (n — количество переменных), где каждая вершина связана с одной точкой и одним значением функции. Общий вид формата решателя *fminsearch* [3]:

$$[optx, optf, exitflag, output] = fminsearch(costf, x0, options)$$

Входными параметрами решателя являются: *costf* — функция, которая вычисляет значение функции в точке x и находит направление градиента; x_0 — вектор начальных значений аргументов функции (начальная точка поиска); *options* — является списком необязательных настроек. В этот список входят такие параметры как: *options.MaxIter* — максимальное количество итераций, *options.MaxFunEvals* — максимальное количество оценок целевой функции, *options.TolX* — абсолютный допуск на симплекс размер и многие другие важные настройки.

Возвращаемые значения параметров: *optx* — вектор значений переменных, при которых достигается оптимум функции; *fval* — значение функции для набора найденных значений аргументов; *exitflag* — флаг причины остановки оптимизации; *output* — структура, хранящая подробную информацию о выходе из алгоритма, где в качестве причины остановки вычислений выводится: -1 — достигнуто максимальное количество итераций, 0 — достигнуто ограничение по количеству итераций или 1 — найдено решение в пределах погрешности.

Кроме описанных выше решателей *optim* и *fminsearch*, в *Scilab* интерес представляет и решатель *nmplot* [3], который использует алгоритмы

оптимизации прямого поиска и включает несколько методов оптимизации прямого поиска, основанных на симплексном методе. При этом всю информацию о процессе оптимизации на каждой итерации можно отобразить на экране или сохранить в файлах для их последующего анализа. Этими данными могут быть: значения координат симплекса; значения функции, усредненные по вершинам; минимальные значения функции в симплексе; размеры симплекса.

На рисунке 2 приведен пример графической траектории поиска минимума функции Розенброка от двух переменных с использованием решателя *nmplot*. Здесь выбор направления спуска определяется симплексом. Отметим, что самые большие изменения в значении функции происходят на первых итерациях, что характерно для всех градиентных методов. Подробно пример использования решателя *nmplot* рассмотрен в [3].

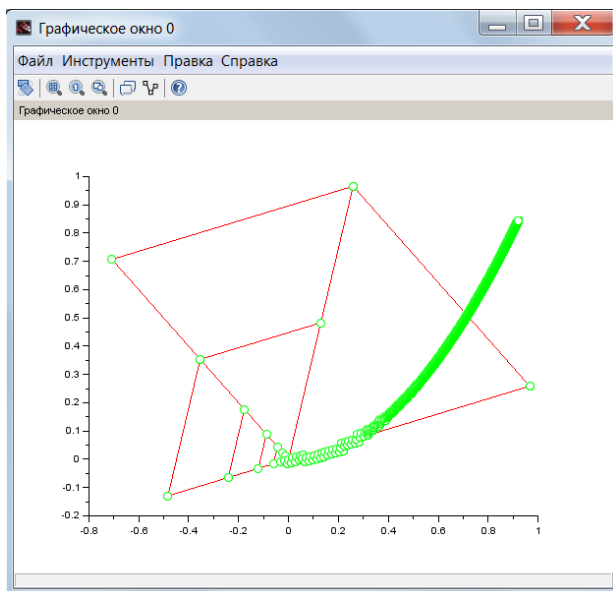


Рис. 2. Траектория спуска поиска минимума функции от двух переменных с использованием решателя *nmplot*.

Fig. 2. Descent trajectory of finding the minimum of a function of two variables using the *nmplot* solver

В качестве простейшего примера рассмотрим простую задачу одномерного поиска, часто встречающуюся в электрических цепях: найти угловую частоту ω , при которой полное сопротивление последовательного колебательного *RLC*-контура минимально, схема представлена на рисунке 3.

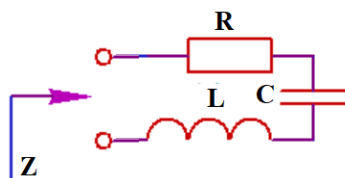


Рис. 3. Схема последовательного колебательного RLC -контура.

Fig. 3. Diagram of a series-oscillating RLC circuit

Функция полного сопротивления $Z(\omega)$, как известно из теории электрических цепей [6, 7], будет следующей:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4)$$

Здесь $Z(\omega)$ — функция полного сопротивления RLC -контура; ω — угловая частота; R — сопротивление контура; L — индуктивность контура; C — емкость контура.

Ниже рисунке 4 приведен программный код для построения графика функции полного сопротивления $Z(\omega)$ от угловой частоты $\omega = [0,05 \ 0,5]$ рад/с при $L=10$ Гн, $C = 10$ Ф и $R = 0,5$ Ом, а также вычисление оптимального значения частоты $\omega_{\min}$ и значения комплексного сопротивления двумя методами оптимизации (*optim* и *fminsearch*) при $\omega_0=0,005$. Сам график представлен на рисунке 5.

С использованием описанных выше решателей также были получены оптимальные значения функций Розенброка от одной, двух и пяти переменных. За начальные значения параметров для всех функций были приняты равные нулю значения. Время выполнения поиска минимума функций получены с использованием команд включения и выключения таймера (*t1c* и *t1oc*), добавленные в вычисление соответственно до и после обращения к решателям. Для получения значений количества итераций и количества обращений к целевой функции для каждого решателя был использован расширенный параметр, позволяющий получить эти показатели в качестве выходных параметров. За точность вычислений оптимума принят порог по градиентной норме, по умолчанию равный $\%eps = 2.2 \cdot 10^{-16}$. Информация представлена в таблице 1.

По результатам расчета можно сделать вывод, что по всем значениям показателей, приведенных в таблице 1, решатели *fminsearch* и *nplot* проигрывают решателю *optim*. Однако, несмотря на это, решатели *fminsearch* и *nplot* имеют множество таких полезных свойств как: вывод

```

1 // График полного сопротивления последовательного RLC-контура
2 // Исходные данные
3 L = 10; // Индуктивность, Гн
4 C = 10; // Емкость, Фр
5 R = 0.5; // Сопротивление, Ом
6 // Диапазон изменения угловой частоты, рад/с
7 w=[0.05:0.001:0.5];
8 Z = sqrt(R^2+(w*L-1./(w*C)).^2); // Полное сопротивление, Ом
9
10 plot(w,Z) // Построение графика
11 // Подписи графика и осей
12 xtitle("Полное сопротивление последовательного RLC-контура", "w, рад/с", "Z(w), Ом")
13 xgrid // Координатная сетка
14 // Поиск минимума угловой частоты, при которой наблюдается
15 // минимум полного сопротивления последовательного RLC-контура
1 function Z = costf(w)
2 funcprot(0)
3 // Исходные данные
4 L = 10; // Индуктивность, Гн
5 C = 10; // Емкость, Фр
6 R = 0.5; // Сопротивление, Ом
7 Z = sqrt(R^2+(w*L-1./(w*C)).^2); // Функция полного сопротивления
8 endfunction
24 // Описание целевой функции
1 function y = Z(w)
2 funcprot(0)
3 // Исходные данные
4 L = 10; // Индуктивность, Гн
5 C = 10; // Емкость, Фр
6 R = 0.5; // Сопротивление, Ом
7 y = sqrt(R^2+(w*L-1./(w*C)).^2); // Функция полного сопротивления
8 endfunction
33 // Функция, вычисляющая целевую функцию и ее производную в заданной точке
1 function [ff,g,int] = costf(w, int)
2 ff = Z(w)
3 g = numerivative(Z, w)
4 endfunction
38 [Zmin, Wmin] = optim(costf, w0); // Обращение к функции optim
39 mprintf('Результат функции optim: Zmin=%g, Wmin=%g', Zmin, Wmin);
40 [Wmin, Zmin, output] = fminsearch(costf, w0); // Обращение к функции fminsearch
41 mprintf('Результат функции fminsearch: Zmin=%g, Wmin=%g\n', Zmin, Wmin)
42 //endfunction
43

```

Рис. 4. Вычисление оптимального значения частоты и значения комплексного сопротивления решателями *optim* и *fminsearch*.

Fig. 4. Calculation of the optimal frequency and complex impedance using the *optim* and *fminsearch* solvers

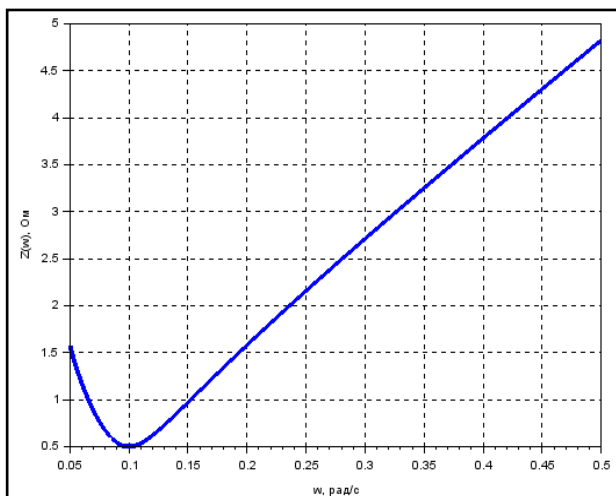


Рис. 5. График функции полного сопротивления $Z(\omega)$ от угловой частоты ω .

Fig. 5. Graph of the impedance function $Z(\omega)$ versus the angular frequency ω

Табл. 1. Оптимальные значения функций Розенберка

Решатель	Количество переменных в функции	Количество итераций	Количество обращений к целевой функции	Время (сек.)
optim	1	2	4	0.043
	2	20	27	0.084
	5	34	49	0.138
fminsearch	1	20	40	0.894
	2	67	124	2.675
	5	302	492	11.578
nmplot	1	39	78	8.127
	2	358	642	11.256
	5	1332	2674	50.117

графиков и возможность получения на каждой итерации подробной информации о множестве числовых показателей, отражающих состояние процесса оптимизации. При этом стоит отметить, что решатель *fminsearch* отличается простотой настройки параметров.

Таким образом, в случаях, если перед пользователем пакета *Scilab* стоит задача нахождения только координат точки экстремума функции, целесообразнее использовать решатель *optim*, поскольку очевидно, что он эффективнее с точки зрения времени выполнения поиска, а его базовые настройки вполне подходят под большинство функций [5]. Если же необходимо иметь информацию о промежуточных результатах, получить графическую интерпретацию процесса оптимизации, то есть получить полную картину, позволяющую проанализировать данные в процессе оптимизации функции, целесообразнее использовать решатели *fminsearch* или *nmplot*.

В качестве примера оптимизационной задачи рассмотрим поиск локального минимума величины напряжения как функции одной переменной.

Проведем анализ распределения падающей волны напряжения вдоль длинной линии, схема показана на рисунке 6.

Функция напряжения $u(x)$ от координаты x выражается формулой:

$$u(x) = U_m e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi) \quad (5)$$

где $U_m = 1$ В — амплитуда;

$\alpha = 0,11/\text{м}$ — коэффициент ослабления;

$\beta = 0,1$ рад/м — коэффициент фазы;
 $l = 5$ м — длина линии;
 $\omega = 1$ рад/с — угловая частота;
 $t = 5$ с — фиксированный момент времени;
 $\psi = 0$ рад — фаза.

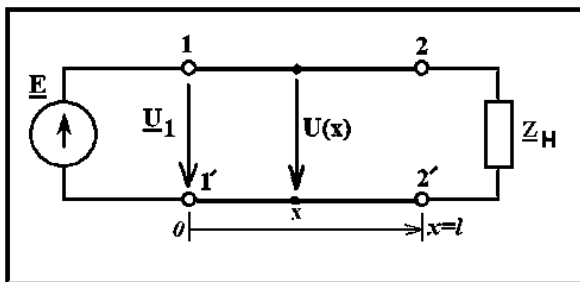


Рис. 6. Схема длинной линии.

Fig. 6. Long line diagram

На рисунке 7 приведена программа для построения графика падающего напряжения вдоль длинной линии $u(x)$ от координаты x . На рисунке 8 представлен график распределения мгновенного напряжения падающей волны вдоль длинной линии, из которого видно, что функция мощности имеет минимум в районе точки 2,4 м.

```

--> // Incident wave
--> // Initial data
--> a=0.1; // Coefficient of attenuation, Ohm
--> b=2.6; // Phase ratio, rad/m
--> Um=1; // Amplitude, V
--> l=5; // Line length m
--> w=1; // Angular frequency, rad/s
--> t=5; // Fixed time, s
--> // Coordinate x, m
--> x=[2:l/100:l];
--> // Incident wave, V
--> u=Um*exp(-a*x).*sin(w*t-b*x);
--> // Schedule
--> plot(x,u)
--> // Graph and axis captions
--> xtitle("Incident wave along a long line","x, m","u(x), V")
--> xgrid // Coordinate grid
  
```

Рис. 7. Программа для построения графика падающего напряжения вдоль длинной линии $u(x)$ от координаты x .Fig. 7. Program for plotting the voltage drop along the long line $u(x)$ from the x coordinate

Для нахождения более точного значения координаты x , при которой наблюдается минимум напряжения, воспользуемся, описанными выше решателями *optim* и *fminsearch*. Программа для уточнения оптимальной координаты x_0 и полученные результаты ее выполнения приведена на рисунке 9.

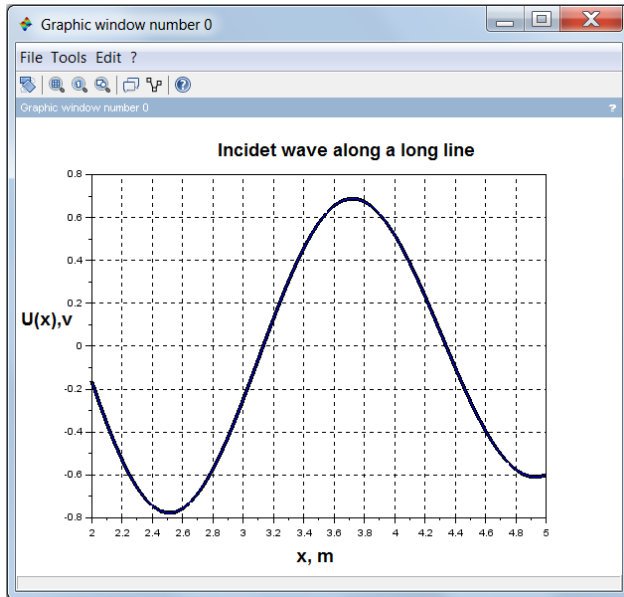


Рис. 8. График падающего напряжения вдоль длинной линии $u(x)$ от координаты x .

Fig. 8. Graph of the voltage drop along the long line $u(x)$ from the x coordinate

```
--> // Search for the coordinates at which
--> // minimum voltage of the incident wave
--> function U=costf(x)
> funcprot(0)
> // Initial data
> a=0.1; // Coefficient of attenuation, Ohm
> b=2.6; // Phase ratio, rad/m
> Um=1; // Amplitude, V
> l=5; // Line length m
> w=1; // Angular frequency, rad/s
> t=5; // Fixed time, s
> U=Um*exp(-a*x).*sin(w*t-b*x); // Incident wave, V
> endfunction
-->
--> x0=[2.4]; // initial approximation x0, m
--> //The coordinate at which u(x0)->min
--> [x0 Umin]=fminsearch(costf,x0);
--> mprintf('Result of the fminsearch function:x0=%g Umin=%g',x0,Umin)
-->
--> //The coordinate at which u (x0) -> min
--> [x0 Umin]=optim(costf,x0);
--> mprintf('Result of the optim function:x0=%g Umin=%g',x0,Umin)

The result of the fminsearch function:
x0 = 2.5124414 Umin = -0.7772576

The result of the function optim:
x0 = 2.5124414 Umin = -0.7772576
```

Рис. 9. Программа для уточнения оптимальной координаты x_0 и полученные результаты ее выполнения.

Fig. 9. Program for specifying the optimal coordinate x_0 and the results of its implementation

Оба решателя дали один и тот же результат, а расчет показал, что минимум падающего напряжения будет равен $U_{\min} = -0.7772576$ В при $x_0 = 2.5124414$ м, что полностью согласуется с теорией электрических цепей [7, 8].

3. Заключение

Таким образом, на примере решения задачи из области электротехники удалось установить, что программный продукт *Scilab* предоставляет все функциональные возможности, необходимые пользователю для решения таких задач.

При решении с использованием ручных расчетов время, затрачиваемое на поиск решения проблемы, увеличится в десять раз. При проектировании рабочего блока того или иного объекта или даже при организации и управлении производственным процессом такое увеличение времени на поиск решения весьма критично. Современное программное обеспечение *Scilab* позволяет решать сложные и трудоемкие задачи оптимизации за несколько секунд, обеспечивая при этом требуемую точность вычислений. Таким образом, этот программный продукт может быть использован для решения сложных задач оптимизации в производстве.

В дальнейших исследованиях можно сравнить скорость и удобство решения задач оптимизации в различных программных системах, таких как *Matlab*, *Silab* и *Octav*.

Список литературы

1. Семенова Т. И., Кравченко О. М., Шакин В. Н. Вычислительные модели и алгоритмы решения задач численными методами : учебное пособие. М. : МТУСИ, 2017. 82 с.
2. Семенова Т. И., Загвоздкина А. В., Загвоздкин В. А. Изучение численных методов с использованием средств пакета Scilab // Экономика и качество систем связи. 2017. № 4 (6). С. 60—69.
3. Документация Scilab [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://help.scilab.org/docs/6.0.1/ru_RU/index.html <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/5/text.pdf> (дата обращения: 14.01.2020).
4. Шакин В. Н., Семенова Т. И., Фриск В. В. Базовые средства математического пакета Scilab. Учебник для вузов. М. : Горячая линия — Телеком, 2019. 336 с.
5. Семенова Т. И., Загвоздкина А. В., Загвоздкин В. А. Визуализация результатов вычислений в Scilab // Информатика и кибернетика. 2018. № 4 (14). С. 5—11.
6. Фриск В. В. Основы теории цепей. М. : РадиоСофт, 2002. 288 с.
7. Смирнов Н. И., Фриск В. В. Теория электрических цепей. Учебник для вузов. М. : Горячая линия — Телеком, 2019. 286 с.
8. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Evaluation program of an efficient source coding algorithm under the condition of converting metric spaces // В сб. : 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. С. 8840609.

Информация об авторах

Кудряшова Анастасия Юрьевна, аспирант, ассистент кафедры общей теории связи Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3673-7667.

Семенова Татьяна Игоревна, к. т. н., доцент кафедры информатики Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация.

Шакин Виктор Николаевич, к. т. н., доцент кафедры информатики Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация.

Фриск Валерий Владимирович, к. т. н., доцент кафедры теории электрических цепей Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Anastasiya Y. Kudryashova, graduate student, assistant at the Department of General Theory of Communications, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-3673-7667.

Tatyana I. Semyonova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation.

Viktor N. Shakin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation.

Valery V. Frisk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theory of Electrical Circuits, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation.

УДК 621.396.41

Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток¹

Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

г. Томск, 634050, Российская Федерация

dvp15@sibmail.com, dvd012@mail.ru, erofeev_dv@mail.ru

Получено: 24 июля 2020 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 16 октября 2020 г.

Аннотация: Показано, что угловое разрешение источников сигналов в фазовых пеленгаторах с антенными системами в виде линейных решеток из слабонаправленных элементов может быть получено путем определения для каждого из источников своего набора полных периодов разностей фаз, утраченных при измерениях. Показано, что метод максимального правдоподобия, развитый для оценки угла прихода одного сигнала, пригоден для углового разрешения сигналов. Показана общность оснований для углового разрешения методом максимального правдоподобия и методом «суммирования косинусов». Даны оценки точности пеленгования принимаемых сигналов.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, устранение неоднозначности, метод «суммирования косинусов», разрешающая способность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 162—170.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Денисов, В. П. Угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин, Д. В. Ерофеев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 162—170.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Angular resolution of phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays

V. P. Denisov, D. V. Dubinin, and D. V. Erofeev
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
Tomsk, 634050, Russian Federation
dvp15@sibmail.com, dvd012@mail.ru, erofeev_dv@mail.ru

Received: July 24, 2020

Peer-reviewed: September 13, 2020

Accepted: October 16, 2020

Abstract: *It is shown that the angular resolution of signal sources in phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays of weakly directed elements can be obtained by determining for each of its sources a set of complete periods of phase differences lost during measurements. It is shown that the maximum likelihood method developed to estimate the angle of arrival of a single signal is suitable for angular resolution of signals. The common grounds for angular resolution are shown by the maximum likelihood method and the “cosine summation” method. Estimates of the accuracy of direction finding of received signals.*

Keywords: *phase direction finder, elimination of ambiguity, method of “cosine summation”, resolution.*

For citation (IEEE): V. P. Denisov, D. V. Dubinin, and D. V. Erofeev, “Angular resolution of phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 162—170. (In Russ.).

1. Введение

Рассматривается угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов, то есть способность одновременно пеленговать два или более источника радиоизлучения. Фазовый пеленгатор понимается в традиционном смысле [1]. Предполагается, что элементы антенной системы слабонаправленные, так что могут одновременно принимать сигналы из широкого углового сектора. Фазовые пеленгаторы применяются в радиоастрономии, радионавигации [2], радиолокации, системах радиоэлектронной борьбы [3, 4].

В фазовых пеленгаторах с антенными системами из слабонаправленных элементов разрешение неоднозначности фазовых измерений производится путем применения ряда разнесенных антенн и последующей обработки совокупности измеренных разностей фаз. Схожесть терминов «угловое

разрешение» и «разрешение неоднозначности измерений» заставляет нас подчеркнуть, что предмет рассмотрения статьи — угловая разрешающая способность. Вопросы угловой разрешающей способности радиопеленгаторов с антенными решетками широко обсуждаются в литературе, причем акценты делаются на сверхразрешение [5]. Для реализации такой возможности приемные тракты должны быть линейными. В фазовых пеленгаторах линейность приемных трактов не требуется. Кроме того, фазовые пеленгаторы беспойсковые по углу. Указанные особенности приводят к их широкому применению в системах радиоэлектронной борьбы. Реально угловое разрешение проявляется в способности пеленгования сигналов, одновременно попадающих в полосу пропускания приемника.

2. Теория и моделирование

Предположим, что антенная система пеленгатора представляет собой линейную решетку из N элементов и на ней образовано $n = N - 1$ фазометрических баз, как показано на рис. 1. Если на входе пеленгатора одна плоская волна, а фазовые погрешности на базах независимы и имеют равные дисперсии σ_φ^2 , плотность распределения вероятностей совокупности n измеренных разностей фаз, которую далее будем рассматривать как функцию правдоподобия параметра $v = \sin \alpha$, имеет вид [6]

$$L_\varphi(v) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\varphi^2}} \right)^2 \cdot \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i + k_i - n_{xi}v)^2}{2\sigma_\varphi^2} \right\}, \quad (1)$$

где φ_i — измеренная разность фаз на базе l_i , выраженная в рад/ 2π , k — целое число периодов разности фаз, утраченное при измерениях, n — число фазометрических баз, $n_{xi} = l_i / \lambda$.

Решая уравнение правдоподобия, получаем [6]:

$$v = \sum_{i=1}^n q_i \Phi_i = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + 2\pi k_i), \quad (2)$$

где $v = \sin \alpha$ — направляющий косинус приходящей волны по отношению к оси x (рис. 1), Φ_i — полная разность фаз на базе l_i , $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ — вектор весов, зависящий от структуры антенной системы.

Предположим, что на антенную систему приходят сигналы от двух (или более) источников радиоизлучения (ИРИ). Они создают единую совокупность измеренных разностей фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Вычисление направляющего косинуса каждой из волн возможно по формуле (2) за счет опре-

деления для каждой из них своего набора полных периодов разностей фаз на фазометрических базах $k_1, k_2, \dots, k_n$. Это положение является основой для рассматриваемого ниже алгоритма. Направляющие косинусы каждой из волн при таком походе определяются с некоторой ошибкой.

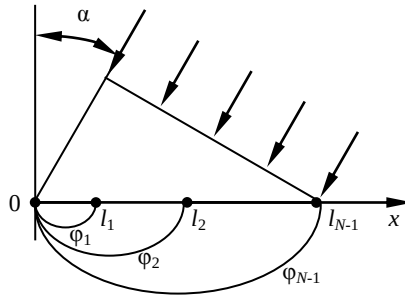


Рис. 1. Антенная система фазового радиопеленгатора.

Fig. 1. Antenna system of phase direction finder

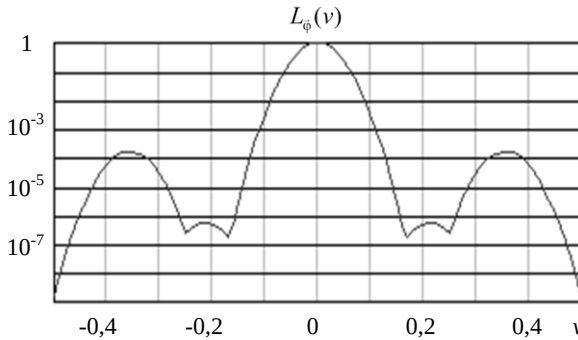


Рис. 2. Функции правдоподобия (4), $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$.

Fig. 2. Likelihood function (4), $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$

Применим метод максимального правдоподобия к ситуации, когда на входе пеленгатора присутствует две плоские волны, так что разность фаз на базах определяется формулой [6]

$$\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} l_i v_1 + \arctg \frac{2R \sin \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}, \quad (3)$$

где $v_1 = \sin \alpha_1$, α_1 — угол прихода первой волны, $v_2 = \sin \alpha_2$, α_2 — угол прихода второй волны, R — отношение амплитуд волн, γ — разность фаз приходящих волн на опорной антенне.

Запишем функцию правдоподобия направляющего косинуса более сильного сигнала v_1 , считая направляющий косинус второго сигнала, разность фаз сигналов γ и отношение амплитуд R фиксированными параметрами. Получим

$$L_{\varphi}(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2} \cdot \sum_{i=1}^n (n_{xi} v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i - [n_{xi} v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i])^2 \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta\Phi_i$ — второе слагаемое формулы (3), символ $[\bullet]$ означает округление до ближайшего целого.

На рис. 2 приведен пример расчета функции правдоподобия (4), выполненный для частного случая в среде MathCAD.

Видно, что графики имеют четкие экстремумы, соответствующие положению целей. В обоих случаях экстремумы значительно превышают боковые лепестки функции правдоподобия, сигналы разрешаются. Таким образом, метод максимального правдоподобия, оптимальный для оценки угла прихода единственного сигнала на входе пеленгатора, оказался работоспособным и для случая, когда сигналов два и способен их разрешать.

К сожалению, функция правдоподобия (4) зависит от разности фаз интерферирующих волн γ . Разрешение имеет место при $\gamma = 0$ и проблематично при других γ . Выходом из положения является усреднение функции правдоподобия по разности фаз γ , считая ее случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $\pm \pi$. Моделирование показало, что в этом случае сигналы разрешаются, так же как при $\gamma = 0$. Предположение о равномерном распределении разности фаз соответствует разрешению некогерентных сигналов, что обычно рассматривается в теории [1].

Приведенные выкладки и графики показывают принципиальную возможность использования функции правдоподобия более сильного сигнала для углового разрешения. Однако достаточно быстродействующий алгоритм практической реализации такой возможности пока не разработан.

Покажем, что некоторые характеристики разрешения сигналов на основе функции правдоподобия близки к получаемым при обработке сигналов методом «суммирования косинусоид» [7]. Его разрешающая способность рассмотрена в статье [8], а пример практической реализации с учетом необходимости усреднения по разности начальных фаз γ — в монографии [6].

При наличии на входе пеленгатора одной волны пеленг находится по максимуму суммы

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos(2\pi \cdot n_{xi} v - \varphi_i), \quad (5)$$

где φ_i — разность фаз на i -й базе.

Функция правдоподобия $L_{\varphi}(v)$ и «сумма косинусоид» имеют одинаковую структуру. Действительно, если $\varphi_i = 0$, то с учетом неоднозначности фазовых измерений сомножители функции правдоподобия (1) выражаются формулой

$$y(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2} (n_{xi} v_1 - [n_{xi} v_1])^2 \right\} \quad (6)$$

На рис. 3а показано изменение сомножителей в зависимости от v_1 , на рис. 3б — одно из гармонических слагаемых функции (5) соответствующего масштаба

$$S_1(v_1) = A_0 \cdot \cos(2\pi \cdot n_{x1} v_1). \quad (7)$$

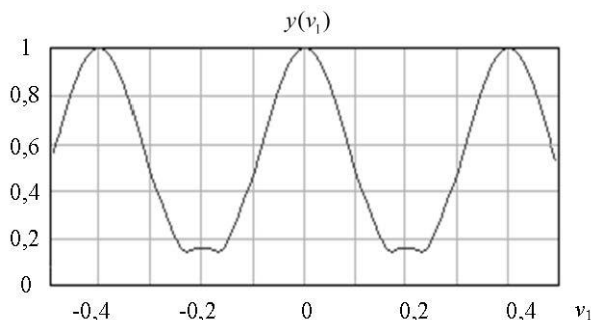
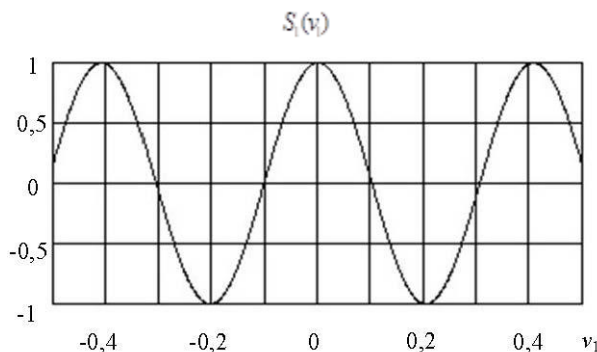


Рис. 3а. Один из сомножителей функции правдоподобия (7) $n_{x3} = 3$.

Fig. 3a. One of the factors of the likelihood function (7) $n_{x3} = 3$

Различие в области минимумов весьма значительно. Вместе с тем положение целей определяется по максимумам функций, которые формируются похожими компонентами и расположены в одних и тех же точках на оси v_1 .

Поэтому по данным, полученным с помощью «суммы косинусоид» можно судить о характеристиках разрешения методом максимального правдоподобия и точности пеленгования.

Рис. 3б. Одно из гармонических слагаемых функции (7) $n_{x3} = 3$.Fig. 3b. One of the harmonic terms of a function (7) $n_{x3} = 3$

В статье [9] показано, что если на входе пеленгатора два сигнала и $\gamma = 0$ «сумма косинусоид» представима в виде

$$S_{\phi}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{(1-R)[\cos[\pi x_i(v-v_1)] + R \cos[\pi x_i(v-v_2)]]}{\sqrt{B(i)}} \quad (8)$$

где

$$B(i) = 1 + R^4 + 4R^2 \cos^2[\pi x_i(v_2 - v_1) + \gamma] + 2R^2 \cos[2\pi x_i(v_2 - v_1)] + \\ 4(R^3 + R) \cdot \cos[\pi x_i(v_2 - v_1)] \cdot \cos[\pi x_i(v_2 - v_1) + \gamma] \\ v_1 = \sin \alpha_1, v_2 = \sin \alpha_2, \gamma = 0$$

Видно, что $S_{\phi}(v)$ представляет собой сумму откликов пеленгатора на воздействия «сильной» и «слабой» целей, различающихся лишь параметром v_i . Если главный максимум отклика «слабой» цели расположен в точке максимума (минимума) «сильной», то его побочный максимум (минимум) совпадает с главным максимумом «сильной». Положение главных максимумов «сильной» и «слабой» целей при этом не изменяется. Ошибок пеленгования нет. Это положение имеет место и при пеленговании некогерентных сигналов по усредненному значению $S_{\phi}(v)$.

На рис.4 показаны погрешности пеленгования «сильной» и «слабой» целей $v_{\text{изм}} - v_{\text{ист}}$ в зависимости от положения последней для одиннадцатизначного пеленгатора $\mathbf{n}_x = (1, 2, \dots, 11)$. Видно, что при расположении «слабой» цели в максимумах и минимумах кривой $S_{\phi}(v)$ (10) погрешности пеленгования равны нулю. Они максимальны в середине интервала между ними и при этом не превышают 0,25 интервала однозначного пеленгования по самой большой базе пеленгатора [9].

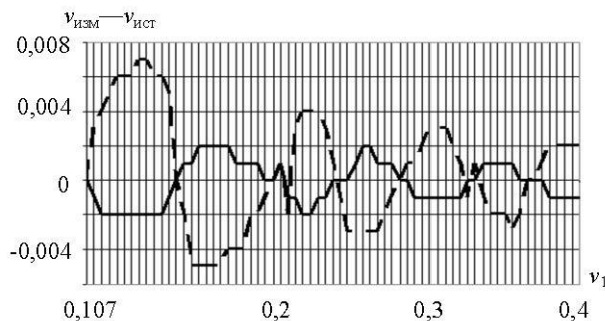


Рис. 4. Погрешности пеленгования целей:
 — — «сильная»; - - - - «слабая».

Fig. 4. Target finding errors:
 — — “strong” - - - - “weak”

3. Заключение

Основные результаты данной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что при наличии на входе фазового радиопеленгатора с антенной системой в виде линейной решетки двух плоских волн их угловое разрешение возможно на основе сопоставления каждой из них своей совокупности полных разностей фаз, утраченных при измерениях. Таким образом, угловое разрешение в фазовых радиопеленгаторах тесно связано с устранением неоднозначности фазовых измерений.

2. Показано, что при наличии на входе пеленгатора двух плоских волн функция правдоподобия более сильного из них может использоваться для углового разрешения. Если волны не когерентны, требуется усреднение функции правдоподобия по разности фаз принимаемых волн.

3. Проведен сравнительный анализ углового разрешения на основе функции правдоподобия и методом «суммирования косинусоид». В основе каждого из алгоритмов лежат похожие функции, поэтому относительно просто реализуемый метод «суммирования косинусоид» можно использовать для оценки характеристик разрешения методом максимального правдоподобия.

4. Оценена точность пеленгования более «слабой» цели, которая, как известно, в нелинейной системе давится более сильной. Показано, что в эквидистантных решетках максимальная ошибка пеленгования не превосходит 1/4 интервала однозначного пеленгования по самой большой фазометрической базе.

Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию Минобрнауки РФ № FEWM-2020-0039.

Список литературы

1. Дулевич В. Е., Коростелева А. А., Ключев Н. Ф., Мельник Ю. А. и др. Теоретические основы радиолокации : Учебн. пособие для вузов. 2-е изд. М. : Сов. радио, 1978. 608 с.
2. Фатеев Ю. Л. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Исследовано в России. 2004. № 70. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.ru/articles/2004/071.pdf> (дата обращения 10.04.20).
3. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка. М. : Военное издательство, 2006. 454 с.
4. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М. : Вузовская книга, 2011. 800 с.
5. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М. : Радио и связь, 2003. 200 с.
6. Денисов В. П., Дубинин Д. В. Фазовые радиопеленгаторы. Томск : ТУСУР, 2002. 251 с.
7. Белов В. И. Теория фазовых измерительных систем. Томск: ТУСУР, 1994. 102 с.
8. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20, № 4. С. 11—16.
9. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Анализ разрешающей способности обзорных фазовых радиопеленгаторов // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 1. С. 7—13.

Информация об авторах

Денисов Вадим Прокопьевич, д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Дубинин Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Ерофеев Денис Вадимович, аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Denisov Vadim Prokopyevich, dr. sciences, professor of the dept radio engineering systems of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Dmitry Dubinin, cand. tech. sciences, associate professor of the dept radio electronics and information protection of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Erofeev Denis Vadimovich, postgraduate student of the dept. of radio engineering systems of TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

УДК 621.396.96

Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов¹

¹ Синицын Е. А., ² Фридман Л. Б.

¹ НТЦ АО «Челябинский радиозавод “Полет”»

ул. Курчатова, 9, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация
esinit@yandex.ru

² ООО «НПК “ТИМ”»

пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru

Получено: 5 мая 2020 г.

Отрецензировано: 10 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 15 сентября 2020 г.

Аннотация: Рассмотрены варианты временной синхронизации современных многопозиционных систем наблюдения (МПСН) летательных аппаратов (ЛА) с помощью различных внутренних и внешних источников единого времени. Приводятся результаты сравнительного анализа особенностей построения и схемотехнической реализации временной синхронизации МПСН, основанных на использовании синхронизации разнесенных приемных сенсоров и общего сервера для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, с последующей оценкой параметров положения и движения обнаруженных ЛА. Показаны основные недостатки и достоинства вариантов временной синхронизации МПСН. Предлагается использование дополнительного канала приема и обработки телевизионных сигналов, излучаемых местными телевизионными центрами, что позволяет улучшить качество синхронизации, повысить надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

Ключевые слова: временная синхронизация, многопозиционная система, приемный сенсор, сервер, радиосигнал, совместная обработка, телевизионный сигнал, летательный аппарат, точностные характеристики, контрольный сигнал, часы, эталонный сигнал.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо-2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Синицын Е. А., Фридман Л. Б. Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 171—180.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Синицын, Е. А. Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 171—180.

Features of time synchronization of multilateral aircraft surveillance systems

E. A. Sinitsin¹ and L. B. Fridman²

¹ STC JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”

9, Kurchatova str., S-Petersburg, 194223, Russian Federation

esinit@yandex.ru

² LLC “NPK TIM”

4/1, Shaumyana Ave., S-Petersburg, 195027, Russian Federation

lenya2002@bk.ru

Received: May 5, 2020

Peer-reviewed: September 10, 2020

Accepted: September 15, 2020

Abstract: The variants of time synchronization of modern surveillance multilateration (MLAT) systems with usage of various internal and external sources of a single time are considered. The results of a comparative analysis of the features of construction and circuitry implementation of time synchronization of MLAT are presented. These results are based on the use of synchronization of separated receiving sensors and a shared server for receiving, combining, and joint processing of received sensor signals emitted by the aircraft, with subsequent evaluation of position and parameters of movement of the detected aircrafts. The main disadvantages and advantages of the presented variants of time synchronization of MLAT are shown. The usage of additional channel for receiving and processing of TV signals emitted by local TV centers, which can improve the quality of synchronization, increase the reliability, as well as the accuracy characteristics of MLAT is proposed.

Keywords: time synchronization, multilateral system, receiving sensor, server, radio signal, joint processing, television signal, aircraft, accuracy characteristics, control signal, clock, reference signal.

For citation (IEEE): E. A. Sinitsin et al. “Features of time synchronization of multilateral aircraft surveillance systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 171—180, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Многопозиционные системы наблюдения (МПСН) летательных аппаратов (ЛА) относятся к радиотехническим средствам обзора воздушного пространства с разнесенными приемными сенсорами и общим сервером для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, с последующей оценкой параметров положения и движения обнаруженных ЛА путем использования преимущественно разностно-дальномерного метода [1].

Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в МПСН основано на формировании системы уравнений, связывающих координаты источника излучения с координатами точек приема (приемных сенсоров) МПСН и временными задержками распространения сигналов (рис. 1) [2]

$$\begin{aligned}\Delta R_{ij} &= \Delta R_{iM} - \Delta R_{jM} = c(\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c\Delta\tau_{ij}, \\ R_{iM} &= \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}, \\ R_{jM} &= \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2},\end{aligned}\quad (1)$$

где ΔR_{ij} — разность расстояний между ЛА, являющимся источником излучения радиосигнала с оцениваемыми координатами (x_M, y_M, z_M) , и двумя i, j точками расположения приемных сенсоров (ПС) с координатами $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j)$ для приема радиосигнала от ЛА, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N — количество приемных сенсоров, c — скорость света.

Как следует из выражения (1), величина ΔR_{ij} определяется путем оценки разности взаимных временных задержек распространения сигналов $\Delta\tau_{ij} = \tau_{iM} - \tau_{jM}$.

Основной особенностью построения и оценки параметров пространственного положения ЛА в МПСН является привязка сигналов, принимаемых приемными сенсорами, к временным отсчетам датчика единого времени, общего для всех сенсоров (синхронизация сенсоров) и последующее измерение относительной разности времен прихода сигналов в приемные каналы сенсоров с учетом их известного пространственного положения.

В известных МПСН используются разнообразные варианты временной синхронизации приемных сенсоров с помощью различных источников единого времени.

В МПСН временная синхронизация приемных сенсоров обычно выполняется от одного датчика времени (общих часов), формирующего периодические импульсы (метки) времени (рис. 2) [3]. В таких МПСН на

аналого-цифровые преобразователи (АЦП) всех приемных сенсоров подаются одинаковые метки времени высокостабильного генератора, привязывающие (синхронизирующие) идентичные фрагменты сигналов, принимаемых N приемными сенсорами, к единой временной шкале. Общие часы, вырабатывающие единое текущее время, в зависимости от взаимного пространственного расположения сервера и сенсоров могут располагаться как в составе МПЧН на сервере или в одном из приемных сенсоров, так и снаружи МПЧН.

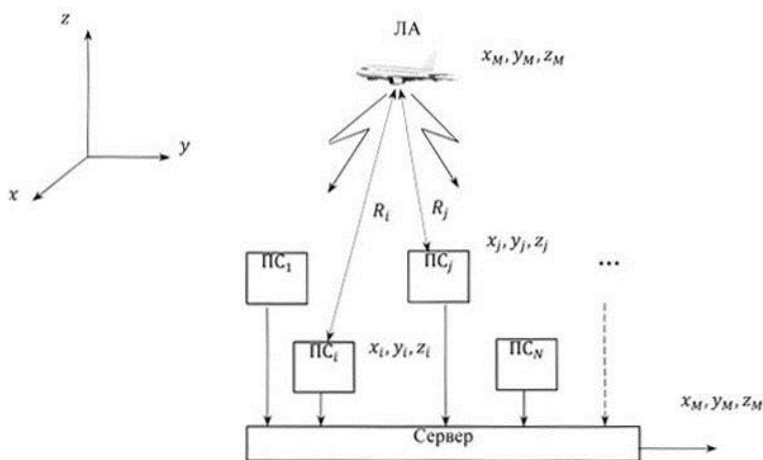


Рис. 1. Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в МПЧН.

Fig. 1. Location finding of a radio source with usage of the difference distance measuring method

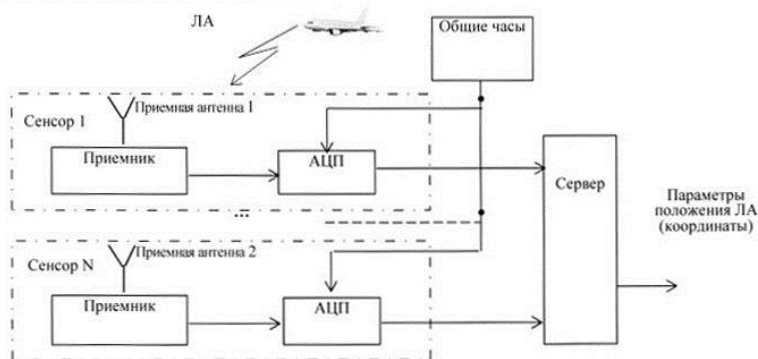


Рис. 2. Временная синхронизация приемных сенсоров МПЧН от общих часов.

Fig. 2. Time synchronisation of the MLAT receiving sensors from the common clocks

Синхронизация от общих часов требует передачи сигнала единого времени по аналоговым или цифровым физическим линиям наземной проводной связи или по каналам воздушной радиосвязи (каналам передачи данных), которые должны без искажений, с известными калиброванными временными задержками (в частном случае, одинаковыми) в реальном времени передать разветвленные сигналы единого времени во все приемные сенсоры. Практическая реализация высокостабильных физических линий передачи аналоговых (цифровых) сигналов с одинаковыми или фиксированными калиброванными временными задержками является сложной технической задачей и требует дополнительных организационно-технических и материальных затрат.

2. Теория

Синхронизация приемных сенсоров МПСН может выполняться без использования общих часов и высокостабильных физических линий передачи сигналов с одинаковыми калиброванными временными задержками, а с помощью внешних эталонных сигналов времени, принимаемых в МПСН по радиоканалу от спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) или GPS [3].

В МПСН для приема спутниковых сигналов устанавливаются дополнительные приемники ГЛОНАСС/GPS с автономными приемными антеннами. Глобальная спутниковая система используется для предоставления общего эталонного сигнала единого времени для каждого из приемных сенсоров. Спутниковые сигналы отличаются высокой точностью и стабильностью системного времени, что является важным фактором для обеспечения точного измерения параметров положения объектов наблюдения.

Синхронизация МПСН с помощью ГЛОНАСС и GPS проще по сравнению с вариантом использования внешних общих часов (рис. 2), так как не требуется установка дополнительного внешнего оборудования, не нужна прокладка каналов связи и не требуется обеспечение одинаковых или фиксированных калиброванных временных задержек передачи сигналов в сенсорах.

Недостатком МПСН, использующих ГЛОНАСС и GPS, является ухудшение и нарушение работоспособности при замираниях спутниковых сигналов, а также появлением мешающих сигналов сторонних РЭС. Другой недостаток — необходимость использования в сенсорах дополнительного оборудования в виде приемников ГЛОНАСС/GPS.

Для устранения указанных недостатков в МПСН может использоваться техническое решение, предусматривающее синхронизацию от контрольного сигнала внешнего передатчика. МПСН состоит из N сенсоров, каждый из которых содержит приемник с приемной антенной, АЦП и местные часы, общий сервер, N входов которого подключены к выходам сенсоров, а также передатчик контрольного сигнала. АЦП приемных сенсоров тактируются идентичными местными часами. В МПСН синхронизация приемных сенсоров обеспечивается без использования внешних общих часов с каналами передачи данных и выполняется по внешнему контрольному сигналу, создаваемому передатчиком контрольного сигнала и направляемому в МПСН по радиоканалу. Передатчик контрольного сигнала устанавливается в зоне расположения МПСН в точке земной поверхности с известными координатами. В сервере выполняется оценка временного положения сигналов, принимаемых от объекта наблюдения сенсорами, относительно контрольного сигнала.

В МПСН контрольный сигнал излучается передатчиком на несущей частоте, совпадающей с несущей частотой радиосигналов, излучаемых обнаруживаемым ЛА, и принимается теми же антеннами приемных сенсоров, на которые поступают радиосигналы от ЛА. Поступление в приемные каналы сенсоров меток времени, маркеров или других идентичных фрагментов контрольного сигнала обеспечивает привязку (синхронизацию) местных часов всех приемных сенсоров к единой временной шкале. Недостатком данного МПСН является необходимость установки и использования дополнительного оборудования — внешнего передатчика контрольного сигнала в пределах прямой видимости приемных сенсоров. Другим недостатком МПСН является то, что при нестабильной работе или выходе передатчика контрольного сигнала из строя, а также при постоянном (временном) затенении передатчика естественными или преднамеренными статичными (движущимися) препятствиями и при воздействии радиопомех работоспособность МПСН нарушается. Возникающая неопределенность в достоверности определения координат ЛА в условиях меняющегося качества работы передатчика, а также меняющейся затеняющей и помеховой обстановки обусловлена тем, что не учитывается значимость исходных данных, т. н. статистический вес при определении координат ЛА, что не позволяет повышать точность системы. Отсутствие возможности использовать взвешенные данные не позволяет также развивать МПСН — повышать ее надежность и точность, присоединяя к ней иные источники получения синхронизирующей информации, например, такие как сигналы телевизионных центров.

При разработке предлагаемого технического решения решается техническая проблема, заключающаяся в создании МПСН, лишенной указанных выше недостатков. Техническим результатом предлагаемого решения является повышение точности, надежности и достоверности функционирования МПСН.

Указанный технический результат достигается тем, что МПСН УВД, содержащая N сенсоров, подключенных к серверу, а также передатчик контрольного сигнала, содержащий формирователь контрольного сигнала и передающее устройство с антенной, снабжена также частотно-разделительным устройством (ЧРУ), подключенным входом к выходу приемной антенны и состоящим из параллельно включенных фильтра нижних частот (ФНЧ) и фильтра высоких частот (ФВЧ), объединенные входы которых являются входом ЧРУ, выход ФВЧ подключен ко входу приемника и является первым выходом ЧРУ, приемником телевизионного сигнала (ТВС), вход которого подключен к выходу ФНЧ, являющемуся вторым выходом ЧРУ, дополнительным АЦП, сигнальный вход которого подключен к выходу приемника ТВС, а тактирующий вход — к выходу местных часов, формирователем строка, вход которого подключен к выходу местных часов, и коммутатором, первый (сигнальный) вход которого подключен к выходу АЦП, второй (сигнальный) вход — к выходу дополнительного АЦП, третий (управляющий) вход — к выходу формирователя строка управления, а выход является выходом сенсора (рис. 3).

Сигналы от передающей антенны обнаруживаемого ЛА и сигналы от передающей антенны 18 передатчика 15 контрольного сигнала принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры высоких частот 13, пропускающие сигналы ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала и блокирующие прохождение телевизионных сигналов, усиливаются в соответствующих приемниках 5, настроенных на согласованный прием импульсных последовательностей сигналов ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих аналого-цифровых преобразователях 6. Полученные цифровые последовательности с выходов АЦП 6 подаются на вход 1 соответствующих коммутаторов 12.

Сигналы от передающей антенны обнаруживаемого ЛА и сигналы от передающей антенны 18 передатчика 15 контрольного сигнала принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры высоких частот 13, пропускающие сигналы ЛА, а также пе-

передатчика 15 контрольного сигнала и блокирующие прохождение телевизионных сигналов, усиливаются в соответствующих приемниках 5, настроенных на согласованный прием импульсных последовательностей сигналов ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих аналого-цифровых преобразователях 6. Полученные цифровые последовательности с выходов АЦП 6 подаются на вход 1 соответствующих коммутаторов 12.

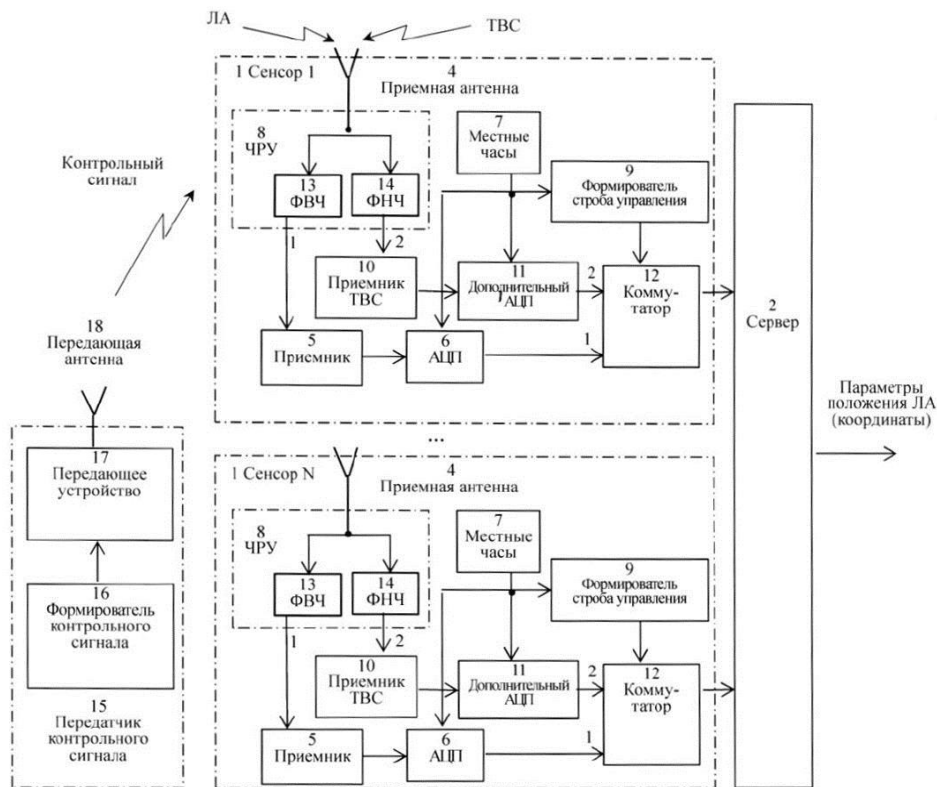


Рис. 3. Синхронизация МПЧН контрольным сигналом внешнего передатчика и ТВ сигналом.

Fig. 3. MLAT synchronisation by the control signal of external transmitter and by TV signal

Одновременно телевизионные сигналы от телевизионного центра принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры нижних частот 14, пропускающие телевизионные сигналы ЛА и блокирующие прохождение сигналов от ЛА и передатчика 15 контрольного сигнала, усиливаются в соответствующих приемни-

ках 10 ТВС, настроенных на согласованный прием ТВС, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих дополнительных АЦП 11. Полученные цифровые последовательности с выходов дополнительных АЦП 11 подаются на вход 2 соответствующих коммутаторов 12.

Коммутация цифровых кодов сигналов ЛА, передатчика 15 контрольного сигнала и телевизионных сигналов для обеспечения их последовательной передачи с выхода каждого из N сенсоров на соответствующий вход сервера выполняется в коммутаторе 12 путем использования выходного сигнала формирователя 9 строка управления, поступающего на управляющий вход коммутатора 12 и представляющего собой, например, 2-битовый двоичный код, значение которого меняется в зависимости от вида пропускаемого сигнала. При этом, например, при значении кода 00 на выход коммутатора 12, являющийся выходом сенсора, могут пропускаться сигналы ЛА, при коде 01 — контрольные сигналы, а при коде 11 — ТВС.

Таким образом, с выхода каждого из N сенсоров по соответствующим каналам связи на сервер последовательно поступают сигналы ЛА, принятые сенсорами, контрольные сигналы передатчика 15 и ТВС.

В сервере МПСН принятые от N сенсоров сигналы ЛА используются для определения пространственных координат ЛА, а сигналы передатчика 15 контрольных сигналов — для обеспечения взаимной временной синхронизации сенсоров. Прием сенсорами и передача на сервер телевизионных сигналов позволяет обеспечить дополнительную относительную временную синхронизацию сенсоров, что повышает надежность и достоверность обнаружения ЛА, а также точностные характеристики измерения координат ЛА в МПСН.

Сигнал, посланный ЛА, принимается N сенсорами, расположенными друг от друга на некотором расстоянии, в разное время, зависящее от расстояния между ЛА и сенсорами. Разницы во времени приема сигнала ЛА сенсорами в соответствии с выражением (1) позволяет определить точное местонахождение ЛА в пространстве.

Так как основным параметром для расчета координат точки расположения ЛА в пространстве является время прихода сигнала, то на первый план выходит синхронизация всех приемников по времени и точность определения времени. Введенные в заявляемое техническое решение временной синхронизации МПСН путем приема и использования внешних телевизионных сигналов для дополнительной относительной временной синхронизации сенсоров повышает надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

5. Заключение

Результаты сравнительного анализа особенностей построения и синхронизации МПСН ЛА указывают на возможность временной синхронизации разнесенных приемных сенсоров и общего сервера для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, при помощи внешнего источника единого времени, расположенного в районе установки средств МПСН, внешних эталонных сигналов времени, принимаемых в МПСН по радиоканалу от спутников глобальной навигационной спутниковой системы, а также внешних общих часов по внешнему контрольному сигналу, создаваемому автономным передатчиком контрольного сигнала и направляемому в МПСН по радиоканалу.

Предлагаемое техническое решение по использованию дополнительного канала приема и обработки телевизионных сигналов, излучаемых местными телевизионными центрами, позволяет улучшить качество синхронизации, повысить надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

Список литературы

- 1 Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация: М : Радио и связь, 1993. 416 с.
- 2 Гринь И. В. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода // Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. 2014. № 4 (32). С. 71—81.
- 3 Бабуров В. И., Васильева Н. В., Иванцевич Н. В., Панов Э. А. Совместное использование навигационных полей спутниковых радионавигационных систем и сетей псевдоспутников. СПб. : Агентство «РДК-Принт», 2005. 264 с.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, д. т. н., главный специалист ООО «НПК “ТИМ”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, д. т. н., проф., заместитель начальника Научно-технического центра АО «Челябинский радиозавод “Полет”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, head specialist of LLC “NPK TIM”, doctor of science, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Eugeniy A. Sinitzin, deputy head of the scientific and technical center of JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”, doctor of science, professor, Sannt-Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.396.62

Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации¹

¹ Синицын Е. А., ² Фридман Л. Б.

¹ НТЦ АО «Челябинский радиозавод “Полет”»

ул. Курчатова, 9, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация

esinit@yandex.ru

² ООО «НПК “ТИМ”»

пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация

lenya2002@bk.ru

Получено: 5 мая 2020 г.

Отрецензировано: 10 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 15 сентября 2020 г.

Аннотация: Приведены результаты оценки точностных характеристик каналов измерения дальности радиотехнических систем ближней навигации. Оценка выполнена с учетом особенностей аппаратной реализации бортовой и наземной (азимутально-дальномерный радиомаяк) аппаратуры радиотехнических систем ближней навигации, используемых при обработке радионавигационных сигналов алгоритмов, формата сигналов каналов измерения дальности, а также помеховой обстановки (синхронные и несинхронные внутрисистемные помехи). При этом рассмотрены влияние отражений от местных объектов, влияние внешних помех, искажений сигнала в бортовом приемнике и погрешности, вносимой аппаратурой наземного азимутально-дальномерного радиомаяка, в общую погрешность измерения дальности. С учетом указанных мешающих факторов определена общая погрешность определения дальности, а также составляющая погрешности, вносимая аппаратурой наземного азимутально-дальномерного радиомаяка.

Ключевые слова: радиотехническая система ближней навигации, запрос дальности, азимутально-дальномерный радиомаяк, многолучевое распространение сигналов, среднеквадратическая ошибка.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Фридман Л. Б., Сеницын Е. А. Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 181—189.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Фридман, Л. Б. Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации / Л. Б. Фридман, Е. А. Сеницын // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 181—189.

The analysis of precision of the range measuring channels for short-range navigation systems

E. A. Sinitsin¹ and L. B. Fridman²

¹ STC JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”

9, Kurchatova str., S-Petersburg, 194223, Russian Federation

esinit@yandex.ru

² LLC “NPK TIM”

4/1, Shaumyana Ave., S-Petersburg, 195027, Russian Federation

lenya2002@bk.ru

Received: May 5, 2020

Peer-reviewed: September 10, 2020

Accepted: September 15, 2020

Abstract: The results of precision evaluation of the range measuring channels for short-range navigation systems are presented. The evaluation is performed taking into account the features of the hardware implementation of on-board and ground equipment of short-range navigation systems, the radio navigation signal processing algorithms, the format of the signals of the range measuring channels as well as interference environment. The influence of reflections from local objects is considered as well as signal distortions in on-board receiver and inaccuracies in the ground range-azimuth beacon. Taking into account these interfering factors, the overall error in the range finding is determined as well as the part of the error introduced by the equipment of the ground range-azimuth beacon.

Keywords: short-range navigation system, range request, range-azimuth beacon, multi-path propagation of signals, RMS error.

For citation(IEEE): L. B. Fridman et al. “The analysis of precision of the range measuring channels for short-range navigation systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 181–189, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Канал дальности (КД) радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) работает по принципу «запрос — ответ» и реализует импульсный (временной) метод определения дальности. Информация о дальности заключена в интервале времени между моментом излучения с летательного аппарата (ЛА) сигнала запроса дальности (ЗД) и моментом приема сигнала ответа дальности (ОД) с наземного азимутально-дальномерного радиомаяка (АДРМ):

$$t_D = 2D/c + t_{a.з.}, \quad (1)$$

где D — расстояние от ЛА до АДРМ; c — скорость распространения радиоволн; $t_{a.з.}$ — аппаратная задержка сигнала.

В состав канала дальности входит бортовое оборудование — запросчик дальномера и наземный АДРМ, называемый также ответчиком дальномера. Одновременно с запуском измерителя времени включается передатчик запросчика и излучается кодированный сигнал ЗД на частоте f_{u1} . Принятый на АДРМ сигнал ЗД после приемника декодируется, задерживается на определенное время и вновь кодируется в устройстве обработки сигналов, после чего поступает на запуск передатчика. Последний излучает сигнал ОД на частоте f_{u2} . На борту ЛА сигнал ОД усиливается, декодируется в приемнике и используется для выключения (остановки) измерителя времени. Задержка сигнала в аппаратуре АДРМ ($t_{a.з.}$) поддерживается постоянной и учитывается при измерении.

Импульсный характер дальномерных сигналов позволяет АДРМ работать одновременно с несколькими запросчиками, т. е. способствует увеличению пропускной способности КД [1]. Применение различных частот и кодов для сигналов ЗД и ОД повышает помехоустойчивость запросчиков к сигналам ЗД других ЛА и предотвращает запуск АДРМ собственными сигналами, отраженными от местных объектов.

Сигналы КД представляют собой импульсы колоколообразной формы с длительностью 1,5 мкс (ЗД) и 1,25 мкс (ОД). Сигналы ЗД (ОД) состоят из трех (двух) импульсов, разделенных кодовыми интервалами длительностью в несколько десятков микросекунд. Кодирование служит для повышения помехоустойчивости КД и облегчения опознавания радиомаяков. Кодовые интервалы различны для разных радиомаяков, что в сочетании с разными несущими частотами используется для выбора нужного радиомаяка.

Пары импульсов повторяются со средней частотой F_{Π} , которая выбирается из условия однозначности отсчета дальности $F_{\Pi} \leq c/(2R_{\max})$, где $R_{\max}$ — дальность действия КД. Следует отметить, что увеличение F_{Π} способствует повышению вероятности правильного обнаружения сигнала, но снижает пропускную способность КД. Поэтому при переходе в режим сопровождения по дальности частота F_{Π} уменьшается в 5—10 раз.

Следует отметить, что сигналы ЗД и ОД всегда отличаются друг от друга несущими частотами и кодовыми интервалами. Различия кодовых интервалов и несущих частот сигналов ЗД и ОД позволяют повысить помехоустойчивость запросчиков к сигналам запросов других ЛА и предотвратить запуск АДРМ собственными сигналами, отраженными от окружающих его объектов.

2. Факторы, влияющие на точность канала измерения дальности

Отличительной особенностью КД является работа запросчика и ответчика в специфической помеховой обстановке, когда существуют внутрисистемные синхронные и несинхронные помехи.

Синхронные помехи создаются сигналами ЗД, отраженными от окружающих АДРМ объектов и вызывающими повторный (ложный) запуск этого радиомаяка. Для исключения синхронных помех ответчик запирается на некоторое защитное время $t_{\text{защ}}$ после приема первого (пришедшего по кратчайшему пути) импульса запроса. Однако при этом возможно уменьшение числа ответов другим ЛА, чьи запросные сигналы попадают на интервал $t_{\text{защ}}$. Поэтому запросчики всегда рассчитываются на число ответов $N_{\text{отв}}$, меньшее числа запросов $N_{\text{зан}}$ (коэффициент ответов $K_{\text{отв}} = N_{\text{отв}}/N_{\text{зан}} < 1$).

Несинхронные внутрисистемные помехи создаются, главным образом, сигналами ОД другим («чужим») ЛА. Для борьбы с несинхронными помехами, т. е. для выделения «своего» ответного сигнала, применяют нестабилизированные генераторы, задающие период повторения сигналов ЗД, и частота повторения F_{Π} излучаемых запросных сигналов изменяется случайным образом относительно определенного среднего значения F_{Π} . При этом «свой» ответный сигнал оказывается задержанным относи-

тельно ЗД на время t_R , которое можно считать постоянным на интервале в несколько периодов повторения T_{II} сигналов ЗД, а «чужие» сигналы ОД представляют собой несинхронные помехи, избавиться от которых можно с помощью стробирования приемного тракта (или его части) по времени.

Использование ответчика способствует увеличению отношения мощностей сигнала и шума на входе измерителя времени запросчика. Поэтому преобладающее влияние на точность дальнометрии оказывает не флуктуационная, а аппаратная погрешность. Так как измерители времени реализуются в цифровом варианте, основной составляющей этой погрешности может быть дискретность отсчета. Для ее уменьшения используют высокие (порядка нескольких мегагерц) частоты следования счетных импульсов.

Точность измерения дальности зависит главным образом от тех факторов, которые приводят к искажению временного положения переднего фронта ОД, так как измерение интервала времени производят обычно по передним фронтам импульсов. К числу таких факторов можно отнести отражения от местных объектов, помехи, принимаемые одновременно с полезным сигналом, и искажения сигнала в бортовом приемнике.

Влиянием отражений от местных объектов на бортовое оборудование можно пренебречь, так как передний фронт полезного импульса всегда соответствует кратчайшему расстоянию между АДРМ и ЛА [2]. Все отраженные сигналы проходят больший путь и поэтому могут исказить только огибающую и задний фронт импульса. Исключение составляют сигналы ЗД, отраженные от местных объектов. Эти сигналы могут вызвать повторный запуск ответчика и появление мощных ОД на борту самолета, которые синхронны с импульсами ЗД. Для исключения этого явления в АДРМ вслед за принятым ЗД приемник запирается на защитное время $t_{защ}$. Запирание необходимо также для восстановления чувствительности приемника.

Влияние внешних помех на канал дальности мало из-за применяемого импульсного кодирования.

Источником погрешностей также является измеритель времени, аппаратные погрешности которого оказывают влияние на точность измерения дальности. Кроме того, на точность измерения влияет задержка сигнала в сравнительно узкополосных усилителях приемного тракта запросчика, которая зависит от уровня усиливаемого сигнала, нестабильности температуры и уходов несущей частоты.

3. Точность измерения дальности на борту ЛА

В канале дальности РСБН используются цифровые следящие импульсные радиодальномеры (РД), измеряющие время запаздывания сигнала ОД относительно сигнала ЗД по второму импульсу пары импульсов, разделенных кодовым интервалом (совмещение второго и первого импульсов ОД выполняется в декодирующем устройстве бортовой аппаратуры). При постоянстве и известном значении задержки сигнала в АДРМ основное уравнение рассматриваемого дальномера, согласно (1), имеет вид

$$D = 0,5ct_R = Mt_R, \quad (2)$$

где $t_R = t_D - t_{a.з.}$,

Из (2) следует, что масштабный коэффициент M не зависит от проектировщика системы, и точность РД определяется только точностью измерения t_R и степенью стабильности скорости распространения радиоволн.

Из (2) получаем среднеквадратичную погрешность (СКП) измерения дальности с помощью РД [3]:

$$\sigma_R = D \left[\left(\frac{\sigma_M}{M} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t_R} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где σ_M — составляющая СКП, определяемая нестабильностью скорости распространения радиоволн;

σ_t — составляющая СКП, определяемая аппаратурной погрешностью измерения t_R .

Анализ уравнения (3) показывает, что σ_M , даже в наихудших условиях, когда $(\sigma_c/c) = 10^{-4}$ (σ_c — среднеквадратичное отклонение скорости распространения радиоволн), а $D = 600$ км (высота полета ЛА — около 20 км), составляет примерно 60 м, что позволяет в обычных условиях использования РСБН не учитывать нестабильность скорости распространения радиоволн и считать, что основной вклад в бюджет точности КД вносит аппаратурная погрешность измерения времени задержки t_R сигнала ОД.

В цифровом РД к указанным составляющим добавляется погрешность дискретности отсчета $\sigma_{ДС} = (0,5cT_{Cч})/\sqrt{12}$, зависящая от периода повторения счетных импульсов $T_{Cч}$ [3].

Реальная точность КД характеризуется СКП $\sigma_R \approx 100$ м.

4. Погрешность, вносимая АДРМ в измерение дальности на борту ЛА

Оценим погрешность, вносимую АДРМ в измерение дальности на борту ЛА. В отличие от канала измерения азимута, канал измерения дальности с точки зрения погрешности измерения может быть разделен на две независимые составляющие: наземную и бортовую.

Так как по условиям задачи АДРМ должен работать с уже существующим бортовым оборудованием, достаточно оценить только «вклад» АДРМ в общую погрешность.

Погрешность, вносимая аппаратурой АДРМ в общую погрешность измерения дальности, складывается из следующих основных частей

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2},$$

где

σ_1 — ошибка определения временного положения запросного сигнала;

σ_2 — ошибка формирования временной задержки ответного сигнала;

σ_3 — ошибки кодирующе-декодирующих устройств и формирователей ответного сигнала.

Момент фиксации видеоимпульса в случае простой фиксации по переднему фронту изменяется на величину длительности фронта, составляющую в формате системы РСБН 0,3—0,4 мкс [3]. Следовательно, при использовании простого фиксатора по переднему фронту в любом случае ошибка не превысит этой величины, т. е. диапазон изменения момента фиксации дальномерного канала не превысит 60 м. Если юстировка сделана ориентируясь на сигналы, мощность которых занимает среднее положение между минимальным и максимальным значениями, ошибка фиксации будет меняться в пределах ± 30 м, т. е. $\sigma_1 = 10$ м.

Максимальная ошибка временной задержки, возникающая за счет нестабильности кварцевого генератора (задержка формируется цифровым способом)

$$\Delta_2 = \Delta f \cdot \frac{T_i \cdot c}{2},$$

где Δf — относительная нестабильность кварцевого генератора;

$T_1 = 61 \cdot 10^{-6}$ с — задержка ответного сигнала в направленном режиме,

$T_2 = 183,4 \cdot 10^{-6}$ с — задержка ответного сигнала во всенаправленном режиме.

Соответственно, среднеквадратическая ошибка для направленного и всенаправленного режимов $\sigma_{2н} = 0,03$ м, $\sigma_{2в} = 0,1$ м.

Наконец, при частоте тактового генератора в 8 МГц максимальная ошибка, возникающая из-за наличия временной дискретности в работе дешифратора, составит $\pm 9,4$ м, следовательно, $\sigma_3 \cong 3,1$ м.

$$\text{Отсюда } \sigma_{н,в} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \cong 10 \text{ м.}$$

5. Заключение

Точность дальномерного канала РСБН характеризуется среднеквадратичной погрешностью, составляющей порядка 100 м. При этом на точность измерения дальности влияет задержка сигнала в усилителях приемного тракта запросчика (бортового оборудования летательного аппарата), которая зависит от уровня усиливаемого сигнала, нестабильности температуры и уходов несущей частоты. Кроме того, источником погрешностей является измеритель времени, аппаратурные погрешности которого оказывают влияние на точность измерения дальности.

В то же время, влиянием отражений от местных объектов на бортовое оборудование можно пренебречь, а влияние внешних помех мало из-за применяемого импульсного кодирования. Влияние нестабильности скорости распространения радиоволн также пренебрежимо мало.

Погрешность, вносимая аппаратурой АДРМ в общую погрешность измерения дальности, характеризуется среднеквадратичной погрешностью, составляющей около 10 м. При этом величина погрешности, вносимой аппаратурой АДРМ, определяется ошибкой определения временного положения запросного сигнала (влияние остальных факторов пренебрежимо мало). Момент фиксации видеоимпульса (в случае простой фиксации по переднему фронту) изменяется на величину длительности фронта, составляющую в формате системы РСБН 0,3—0,4 мкс. Таким образом, величина погрешности, вносимой аппаратурой АДРМ, определяется длительностью фронта импульсов канала дальности.

Список литературы

- 1 Сосновский А. А., Хаймович И. А. Авиационная радионавигация : справочник. М. : Транспорт, 1980. 255 с.
- 2 Фридман Л. Б., Ершов Г. А., Недобежкин М. И., Сеницын Е. А. Повышение помехоустойчивости дальномерного и информационного радиоканалов системы ПРМГ при действии внутрисистемных помех. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 398—402.
- 3 Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радионавигационные системы. М. : Радиотехника, 2005. 224 с.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, д. т. н., главный специалист ООО «НПК “ТИМ”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, д. т. н., проф., заместитель начальника Научно-технического центра АО «Челябинский радиозавод “Полет”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, head specialist of LLC “NPK TIM”, doctor of science, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Eugeny A. Sinitzin, deputy head of the scientific and technical center of JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”, doctor of science, professor, Sannt-Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, д. 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 20 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 25 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 29 сентября 2020 г.

Аннотация: *Феномен разряда электричества через разреженные газы изучался с конца XVII века. Во второй половине XIX века разряд электричества через разреженный газ стал темой интенсивных исследовательских экспериментов, прежде всего в Германии. Разрядные трубки и насосы, изобретенные И. Гейсслером в 1850-х гг, и индукционная катушка, усовершенствованная Г. Румкорфом примерно в то же время, позволили многим физикам экспериментировать с катодными лучами. Отличительной чертой этих исследований было использование газоразрядных трубок с холодным катодом.*

Ключевые слова: *катодные лучи, трубка Гейсслера, спектр тела, трубка Гитторфа, каналовые лучи, исследования Варли, эксперименты Крукса, кометы Гольдштейна.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 190—226.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 190—226.

Discovery and some scientific research of cathode rays

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: September 20, 2020

Peer-reviewed: September 25, 2020

Accepted: September 29, 2020

Abstract: *The phenomenon of the discharge of electricity through rarefied gases has been studied since the end of the 17th century. In the second half of the 19th century, the discharge of electricity through gas became the subject of intensive research experiments, primarily in Germany. Discharge tubes and pumps, invented by I. Geissler in the 1850s, and an induction coil, improved by H. Ruhmkorff at about the same time, allowed many physicists to experiment with cathode rays. A distinctive feature of these studies was the use of cold cathode gas discharge tubes.*

Keywords: *cathode rays, Geissler tube, body spectrum, Hittorf tube, channel rays, Varley's research, Crookes' experiments, Goldstein's comet.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Discovery and some scientific research of cathode rays,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 190–226, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Некоторые из основных открытий, сделанных в физике в начале так называемой Второй научной революции в конце XIX века имели общий элемент. Прямым или косвенно общим элементом во всех этих открытиях был эксперимент по электрическим разрядам в газах. Обнаружение катодных лучей было следствием исследования разряда электричества через разреженные газы. Катодные лучи невидимы, но их присутствие было впервые обнаружено в ранних вакуумных трубках, когда лучи ударялись о стеклянную стенку трубки, возбуждая атомы стекла, и вызывали излучение света — свечение, называемое флюоресценцией. Явление разряда электричества через разреженные газы изучалось с конца XVII века. Это привело к появлению электроники, которая успешно стала развиваться с изобретением трубки Брауна.

В 1742 и 1743 гг. профессор Лейпцигского университета Иоганн Винклер (*Winkler Johann Heinrich*, 12.03.1703—18.05.1770) проводил эксперименты с электрическими разрядами в трубках с откачанным воздухом и первым придал им форму в виде светящихся букв.

Пытаясь выяснить, насколько хорошо вакуум проводит электричество, английский физик Уильям Ватсон (*Watson William*, 03.04.1715—10.05.1787) в 1751 г. сконструировал вакуумированную стеклянную трубку, содержащую две металлические пластины (электроды). Он сообщил, что разряд, наблюдаемый во время его экспериментов, был «самым восхитительным зрелищем... ярко-серебристого оттенка». В другом эксперименте с изогнутой стеклянной трубкой он наблюдал «дугу мерцающего пламени» [1].

В 1838 г. Фарадей, изучая электрический разряд при низком давлении в газоразрядной трубке, обнаружил темное пространство между тлеющим свечением у катода и положительным столбом, которое получило название «темное пространство Фарадея» (англ. *Faraday dark space*) [2]. Важной особенностью его открытия было то, что свечение при разряде было не непрерывным, а разделенным на яркие области вблизи электродов и темную область посередине, рис. 1. Фарадей предположил, что светимость сильно разреженного газообразного материала в вакуумной трубке при возбуждении электричеством является свойством вещества в четвертом состоянии, которое он назвал «лучистой материей» (англ. *radiant matter*).

Существование так называемого «темного пространства Фарадея» в газоразрядных трубках привлекло еще больший интерес к исследованиям световых эффектов из-за проводимости электричества через газы при очень низких давлениях. Такое внимание было связано главным образом из-за некоторых первоначальных наблюдений за существованием связи между снижением давления, расширением темного пространства и затуханием цвета у электродов.

Многие увлеченные наукой люди внесли свой вклад в развитие исследований разряда электричества в разреженных газах. Они ради любопытства проводили эксперименты и изобретали новые технологии. Оригинальная стеклянная разрядная трубка, разработанная и изготовленная Иоганном Генрихом Вильгельмом Гейсслером (нем. *Johann Heinrich Wilhelm Geissler*, 26.05.1815—24.01.1879) для наглядной демонстрации электрического разряда, способствовала не только открытию катодных лучей, но и новаторским конструкциям в области электроники и телекоммуникаций на протяжении десятилетий.

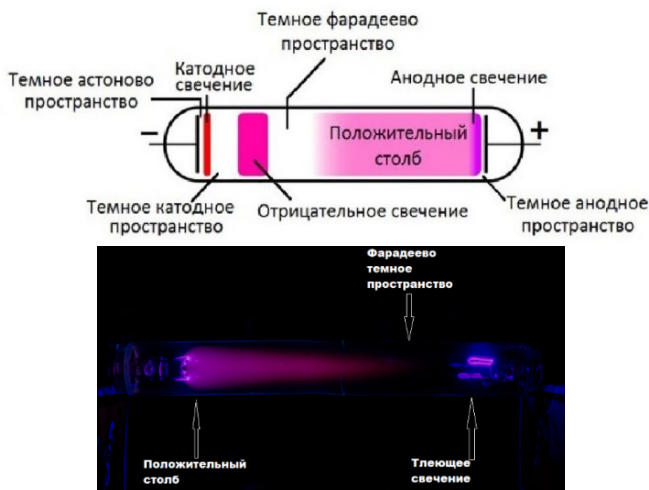


Рис.1. Структура и фото некоторых областей тлеющего разряда.

Fig. 1. Structure and photo of some areas of the glow discharge

2. Эксперименты Гассиота

Открытие катодных лучей было побочным продуктом исследования разряда электричества в разреженных газах. К середине девятнадцатого века было установлено, что прохождение электричества через частично откачанную стеклянную трубку вызывает свечение газа, цвет которого зависел от его химического состава и давления. Ниже определенного давления свечение представляло собой многослойный узор из ярких и темных полос.

Ученые любители электротехники в начале XIX века постоянно находились в поиске новых впечатляющих экспериментов, которые можно было бы использовать для того, чтобы сделать электричество видимым. Открытие Фарадеем «темного пространства» стало толчком к дальнейшему исследованию тлеющего разряда.

Использование металлических электродов внутри трубки является гораздо более поздним достижением в исследовании электрического разряда, если брать в качестве точки отсчета эксперименты Фарадея. В 1854 г. английский бизнесмен и ученый-любитель Джон Гассиот (*John Peter Gassiot*, 02.04.1797—15.08.1877) изобрел герметичную частично вакуумированную стеклянную трубку с впаянными в её концы платиновыми электродами для проведения своих обширных исследований электрической искры и наблюдения электрических разрядов в разряженном воздухе, рис. 2 [3].

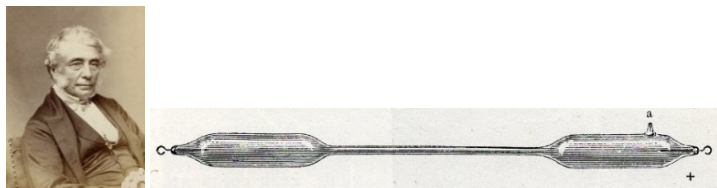


Рис. 2. Джон Гассиот (1865 г.) и его трубка для наблюдения электрических разрядов [4]. 1854 г.

Fig. 2. John Gassiot (1865) and his tube for observing electric discharges [4]. 1854

Интерес Гассиота к разряду был непосредственно стимулирован публикацией его друга Уильяма Роберта Грове¹ в 1852 г. о том, что разряд, который тот наблюдал, был «исчерчен поперечными несветящимися полосами...» и такие узоры сопровождают все электрические разряды в вакуумных трубках [5]. Гассиот в упомянутой выше статье [3] приводит результаты отработки методики проведения эксперимента с разрядной трубкой собственной конструкции (диаметр 5 см, длина 127 см) и индукционными катушками с разными характеристиками. Одну индукционную катушку ему дал Уильям Грове, а другую катушку прислал из Парижа и лично изготовил для него Генрих Румкорф. В статье [3] Гассиот отмечает, что с помощью указанных индукционных катушек он получил поперечные тусклые и темные полосы, которые впервые описал в своей статье мистер Грове. Далее Гассиот пишет: «Невозможно описать красоту этого эксперимента. Это нужно увидеть, чтобы это оценить, но те эксперименты, о которых я собираюсь упомянуть, объясняют возможности инструмента (имеется в виду катушка Румкорфа — авт.) и характер исследований, к которым он применим. Он открывает множество новых идей относительно необычного действия или природы индуцированных токов, и как таковые, вероятно, будут интересными для читателей *Philosophical Magazine*».

В своих первоначальных исследованиях Гассиот продемонстрировал, что, если проявить достаточно осторожности для достижения очень низкого давления, в торричеллиевом вакууме могут образовываться полосы. Он показал, что электрофорная машина производит такой же полосатый разряд, как и катушка Румкорфа с ячейкой Грове. Это еще раз подтвердило тождество этих двух источников электричества [6, с. 6]. Гассиот также заметил, что мощный электромагнит разделяет полосы на две отдельные колонки [6, с. 15]. Статья [6], в которой Гассиот объявил об этих

¹ Уильям Роберт Грове (также Гроув и Гров; англ. *William Robert Grove*, 11.07.1811—01.08.1896) — английский юрист, физик и химик. Первым в Англии использовал катушку Румкорфа для создания электрического разряда в газе при низком давлении. Изобрёл оригинальный гальванический элемент, отличный от элемента Вольты.

открытиях, была удостоена чести стать Бейкерианской лекцией² Королевского общества в 1858 г.

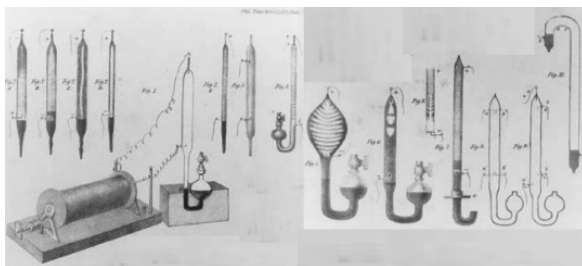


Рис. 3 Общий вид оборудования в экспериментах Гассиота по исследованию катодных лучей [6]. 1858 г.

Fig. 3 General view of the equipment in the experiments of Gassiot on the study of cathode rays [6]. 1858

В бейкерианской лекции Гассиот сообщил об отклонении электрических разрядов в разреженных газах при воздействии на них как магнитного, так и электрического полей. Это было раннее наблюдение явления катодных лучей, их открытие обычно приписывают немецкому профессору физики Юлиусу Плюккеру (нем. *Julius Plücker*, 16.06.1801—22.05.1868) из Боннского университета. Хотя сам Плюккер в своей статье [7] отмечает, что влияние магнитного поля на катодные лучи он увидел у Гассиота: «Если прикоснуться к трубке в ее темном месте рядом с отрицательным электродом слабым подковообразным магнитом, то система белых облаков втянется в темное пространство; прекрасное явление, которое я видел у мистера Гассио, но которое я до этого не мог наблюдать ни одной из трубок Гейсслера». Эти данные (наряду с данными Плюккера) явились первым доказательством того, что «катодные лучи» несут электрический заряд и могут быть частицами. Заметим, что Гассиот опубликовал четыре статьи об исследованиях катодных лучей. В статье из этого цикла его работ, вышедшей в 1859 г., следует фундаментальный вывод: «...изменения электрического сопротивления внешней цепи изменяют разряд и создают световой разряд, который на самом деле является прерывистым, хотя иногда он кажется непрерывным» [8]. На рис. 4 представлены виды светового разряда в экспериментах Гассиота 1862 г., подтверждающие его прерывистость (расслоение) [9].

² Бейкерианская лекция (англ. *Bakerian Medal and Lecture*) — награда, ежегодно присуждаемая Лондонским королевским обществом за вклад в развитие естествознания. Является одной из старейших научных премий (присуждается с 1775 года). В награду входит 10 тысяч фунтов стерлингов и медаль.

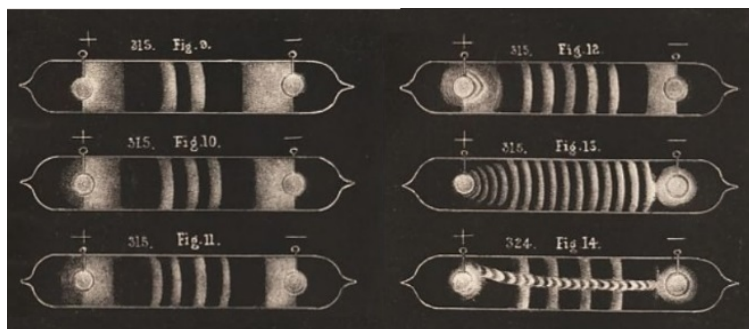


Рис. 4. Виды светового разряда в экспериментах Гассиота, показывающие его прерывистость (расслоение) [9]. 1862 г.

Fig. 4. The types of light discharge in the experiments of Gassiot, showing its discontinuity (stratification) [9]. 1862

3. Трубки Гейсслера

Разрядными трубками типа трубок Гассиота заинтересовался немецкий стеклодув и механик Боннского университета Иоганн Гейсслер, когда их увидел у своего брата Фридриха, который занимался производством инструментов в Амстердаме. Фридрих изготавливал трубки, заполненные парами ртути, для голландского математика и физика Фолькерта Симона Мартена ван дер Виллигена³ (*Volkert Simon Maarten van der Willigen*, 1822—1878).

Развитие ртутно-поршневых насосов было главным фактором в достижении более низких давлений. Первый шаг был сделан в 1854 г. в Боннском университете Юлиусом Плюккером, который попросил Генриха Гейсслера спроектировать стеклянный насос с использованием ртутного поршня для проведения экспериментов по газовым разрядам низкого давления.

В 1855 г. Иоганн Гейсслер построил насос, в котором столб ртути действовал как поршень, создавая лучший вакуум, чем это было возможно ранее. Ртутный насос позволил достичь разрежения воздуха 1—2 мм рт. ст. Насос впервые был описан в брошюре Теодора Майера, опубликованной в 1858 г. [10]. Майер был помощником Плюккера.

Два года спустя, в 1857 г., благодаря новой технологии вакуумирования Гейсслер изготовил усовершенствованную герметичную двухэлектродную газонаполненную стеклянную трубку высокого вакуума. Для подсоединения источника питания в противоположные концы трубки бы-

³ Виллиген в 1854 г. проводил эксперименты с гальванической дугой.

ли впаяны короткие платиновые проволоки, которые имели температурный коэффициент объемного расширения⁴ при нагревании близкий к стеклу ($\beta = 25^{-10} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), рис. 5. В стеклянном корпусе трубки имелось отверстие, через которое откачивался воздух. Эти вакуумные трубки Гейссlera нового поколения сделали возможным исследование катодных лучей.

Если к металлическим электродам трубки подвести высокое напряжение от полюсов спирали Румкорфа или гальванической батареи, состоящей из нескольких тысяч пар элементов, то внутри трубки можно наблюдать свечение по всей её длине с характерным цветом, а не световую дугу, начинающуюся у катода и заканчивающуюся у анода, как в экспериментах Фарадея. Цвет свечения в трубке Гейссlera зависел от состава газа и разряжения.



Рис. 5. Иоганн Гейсслер, его газоразрядные трубки различной конструкции (конец XIX в.) и подключение трубки к катушке Румкорфа.

Fig. 5. Johann Geissler, his gas-discharge tubes of various designs (late 19th century) and the connection of the tube to the Rumkorff coil

Трубки производились в мастерской научных инструментов, которую Гейсслер открыл в Бонне в 1852 г. Позднее эти трубки стали называться газоразрядными трубками, но в большинстве случаев они известны как трубки Гейссlera, благодаря высокому качеству произведенной продукции.

Гейсслер изготавливал трубки самых разнообразных форм и художественного оформления. Впечатляющие цветовые эффекты могли быть созданы с использованием различных газов и материалов. Поэтому трубки

⁴ Коэффициент расширения металла должен быть больше коэффициента расширения стекла. Это необходимо для того, чтобы внутренние напряжения, возникающие в направлении, перпендикулярном к плоскости контакта стекло — металл, имели сжимающий характер.

Гейсслера использовались за пределами лаборатории в качестве объектов зрелищ и развлечений, например, они светились в театральных диадемах, которые ярко блестели в балетных представлениях.

В середине XIX в. трубки Гейсслера использовались не только для развлечений, но и для научных исследований. Например, когда Генрих Герц имел дело с электрическим разрядом, то ему пришлось отметить это отличие в извинительном тоне в письме к отцу в июне 1882 года: «Я занимаюсь в течение дня и до вечера световыми явлениями в разряженных газах в так называемых трубках Гейсслера, но Вы не думайте, что это те предметы, которые обычно используют во время зрелищ».

Трубки Гейсслера впервые были использованы для научных исследований в Боннском университете. Гейсслер тесно сотрудничал с университетом, в котором он работал механиком. Производимые в его мастерской устройства были предназначены не только для научных сотрудников в области физики, но и других научных направлений, таких как химия, медицина, физиология и минералогия. У него был длинный международный список клиентов⁵, который сформировался за время его деятельности. Его работа высоко ценилась в Боннском университете и в 1868 г. Гейсслер был удостоен звания почетного доктора этого учебного заведения.

Усовершенствованные трубки Гейсслера работали от электрических машин или индукционных устройств. Для их работы требовалось минимальное напряжение величиной 2910 В [11]. Вначале разрядные сосуды были настоящими трубками, но вскоре это слово в первую очередь стало относиться к их функции, а не к форме.

4. Эксперименты Юлиуса Плюккера

В Боннском университете у Иоганна Гейсслера сложились рабочие отношения с известным ученым математиком Юлиусом Плюккером, который в 1847 г., обескураженный отсутствием признания в области аналитической геометрии, отвернулся от математики и занялся экспериментальной физикой. Это научное направление у Плюккера первоначально являлось своеобразным хобби. Его исследовательская программа базировалась на работах Майкла Фарадея, с которым он переписывался в течение 15 лет и чья теория электромагнетизма стала руководящим принципом Плюккера.

В 1858 г. Гейсслер сделал несколько инструментов для Плюккера, в частности, разрядные трубки новой конструкции. Эти трубки Плюккер часто называл «трубками Гейсслера».

⁵ В 1859 г. Гейсслер совместно с русским химиком Д. И. Менделеевым (1834—1907) разработал пикнометр — физико-химический прибор для измерения плотности веществ в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Плюккер быстро применил усовершенствованные трубки для исследования электрических разрядов. Он исследовал разряд в гейсслеровых трубках при воздействии на него самых разнообразных факторов: разреженных газов при различной величине давления, электрического напряжения и температуры, формы трубки и материала электродов, а также влияние магнитного поля [7]. В 1858 г. Юлиус Плюккер описал вариант вакуумной трубки, которую И. Гейсслер изготавливал с 1857 года, рис. 6.

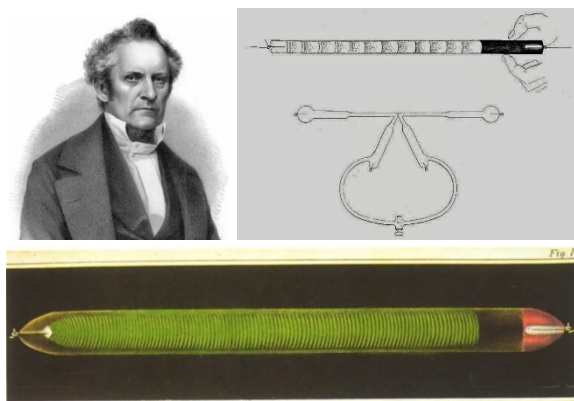


Рис. 6. Юлиус Плюккер (1856 г.) и некоторые общие виды трубок Гейсслера, которые использовал в своих экспериментах Плюккер [7].

Fig. 6. Julius Plucker (1856) and some general types of Geissler tubes that Plucker used in his experiments [7]

В 1859 г. Юлиус Плюккер наконец обнаружил с помощью трубки Гейсслера лучи, которые впоследствии были названы «катодными лучами». Он заметил, что если катод сделан в виде острия, то свечение имеет форму шнура, отходящего от катода. Этот «шнур», по его мнению, представляет поток заряженных частиц, который летит от катода к аноду. Он также установил, что поток заряженных частиц отклоняется магнитным полем и во время электрического разряда стекло возле катода начинает светиться. Был отмечен эффект свечения в разрядной трубке в зависимости от чистоты вакуума. Другими словами, он определил, что проводимость газа зависит от его концентрации в трубке и возрастает, если часть газа из трубки откачать. Если увеличивать разрежение в трубке, то вблизи катода появляется темное пространство («катодное пятно»), которое при дальнейшем откачивании газа расширяется и заполняет все пространство трубки. В результате этого свечение в трубке прекращается [12].

В одном из экспериментов Плюккер исследовал электрический разряд в трубках Гейсслера различной формы, которые были заполнены раз-

ными газами (водородом, азотом и гелием). В результате он обнаружил, что цвет и спектр света, излучаемого во время разряда, зависят от типа газа в трубке и температуры во время разряда. Плюккер был одним из первых, кто исследовал спектры излучения газов. Из полученных результатов Плюккер сделал вывод, что полученные световые спектры излучения характерны для химических веществ, и он был убежден в том, что по их изменениям можно получить информацию о молекулярном строении вещества.

Цикл исследований Плюккер провел в тесном сотрудничестве с Гейсслером. Плюккер как математик не обладал способностями экспериментатора, поэтому Гейсслер кроме исследовательской работы решал ещё и сложные технические задачи экспериментального характера. Стиль работы Плюккера был интуитивным, его эксперименты были направлены на умение исследовать сложные и захватывающие эффекты. К теоретическим толкованиям или даже к применению привычной ему математики Плюккер в этих работах никогда не прибегал.

Перед проведением эксперимента они тщательно обсуждали его методику и необходимое оборудование для него, которое должен был изготовить Гейсслер. Иоганн Гитторф, ученик Плюккера, отмечал [13]: «...Плюккер никогда не достигал большой ловкости рук в качестве экспериментатора. Однако у него всегда были очень четкие представления о том, что нужно, и он обладал высокой степенью способности отдавать другим свои идеи, вдохновлять их и воплощать их в жизнь».

Плюккер опубликовал девять статей о проведенных исследованиях за период 1858—1862 гг., которые стали классическими, но ни в одну из них он не включил в качестве соавтора Гейсслера, на что тот очень обижался. В серии публикаций Плюккер собрал большое количество свойств газового разряда. Они состояли из непрерывного списка описаний тестов и различных соображений, но без общей темы. Общий вид представленных им исследований имеет характер записей лабораторных книг, а не систематического резюме. Хотя Плюккер был математиком, однако, у него не возникало желания установить законы, которые могли бы быть сформулированы математически. С другой стороны, в его сборниках приводится описание экспериментов и результатов по влиянию на разряд размера и формы трубок, материала катода и магнитных полей. Все эти описания занимают более 200 страниц [14].

В 1864 г. широкой аудитории (на собрании немецких натуралистов и врачей) трубка Гейсслера была представлена берлинским физиком Иоганном Кристианом Поггендорфом⁶ (*Johann Christian Poggendorff*, 1796—

⁶ С 1824 года Поггендорф начал издавать физико-химический журнал «*Annalen der Physik und Chemie*», который вёл до самого конца 1860 г.

1877). Гейсслер по этому случаю также продемонстрировал свой ртутный воздушный насос. Немецкое химическое общество в некрологе Гейсслера отметило, что он всегда вкладывал в свои заказные инструменты больше своих идей, чем его клиенты просили [15].

5. Трубки Гитторфа

В исследованиях Плюккера по электрическому разряду в трубках Гейсслера принимал участие его ученик и сотрудник Иоганн Вильгельм Гитторф (нем. *Johann Wilhelm Hittorf*, 27.03.1824—28.11.1914), профессор физики и химии в университете Мюнстера⁷, рис. 7. В начальный период работы в университете Гитторфу из-за отсутствия и ограниченности денег в университете пришлось истратить большую часть своих собственных средств на оснащение физической лаборатории оборудованием.

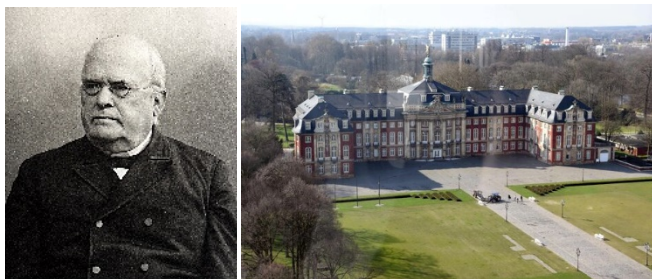


Рис. 7. Иоганн Вильгельм Гитторф (1893) и современный вид университета Мюнстера.

Fig. 7. Johann Wilhelm Hittorf (1893) and the modern view of the University of Münster

В этой исследовательской лаборатории он провел обширные исследования газовых разрядов в специальных трубках собственной конструкции (трубки Гитторфа) с «абсолютным вакуумом» еще в 1865 г. В экспериментах было использовано 32 трубки разных видов и конструкций. Особенностью трубок Гитторфа было то, что они были больше в диаметре трубок Гейслера и имели на стеклянной поверхности от 1 до 5 электродов для подачи напряжения, с целью воздействия на энергетические лучи, исходявшие от отрицательного электрода (катода). Трубки Гитторфа, кроме дополнительных электродов, имели в стеклянном корпусе отвод для присоединения вакуумного насоса и два электрода для соединения с источни-

⁷ Это один из крупнейших университетов Германии в городе Мюнстер (нем. Münster, земля Северный Рейн-Вестфалия). Основан 16 апреля 1780 г. Носит имя кайзера Германии Вильгельма II. (нем. Westfälische Wilhelms-Universität, сокp. WWU).

ком высокого напряжения с помощью катушек индуктивности. Он ввел название «катодные трубки» для любых газоразрядных трубок [16].

Гитторф, используя насос Sprengel⁸, сумел создать в разрядных трубках достаточно высокий вакуум (менее 0,001 мбар). Это позволило в 1869 г. увидеть «лучи свечения» через стекло и установить, что электрический разряд в вакуумных трубках (разреженном газе) сопровождается лучами свечения (сияющими лучами). Эти лучи впоследствии получили название катодных («катодные лучи»). С этого момента он начал системное изучение лучей свечения. До публикации своих исследований Гитторф показал свои трубки Гейсслеру, который скопировал устройства и начал их производство для продажи.

Гитторф благодаря исследованиям с трубками своей конструкции пришел к выводу: *что-то* вытекает из отрицательных электродов (катодов), наиболее четко это видно у точечных катодов, рис. 8. Это *что-то*, попадая на стекло перед катодом трубки, заставляет его флюоресцировать и бросает резкую тень от предмета, находящегося в просвечиваемом пространстве, что указывает на линейное распространение этого *чего-либо*. Этот эффект Гитторф заметил еще до английского физика и химика Уильяма Крукса (англ. *Sir William Crookes*, 17.06.1832—04.04.1919).

Источником этого света являлся светящийся слой, покрывавший катод. Гитторф предположил, что «свечение является процессом, в котором происходит протекание светового потока между частицами газа и частицами в катоде». Изучение этого светового потока, идущего от катода к аноду, показало, что он состоит из отрицательных зарядов. Этому потоку Гитторф дал название «лучи отрицательного света». Рассмотренное излучение не зависело от местоположения анода. В отличие от обычного света, на световой луч или катодный свет оказывает воздействие магнит, например, тень можно сместить или исказить.

В 1869 г. Гитторф, получил в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже 1 мм рт. ст. и, заметил, что темное катодное пространство быстро распространяется по всей трубке, вследствие чего стенки трубки начинают сильно флюоресцировать. Он подметил, что свечение трубки смещается под действием магнита.

Построив *L*-образную трубку с электродами на двух концах, Гитторф смог установить, что свечение ограничивается плечом, в котором

⁸ В 1862 г. профессор Рижского политехнического училища А. Теплер (нем. *August Joseph Ignaz Toepfer*; 07.09.1836 - 06.03.1912) изобрел усовершенствованную конструкцию насоса Гейсслера, а в 1865 г. немецкий химик Г. Шпренгель (нем. *Hermann Johann Philipp Sprengel*; 29.08.1848 - 14.01.1906), работавший на химическом заводе в Кеннингтоне (Англия), изобрел насос, в котором цепочка капель ртути засасывала порции газа в стеклянную трубку и отправляла газ прочь.

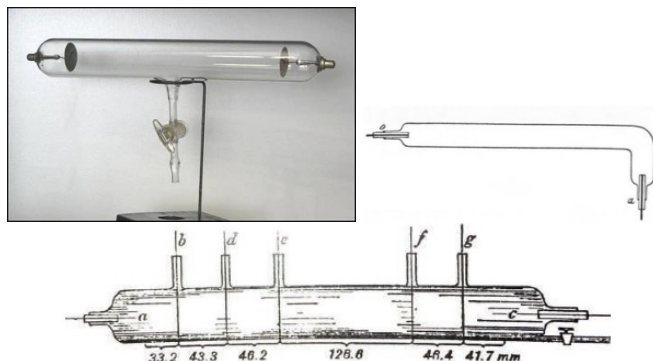


Рис. 8. Катодные трубки конструкции Иоганна Гитторфа.

Fig. 8. Cathode tubes designed by Johann Gittorf

находится катод, рис. 8. Он заметил, что «если какое-либо тело помещается в пространство, заполненное светом свечения [исходящим от отрицательного электрода], то оно бросает резкую тень на флюоресцентную сторону» [16]. Из этого был сделан вывод, что свечение генерируется от точечного катода и распространяется по прямым линиям. «Поэтому можно говорить о прямолинейных траекториях или лучах свечения, а также рассматривать любую точку катода как источник конуса лучей» [16].

Гитторф в статьях описал свойства катодных лучей и указал, что их интенсивность связана с понижением давления в газоразрядной трубке. Гитторфом было установлено, что нагревание отрицательного электрода облегчает разряд в вакууме, то есть этот электрод является источником лучей [17]. В этом случае электрический ток в вакууме возникает за счет термоэлектронной эмиссии электрода (катода) и при меньшем значении приложенного напряжения к электродам катодной трубки, если бы не было подогрева катода.

Важным оказался наблюдаемый факт того, что если катод выполнен из платины, то участок поверхности стекла рядом с ним покрывается тонким слоем этого металла.

Предположение Гитторфа о волновой природе «лучей отрицательного света», исходящих от катода, стало отправной точкой для почти тридцатилетней полемики вокруг природы этого излучения, которая свелась на нет после «открытия электрона» Дж. Дж. Томсоном (англ. *Sir Joseph John Thomson*, 18.12.1856—30.08.1940).

Через 10 лет после публикации работ И. Гитторфа, совершенно независимо от него, после изучения электрического разряда в разрежен-

ных газах Уильям Крукс пришел к тем же результатам, которые затем были изложены им в его сочинении о лучистом состоянии материи (1879 г.). Возможный вариант идентификации катодных лучей как потока электронов был дан позже Дж. Дж. Томсоном (1897 г.).

Через 40 лет о работах Гитторфа вспомнил известный радиотехник Майкл Пупин (серб. *Михајло Идворски Пупин*; 22.09.(04.10.)1858—12.03.1935), профессор электромеханики Колумбийского университета в Нью-Йорке, выступая в январе 1927 года с речью на открытии конференции Американской ассоциации содействия развитию науки. Он сказал, что героями радиовещания являются Клерк-Максвелл и Гитторф. Работа Маркони была названа «простым выводом», в то время как трехэлектродная лампа была «умелым приложением известных явлений». Далее Пупин отметил, что пророчество даже самого возвышенного оптимиста двадцать пять лет назад не приблизилось ни к каким достижениям, которые действительно были достигнуты, и что самый замечательный факт, связанный с этими великими достижениями, заключается в том, что все они основаны на простом явлении, которое наблюдал неизвестный немецкий физик по имени Гитторф более сорока лет назад. «Его эксперимент заключался в следующем: если в вакуумной трубке один из электродов нагревается до высокой температуры, то наименьшая электродная движущая сила может создавать электрический ток, идущий через вакуум, тогда как, если оба электрода холодные, возникает мощная индуктивность. Катушка, создающая огромные электрические силы, необходима для того, чтобы вообще генерировать любой ток» [18].

Есть несколько причин, по которым работы Гитторфа не получили должного внимания, которого они заслуживают. С одной стороны, в них присутствует множество эмпирических подходов, которые затрудняют их чтение, что не позволяет четко прояснить закономерности. С другой стороны, Гитторф был, по-видимому, скромным и стеснительным в публичности человеком, который, кроме того, преподавал в одном из непрестижных немецких университетов. Он работал в католической академии, которая, по сути, обучала преподавателей и священников. В 1875 г. академия получила право присуждать докторские степени, то есть через 10 лет после начала исследований Гитторфа. Поэтому у Гитторфа почти не было настоящих учеников, которые могли бы продолжить его научное направление. Многие из его экспериментов с аппаратурой, разработанной им для их проведения, до сих пор связывают с именем талантливого популяризатора Уильяма Крукса, который умело их копировал и знал в этом толк.

6. Исследования Е. Гольдштейна

В начале 1860-х гг. Плюккер со своим бывшим учеником Гитторфом поставили под сомнение важный принцип для спектрального анализа, который содержал утверждение о том, что каждое вещество имеет характерный спектр. Они обнаружили, что некоторые вещества могут иметь разные спектры. Существует определенное количество элементарных веществ, которые при разном нагревании дают два вида спектров совершенно другого характера, не имеющих ни одной линии или какой-либо общей полосы.

Это открытие имело большое значение, поскольку представляло новый взгляд на основы спектрального анализа. Сначала этот факт практически не привлекал к себе внимание. После смерти Плюккера в 1868 г. его приемником в университете Бонна стал ассистент профессора Адольф Вюльнер (нем. *Adolf Wüllner*, 13.06.1835—06.10.1908), рис. 9. Он продолжил исследовать множественные спектры разряда, и именно его работа положила начало научной дискуссии между исследователями [19]. Вюльнер предположил, что происхождение различных спектров зависит от типа разряда. Было проведено различие между «непрерывными» и «прерывистыми» разрядами, в зависимости от того, протекал ли ток через газовую массу или был прерывистым с более или менее короткими промежутками. Из своих экспериментов Вюльнер пришел к выводу, что линейный спектр возникает всегда, когда имеет место прерывистый разряд, и соответственно полосовой спектр возникает всякий раз, когда возникает непрерывный разряд [20].

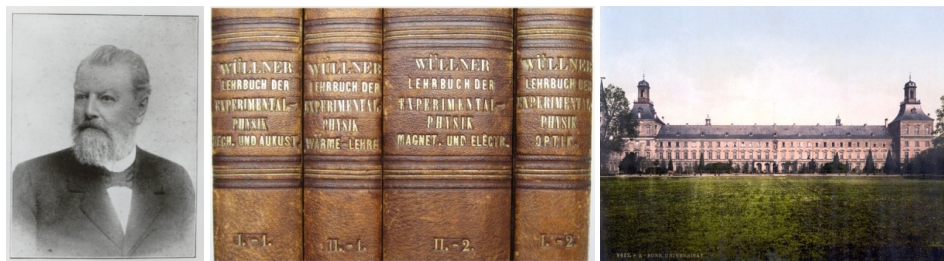


Рис. 9. Адольф Вюльнер, его учебник экспериментальной физики в 4 томах, изданный в Лейпциге (1863/1865 гг.) и Дворец выборщиков Бонна, главное здание Боннского университета (около 1900 г).

Fig. 9. Adolf Wüllner, his textbook of experimental physics in 4 volumes, published in Leipzig (1863/1865) and the Bonn Electoral Palace, the main building of the University of Bonn, around 1900

В это время пожалуй единственным, кто подробно изучил исследования Гитторфа и их продолжил, был немецкий физик Евгений Гольдштейн (нем. *Gotthilf-Eugen Goldstein*, 05.09.1850—26.12.1930). В 1870 г.

он провел свое собственное исследование с газоразрядными трубками и дал испускаемым катодом лучам название «катодные лучи». Словосочетание «катодные лучи» было выбрано Гольдштейном из совокупности терминов, среди которых был и указанный, а также «отрицательный свет», «катодный свет» и «светящиеся лучи света». Все эти термины употреблял пять лет до этого в своих исследованиях Гитторф.

Гольдштейн был учеником и другом физика Германа фон Гельмгольца⁹ (рис. 10), который поддерживал его в этих исследованиях. Гельмгольц представил работу Гольдштейна в Королевской Прусской академии наук в Берлине (нем. *Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften*) 13 августа 1874 года [21]. Эта работа под названием «О наблюдениях газовых спектров» (нем. *Über Beobachtungen am Gasspektris*) стала первой научной публикацией Гольдштейна и прелюдией к более чем пятидесятилетнему занятию им направлением, которое он сформулировал, как «электрический разряд в разряженных газах». В статье подробно рассмотрен результат Вюльнера. Гольдштейн использовал различные источники электричества (индукторы, лейденские банки) и смог получить разряды, которые противоречили теории Вюльнера. Например, он смог создать непрерывный разряд, который показывал линии и полосы. Гольдштейн глубоко исследовал проблему и пришел к выводу, о том, что «появление спектров... не зависит от формы, в которой возникают создающие их разряды» [22].

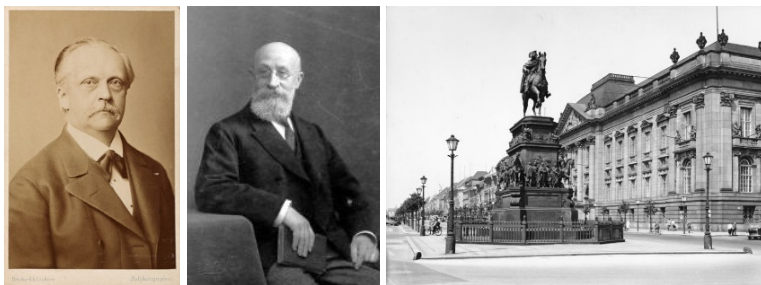


Рис. 10. Герман фон Гельмгольц (слева) и Евгений Гольдштейн (1886 г.). Государственная библиотека Унтер Линден, место пребывания Академии наук Пруссии до 1945 г. Берлин.

Fig. 10. Hermann von Helmholtz (left) and Eugene Goldstein (1886). State Library Unter Linden, seat of the Prussian Academy of Sciences until 1945. Berlin

Гольдштейн открыл несколько важных свойств катодных лучей, которые способствовали их последующей идентификации как первой суб-

⁹ Полное имя — Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (нем. *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*, 31.08.1821—08.09.1894).

атомной частицы — электрона. В 1876 г. он обнаружил, что катодные лучи обладают энергией, распространяются прямолинейно, а когда нет внешних воздействий, то они испускаются перпендикулярно металлической поверхности катода, независимо от местоположения анода. Он попытался измерить скорость катодных лучей с помощью доплеровского смещения спектральных линий в свечении, испускаемом трубками Крукса [23].

Гольдштейн не имел постоянной работы по физике, но благодаря своему другу, директору Берлинской обсерватории Вильгельму Юлиусу Фёрстеру (*Wilhelm Julius Foerster*, 16.12.1832—18.01.1921) он был назначен на должность физика в этом учреждении по контракту. Здесь он проработал с 1878 по 1890 год. В 1880 г. Гольдштейн смог экспериментально доказать влияние магнитных полей на катодное излучение.

В 1881 г. Гольдштейн защитил докторскую диссертацию (Ph.D.) на тему «Новая форма электрического отталкивания» (нем. *Eine neue Form elektrischer Abstoßung*), в которой исследовал электростатическое отклонение катодных лучей. Несмотря на свои ранние успехи, Гольдштейн не смог получить работу или назначение на должность в университете после присвоения докторской степени, однако благодаря своему учителю Герману Гельмгольцу он получил некоторую финансовую поддержку от Академии наук. Через год, в 1882 г., им было установлено, что катодные лучи имеют диффузное отражение от анода.

Гольдштейн помимо своей чисто физической работы в Берлинской обсерватории занимался и астрофизическими исследованиями в Потсдамской астрофизической обсерватории (*Astrophysical Observatory in Potsdam* — АОР). В этой обсерватории ему удалось с 1888 по 1890 год получить краткосрочную реальную исследовательскую должность в качестве физика с постоянным бюджетным финансированием. За это время он создал физический кабинет в берлинской «Урании»¹⁰. В Потсдамской обсерватории он провел большую часть своей карьеры, в которой в 1927 г. возглавил астрофизическую секцию. С 1890 по 1896 год Гольдштейн работал в качестве гостя в *Physikalisch Technische Reichsanstalt* (Физико-технический национальный институт).

В 1886 г., работая в физической лаборатории Потсдамской обсерватории, он обнаружил, что трубки с перфорированным катодом также излучают свечение на конце катода [24]. Гольдштейн пришел к выводу, что

¹⁰ Урания — научное общество, основанное в Берлине в 1888 г. по инициативе Александра фон Гумбольдта (*Alexander von Humboldt*), Макса Вильгельма Мейера (*Max Wilhelm de Meyer*) и Вильгельма Фёрстера (*Wilhelm Foerster*). Целью его создания было донести до широкой общественности самые последние научные открытия.

в дополнение к уже известным катодным лучам, которые впоследствии были распознаны как электроны, движущиеся от отрицательно заряженного катода к положительно заряженному аноду, существует еще один луч, который движется в противоположном направлении, рис. 11. Поскольку эти последние лучи проходили через отверстия или каналы в катоде, Гольдштейн назвал их канальными лучами (нем. *kathodenstrahlen*). Эти лучи, иногда называют «анодными лучами» или «положительными лучами», так как они состоят из положительных ионов. В канальных лучах, в отличие от отрицательных частиц в катодных лучах, возникает тлеющий разряд, цвет которого варьировался в зависимости от природы газа в трубке. Например, цвет разряда в воздухе был желтым, в водороде — розовый, а в углекислом газе — зеленовато-серый. Гольдштейн также продемонстрировал, что лучи канала не подвержены влиянию слабых магнитных полей, расположенных вблизи разрядной трубки.

В 1886 г. Гольдштейн опубликовал в отчетах сессий Берлинской академии наук доклад, озаглавленный «О форме излучения, еще не исследованных на катоде индуцированных зарядов» (нем. *Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathodeinducierter Entladung*) [25].

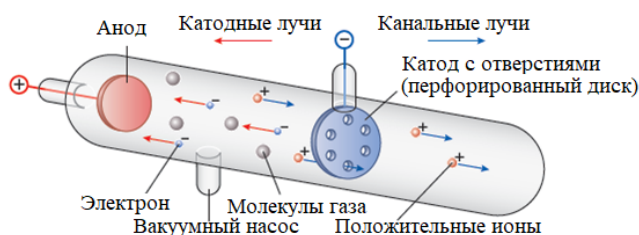


Рис. 11. Схема движения катодных и канальных лучей в вакуумной трубке.

Fig. 11. A diagram of the movement of cathode and channel rays in a vacuum tube

В 1898 г. ученик Гольдштейна, Вильгельм Вин (*Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien*, 13.01.1864—30.08.1928), провел обширные исследования лучей канала. Его работа, со временем, стала основой для масс-спектрометрии¹¹. Он показал, что лучи канала могут отклоняться сильными электрическими и магнитными полями, при этом поток положительно заряженных ионов отклоняется магнитным полем с силой, пропорциональной отношению массы частицы к её заряду.

¹¹ Масс-спектрометрия — метод исследования и идентификации вещества, позволяющий определять концентрацию различных компонентов. Основой для измерения служит ионизация компонентов, позволяющая физически различать компоненты на основе характеризующего их отношения массы к заряду и, измеряя интенсивность ионного тока, производить отдельный подсчёт доли каждого из компонентов (получать *масс-спектр* вещества).

Когда Вин использовал наложенные параллельные электрические и магнитные поля для отклонения ионов, то он обнаружил, что частицы с различным отношением заряда к массе (e/m) следуют по различным параболическим кривым, рис. 12. На основании этих данных Вин пришел к выводу, что значения e/m лучей канала зависят от природы газа в трубке. Для фильтрации заряженных частиц в скрещенном магнитном и электрическом поле Вин разработал прибор, названный его именем — фильтр Вина (*Wien filter*). Этот прибор может использоваться как анализатор энергетического спектра, монохроматор или масс-спектрометр.

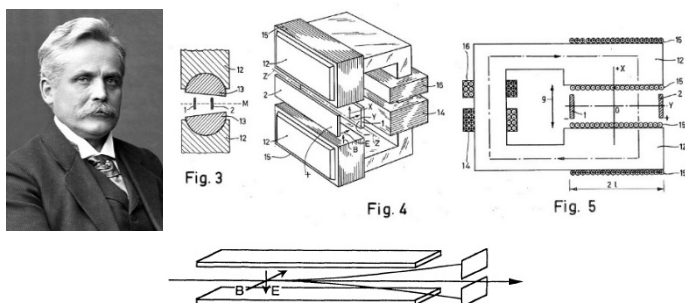


Рис. 12. Вильгельм Вин (1911 г.), принципиальная схема фильтра Вина и его современная конструкция (патент US4019989 U.S. Philips Corporation, New York, N.Y. Field: Oct. 22, 1975).
 Fig. 12. Wilhelm Wien (1911), Wien Filter Concept and Modern Design (patent US4019989 U.S. Philips Corporation, New York, N.Y. Field: Oct. 22, 1975)

Анодный луч с наибольшим отношением e/m происходит из газообразного водорода (H_2) и состоит из ионов H^+ . Другими словами, этот луч состоит из протонов. Работа Гольдштейна с анодными лучами H^+ была, по-видимому, первым наблюдением протона, хотя, строго говоря, можно утверждать, что именно Вильгельм Вин первым измерил отношение e/m протона. Из опытов Вина по отклонению анодных лучей в электрическом и магнитном поле значение скорости протона составляет около $v = 10^7$ см/с, а отношение $\frac{e}{m} = 10^4$ [26]. Нужно заметить, что история оказалась несправедливой, открытие протона приписывается не Евгению Гольдштейну, а англичанину Эрнесту Резерфорду (1919 г.).

Исследованиями В. Вина и Дж. Дж. Томсона было доказано, что положительные частицы лучей канала движутся вдоль пучка с очень большой скоростью. В своем течении вдоль луча эти частицы непрерывно сталкиваются с молекулами газа, которые содержатся в трубке, и если их кинетическая энергия достаточно велика, то можно ожидать, что произойдет испускание света. Еще в 1902 г. другой ученик Гольдштейна, Иоганн

Штарк¹² (*Johannes Stark*, 15.04.1874—21.06.1957), предсказал, что движущиеся частицы канальных лучей, таким образом, становятся светящимися, и, следовательно, линии в спектре, испускаемые ими, должны быть смещены к фиолетовому концу спектра, если лучи замечены приближающимися к наблюдателю. Это происходит подобно тому, как смещение линий в спектрах тех звезд, которые движутся к нам. Поскольку это смещение, так называемый эффект Доплера, увеличивается со скоростью источника света, то, таким образом, должна быть возможность определения скорости частиц канального луча. Штарк сумел показать, что свет от частиц канального луча показывает доплеровский сдвиг. Это была первая четкая демонстрация оптического доплеровского сдвига в земном источнике. В 1905 г. Штарку впервые удалось обнаружить это явление в канальной лучевой трубке, содержащей водород.

Гольдштейн также попытался опровергнуть гипотезу Уильяма Крукса, который интерпретировал катодное излучение как своего рода поток заряженных молекулярных частиц. Он также показал, что длина свободного пробега катодных лучей в 100 раз больше, чем у молекул. Гольдштейн также описал наблюдавшийся небольшой доплеровский сдвиг в свете катодного излучения.

Гольдштейн, будучи универсальным экспериментатором, разработал для своих экспериментов множество трубок с различным расположением электродов. Он опубликовал в дальнейшем свои новые работы о канальных лучах, в которых исследовались длины волн света, испускаемого различными металлами и оксидами, когда они попадают в канальные лучи. Им также было обнаружено, что разрядная трубка может быть эффективным источником положительного излучения. Гольдштейн посвятил последние два десятилетия своей жизни явлениям анодного разряда и слоистой форме положительного столба в разрядной трубке. Однако, эти работы не привлекли к себе особого внимания, поскольку не соответствовали научному тренду того времени.

5 сентября 1930 года на конференции немецкой ассоциации физиков в Кенигсберге физик Вальтер Кауфман¹³ (нем. *Walter Kaufmann*,

¹² Иоганн Штарк был активный противник теории относительности. При нацистах участвовал в немецком националистическом движении «арийская физика». Был членом нацистской партии. После 1933 г. начал борьбу против «белых евреев», к которым относил физиков, не разделявших его взгляды, в частности Гейзенберга. Нобелевская премия, по его мнению, которую получил последний, была «демонстрацией находящегося под еврейским влиянием Нобелевского комитета против национал-социалистической Германии» [27]. Нобелевский лауреат по физике 1919 года «За открытие эффекта Доплера в канальных лучах и расщепление спектральных линий в электрическом поле (эффект Штарка)».

¹³ В 1897 г. Кауфман одновременно с Дж. Дж. Томсоном, измерил отношение заряд/масса для катодных лучей. Результаты у обоих экспериментаторов были сходны, однако Кауфман, в отличие от Томсона, был осторожен в своих выводах, и слава первооткрывателя электрона досталась Томсону.

05.06.1871—01.01.1947) выступил с речью в честь 80-летия своего коллеги Евгения Гольдштейна. Кауфман назвал Гольдштейна учителем, у которого были тысячи учеников, и автором классических работ по физике.

7. Исследования Кромвеля Варли

В конце 19 века, невзирая на проведенные исследования, природа электричества была ещё совсем не понятна. Немецкие ученые И. Гитторф, Е. Гольдштейн, Г. Герц, Э. Видеман¹⁴, Ф. Ленард и другие были выразителями теории эфира. Они полагали, что электрические лучи — это своего рода колебания в эфире. Главным противником волновой интерпретации был Уильям Крукс, который на основании впечатляющей серии экспериментов, проведенных в конце 1870-х годов, пришел к выводу, что токопроводящие лучи от катода представляют собой поток наэлектризованных молекул, или, как их называли немецкие физики, «катодные лучи». Однако немецкий взгляд на катодные лучи не разубедил Дж. Дж. Томсона, Уильяма Томсона (лорд Кельвин¹⁵, англ. *William Thomson, 1st Baron Kelvin*; 26.06.1824—17.12.1907), физика Джорджа Стокса и многих других британцев в том, что лучи представляют собой некую микроскопическую заряженную частицу.

Уильяма Томсона в этом англо-немецком споре особенно раздражало то, что немцы упустили из виду работу его бывшего делового партнера, британского инженера-электрика Кромвеля Флитвуда Варли (англ. *Cromwell Fleetwood Varley*, 06.04.1828—02.09.1883), рис. 13. Одной из причин, по которой в марте 1871 г. Уильям Томсон поддержал избрание Варли в члены Королевского общества, было то, что перед этим была опубликована небольшая статья номинанта «Некоторые эксперименты по разряду электричества через разреженные среды и атмосферу» (англ. *Some Experiments on the Discharge of Electricity through Rarefied Media and the Atmosphere*) в *Proceedings of the Royal Society of London* [28]. Статья содержала экспериментальные доказательства материальной природы катодных излучений, возникающих при электрическом разряде через разреженные га-

¹⁴ Видеман Эйльхард (*Wiedemann Eilhard Ernst Gustav*, 01.08.1852—07.01.1928) — немецкий физик и историк науки. С 1887 г. вместе с отцом редактировал журнал «*Annalen der physik und chemie*». Изучал катодные лучи, считая их электромагнитными волнами. Исходя из этого предложил механизм чередования светлых и темных полос в разряде за счет обмена возбуждением «эфирных оболочек молекул». Ф. Ленард, следуя Э. Видеману, проводил свои опыты и предложил кварцевое «окошко Ленарда» в разрядной трубке, пытаясь обнаружить исходящее из него жесткое ультрафиолетовое излучение.

¹⁵ 1892 г. королева Виктория пожаловала Томсону наследственное пэрство с титулом «барон Кельвин» по названию реки Кельвин.

зы. Однако статья Варли, похоже, быстро была забыта. Она была упущена из виду в первых систематических обзорах исследований электрического разряда, опубликованных в 1880-х и начале 1890-х годов. Крукса особенно озадачивал тот факт, что, несмотря на сотрудничество с Варли в спиритуалистических и других исследованиях, он оставался в неведении относительно его статьи, пока лорд Кельвин в 1893 г. не обратил на нее его внимание. Благодаря этой публикации историки науки называют Варли одной из ключевых фигур в «предыстории» открытия электрона, в которой он, как оказалось, предвидел корпускулярную природу катодных лучей.



Рис. 13. Кромвель Флитвуд Варли (1880 г.) и спиритический сеанс.

Fig. 13. Cromwell Fleetwood Varley (1880) and the seance spiritualism

К. Ф. Варли был английским инженером-электриком, который принимал активное участие в успешной прокладке трансатлантического телеграфного кабеля и его тестировании в 1860-х годах. Однако наибольшую известность, помимо электрических исследований, ему ещё принесли занятия спиритизмом¹⁶.

Для Варли спиритизм был одним из наиболее значительных контекстов при написании статьи 1871 года [29]. В этой работе он явно стремился не только раскрыть тайну электрического разряда через разреженные газы, но ещё показать туманную границу между невидимым и видимым, и ко всему прочему, ещё между материальным и нематериальным областями. Это указывает на то, что одну из невидимых сил, связанных со спиритизмом, можно сфотографировать и сделать научно более достоверной, а также упростить понимание того, как невесомые духи могут иметь явно материальные качества.

Хотя физические аспекты публикации Варли не были исследованы до 1890-х годов, однако его «спиритуалистический» метод нашел применение при исследовании загадочных психических феноменов.

¹⁶ Спиритизм (от лат. *spiritus* — «душа, дух») — это способ связи (общение) с душами умерших и пришельцами из потустороннего мира, которые могут вступать в контакты с живыми через специальных лиц — медиумов, одаренных особой таинственной силой.

Большая часть исследований Варли в области спиритических явлений была проведена с использованием трубок Гейсслера. У Варли были трубки Гейсслера и он умел ими пользоваться, по крайней мере, еще в 1867 г. К этому времени он использовал их для указания силы тока в аппарате, имитирующем электрические характеристики длинных телеграфных кабелей.

Исследования Варли электрического разряда через разреженные газы относились к той научной области, где доминировали ученые, значительно более выдающиеся, чем он. В связи с этим его статья начинается со стратегического реверанса в сторону Джона Гассиота и Уильяма Грове, которые в 1850-х годах опубликовали работы о загадочной темноте, полосах, бороздках и расслоениях в этом виде электрического разряда. Варли, благодаря работам Гассиота и Грове, также был знаком с пионерскими исследованиями Фарадея, включая его идентификацию темного пространства между отрицательным электродом и светимостью, вызванную разрядом.

Не довольствуясь простым рассмотрением трубки Гейсслера как технологии отображения, он разработал две новые стратегии для исследования «действия внутри трубки», в частности слабой яркости, которую можно растянуть между электродами. Важно отметить, что обе стратегии включали расширение диапазона чувств человека и зрения. Первая заключалась в том, чтобы сфотографировать трубку в «совершенно темной комнате», а вторая — возможность «проведения беседы».

В экспериментальных исследованиях, описанных в статье, Варли использовал трубку Гейсслера оригинальной конструкции, которая имела диаметр $1\frac{1}{4}$ дюйма (31,75 мм), а длину $3\frac{1}{4}$ дюйма (82,55 мм). Трубка содержала два кольца из алюминиевого провода. Одно кольцо имело диаметр $\frac{1}{4}$ дюйма (10,16 мм), а другое — $\frac{9}{10}$ дюйма (22,86 мм). Кольца, располагались друг от друга на расстоянии $\frac{8}{10}$ дюйма (20,32 мм), рис. 14а. В трубке находился водород при достаточно высоком вакууме.

Трубка Гейсслера подключалась к цепи, содержащей две батареи Даниэля, гальванометр и два переменных резистора, которые позволяли регулировать цвет и форму светимости при увеличении и уменьшении сопротивления. Схема включения газоразрядной трубки в электрическую цепь представлена на рис. 14б.

В схеме (рис.14б) использован переменный резистор оригинальной конструкции в виде U-образной стеклянной трубки, содержащей глицерин или воду, в которые опускались два алюминиевых провода. Опускание проводов на различную глубину раствора уменьшало или увеличивало сопротивление резистора. Переменные резисторы имели сопротивление 2—3 МОм.

Во время эксперимента в трубку электромагнит помещался таким образом, чтобы между его полюсами проходили катодные лучи. При включении электромагнита происходило искривление лучей и появлялась светящаяся арка. На фотографиях показаны арки, когда один из электродов имеет отрицательный потенциал: малое кольцо (рис.14в) и большое кольцо (рис.14г). Для выяснения природы арки Варли построил её физическую модель, из которой выяснил, что эта арка состоит из частиц вещества, проецируемых с отрицательного полюса электричеством во всех направлениях, движение которых зависит от магнитного поля. Эти частицы, получая импульс, разлетаются во все стороны от отрицательного полюса за пределы электрического тока.

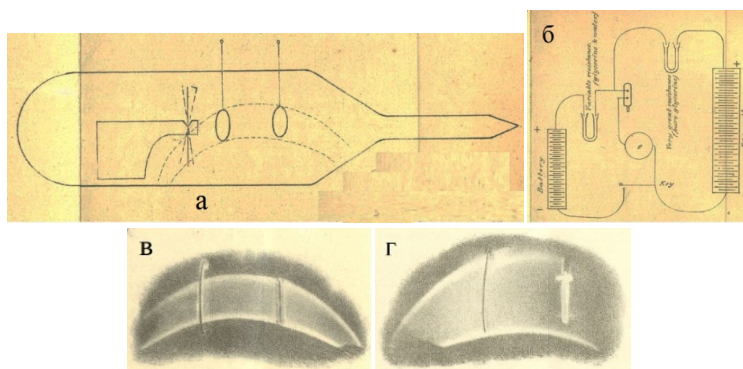


Рис. 14. Трубка Гейслера в эксперименте Варли (а), схема включения газоразрядной трубки в электрическую цепь (б). Фотографии арок при отрицательном потенциале одного из электродов: малое кольцо (в) и большое кольцо (г) [28].

Fig. 14. Geissler tube in Varley's experiment (а), a diagram of the inclusion of a gas-discharge tube in an electrical circuit (б). Photographs of arches at a negative potential of one of the electrodes: a small ring (в) and a large ring (г) [28]

Исходя из проведенного эксперимента Варли пришел к мысли, что катодные лучи могут состоять из заряженных частиц. Эти частицы должны отклоняться магнитным полем в том же направлении, что и наблюдаемое направление отклонения катодных лучей. Модель арки и фотопластинка были ключевыми инструментами Варли для создания новых картин в трубке Гейслера с целью расширения границ человеческих чувств. Точно так же, как фотопластинка позволила обнаружить признаки электрического разряда, которые были до этого скрыты от человеческого зрения, так и модель арки показала, что то, что казалось светящейся нематериальной формой, оказалось материальным, способным производить механическое действие (удары) на тела, на которые оно падает.

8. Трубка Крукса

Уильям Крукс был очарован гипотезой Фарадея о четвертом агрегатном состоянии вещества и с 1875 г. начал изготавливать разрядные трубки. Он работал в собственной лаборатории в Лондоне, где проводил все свои исследования и разработал большое количество самых разнообразных вакуумных трубок, содержащих внутри различного вида устройства для изучения свойств излучающей материи.

Крукс улучшил методы откачки трубок и достиг давления 0,05 мм рт. ст. Его трубки имели более глубокий вакуум, чем трубки Гейсслера. Трубка конструкции Крукса получила широкое распространение в научных исследованиях ученых и ее стали называть «трубка Крукса». Одна из таких трубок, изготовленная в 1880 г., представляла собой грушевидную колбу из уранового стекла, в которой анод был выполнен в виде Мальтийского креста. Использование Мальтийского креста связано по всей видимости с тем, что произношение его фамилии (*Crookes*) не отличается от произношения латинского слова, означающего крест (*crux-cross*). В этой трубке на фоне зеленоватого свечения стекла под действием разряда можно было увидеть тень от анода на стенке стеклянной колбы, рис. 15. Данный эксперимент подтверждал прямолинейное распространение катодных лучей. Это также доказывало то, что катодные лучи возникают на катоде и движутся к аноду, где они ударяются в окружающее анод стекло и создают свечение.

У. Крукс провел много важнейших экспериментов с использованием своих разрядных трубок и открыл ряд явлений. Он обнаружил, что при выкачивании значительного объема воздуха из трубок темное пространство Фарадея распространяется по трубке от катода к аноду, пока трубка полностью не станет темной. Образовавшееся катодное темное пространство иногда называют «круксово тёмное пространство», рис. 16. Это одна из прикатодных частей тлеющего разряда, расположенная между светящимся катодным слоем и отрицательным тлеющим свечением. Катодным темным пространством часто называют всю область от катода до тлеющего свечения. В этом пространстве свободно движутся отрицательные молекулы газа, летящие от катода и задерживаемые на его границе встречными положительными молекулами. На эту область приходится основное падение потенциала, т. е. здесь формируется пучок электронов высокой энергии (сотни вольт). При этом возле анода трубки происходит свечение стекла.

Круксу удалось показать, что основой электрического разряда в вакууме является поток молекул, который получил отрицательный заряд от катода и оттолкнулся от него. Он разработал трубку с вогнутым катодом, чтобы продемонстрировать, что катодные лучи выделяют тепло. Вогнутый

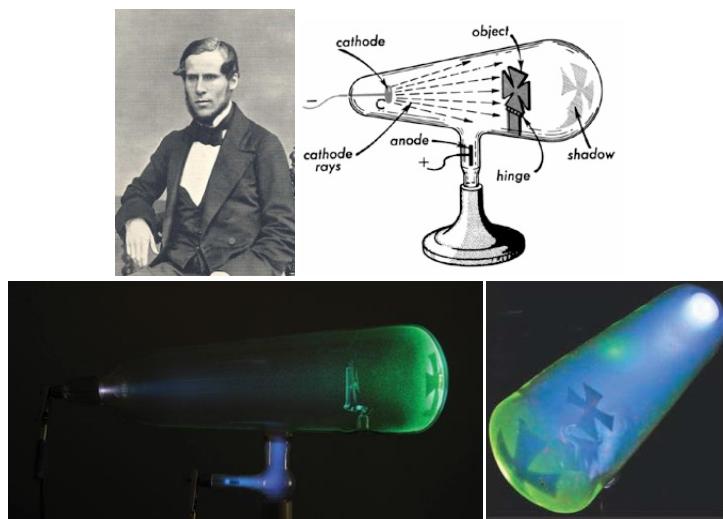


Рис. 15. Сэр Уильям Крукс, трубка Крукса и тень Мальтийского креста на стенке стеклянной колбы в эксперименте.

Fig. 15. Sir William Crookes, Crookes' tube and the shadow of the Maltese cross on the wall of a glass flask in the experiment

катод фокусировал лучи на куске металла, что приводило к флюоресценции. Трубка с вогнутым катодом стала в дальнейшем прототипом фокусирующей трубки. Крукс также заметил, что то место на металлической тонкой пленке, куда падает пучок катодных лучей, становится горячим. Это доказывало, что катодные лучи обладают энергией. Крукс назвал их материей в четвертом (лучистом) состоянии. Во время лекции «О лучистой материи» (*On radiant matter*) в Британской ассоциации содействия развитию науки (*British Association for the Advancement of Science*) в Шеффилде в пятницу, 22 августа 1879 года, Крукс продемонстрировал 19 различных трубок и провел дискуссию по теме лекции.

В 1879 г., в разгар споров между британскими и немецкими учеными о природе катодных лучей, Уильям Крукс провел эксперимент, в котором ось очень легкой мельницы или «гребного колеса» с восьмью лопастями установлена на стеклянных направляющих в вакуумной трубке. При разряде через трубку катодные лучи ударяются о верхние лопасти и колесо начинает вращаться с одновременным движением от отрицательного к положительному концу трубки, рис. 16. Крукс объяснил движение колеса передачей импульса от катодных лучей к лопастям колеса [30] и интерпретировал эксперимент как свидетельство того, что катодные лучи являются отрицательно заряженными частицами.

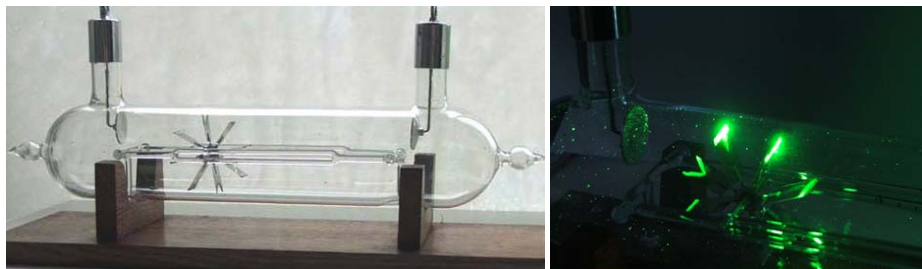


Рис. 16. Эксперимент Уильяма Крукса: движение «ребенного колеса» под действием катодных лучей. Справа показаны флюоресцентные наконечники на лопастном колесе, светящиеся от электронной бомбардировки при её приближении к аноду.¹⁷

Fig. 16. An experiment by William Crookes: the movement of a “paddle wheel” under the action of cathode rays. Shown on the right are the fluorescent tips on the paddle wheel, glowing from the electron bombardment as it approaches the anode¹⁷

В 1903 г. Дж. Дж. Томсон не согласился с выводами Крукса, рассчитав, что если лучи несут ток 10^{-5} ампер и движутся со скоростью 10^{10} см/сек, то они ударяются о лопасти с силой $2 \cdot 10^{-3}$ дин (в системе СИ это $2 \cdot 10^{-8}$ Н). В этом случае механический эффект в целом слишком мал, чтобы объяснить наблюдаемое движение колеса [31]. В современной работе [32] показано, что сила, создаваемая ударом электронного пучка о лопасти, недостаточна, чтобы вызвать вращение лопастного колеса, поскольку она на два порядка меньше требуемой. В этом случае движение можно объяснить радиометрическим эффектом. Воздействие катодных лучей делает одну сторону лопатки намного теплее, чем другую. Позже выяснилось, что не прямое действие электронной бомбардировки приводит к движению, а тот факт, что вакуум не идеален. Оставшиеся молекулы воздуха могут воздействовать на лопасти не только термически, но и электрическим зарядом. Другими словами, оба механизма, с помощью которых разность температур между противоположными сторонами лопаток может приводить к вращательному движению, требуют наличия некоторого количества молекул остаточного газа в трубке.

Уильям Крукс был удивительным человеком не только в науке, но и в обычной жизни. Круг его интересов был очень широк. Его жизнеутверждающий девиз «*Ubi Crookes, ibi lux*» (лат., «где Крукс, там и свет»). Как не странно, он был убежденным сторонником спиритизма. Кстати, спиритизмом увлекался не только он, но и другие великие умы, например, Джеймс Максвелл и Томас Эдисон. Крукс заинтересовался спиритизмом в

¹⁷ Website “Tuopeek” Experimental Vacuum tube. URL: http://www.tuopeek.com/vacuum_tube.html

конце 1860-х годов, возможно потому, что был заинтересован в контакте со своим умершим братом Джоном Круксом (1846—1867), который умер от желтой лихорадки на Кубе. Известно, что Крукса в таком контакте убедил в 1867 г. его однокашник Кромвель Варли, который считал себя ясно-видящим [33]. Крукс, несмотря на его научные достижения, подвергся широкой критике за спиритические взгляды. Так, лауреат Нобелевской премии по химии за 1904 год сэр Уильям Рамсей (*Sir William Ramsay*, 1852—1916), сказал, что «Крукс настолько близорук, что, несмотря на его бесспорную честность, нельзя доверять тому, что он говорит Вам, что видел» [34]. В 1874 г., после целой серии обманов в спиритических сеансах, Крукс прекратил психические эксперименты и в дальнейшем не высказывал свои взгляды на спиритизм. Однако нет никаких сомнений в том, что он сохранил до самой смерти свою веру в спиритизм.

В проведенных Круксом эффектных экспериментальных исследованиях особой новизны не было, так как результаты подобных работ уже были ранее опубликованы другими учеными, которые занимались такой же или близкой тематикой. Отличительной чертой цикла работ Крукса по катодным лучам было то, что они были связаны с его гипотезой о том, что лучи должны представлять собой заряженные частицы вещества или молекул. Это мнение противоречило взглядам Плюккера, Хитторфа и других ученых того времени, которые считали лучи особым типом света. Насколько научно обосновано предположение Крукса — не совсем понятно, поскольку он также хотел объяснить природу световых частиц с помощью световых мельниц, у которых вращение лопаток вызвано воздействием «легких частиц», что, однако оказалось не совсем так.

9. Катодно-лучевая модель кометы

На протяжении всей своей жизни Гольдштейн сталкивался с проблемой поиска оплачиваемой исследовательской должности, из-за этого он написал большую часть своих научных работ в качестве частного ученого, который работал по контракту. Он часто получал финансовую поддержку, но её было недостаточно для небольшой частной лаборатории и лаборанта.

Гольдштейн постоянно испытывал нужду в финансах, начиная с того момента, когда стал стажером в лаборатории Германа Гельмгольца в Первом Берлинском физическом институте в 1871 г. Гельмгольца уважали его ученики не только потому, что он был великий ученый, но также за то, что он постоянно о них заботился. Он пользовался своим влиянием в академии для оказания финансовой поддержки сотрудникам своей лаборатории. Гольдштейн благодаря этому получил деньги от академии в 1878,

1879, 1881, 1882 и 1887 годах. Он всю жизнь с уважением и благоговением относился к своему учителю, образцу для подражания и наставнику, которому он был многим обязан.

Возможная причина того, что Гольдштейн, будучи известным ученым, не смог интегрироваться в немецкие научные исследования и даже получить преподавательскую должность в университете, кроется в его еврейской родословной. Многим еврейским физикам удалось закрепиться лишь в теоретической физике, которая в то время еще мало привлекала к себе внимание.

В конце XIX в. директор Берлинской астрономической обсерватории Вильгельм Фёрстер (*Wilhelm Julius Foerster*, 16.12.1832—18.01.1921) начал развивать астрономию как междисциплинарную область, которая включала физику и науки о Земле, рис. 17. В отличие от астрономии, физика была чем-то иным. Физик постоянно изменяет условия своих экспериментов, и методами проб и ошибок медленно раскрывает тайны природы. Таким образом, астрономы и физики идут разными путями, и у них нет никаких тенденций заглядывать за свои горизонты. Из-за слепоты ученых к явлениям, находящимся за пределами их областей познания, многие актуальные научные проблемы остаются нерешенными. К этому времени был достигнут незначительный прогресс в изучении природы комет. Вильгельм Фёрстер в связи с этим организовал амбициозный проект «Исследования природы электричества в космосе». Соответствующие эксперименты касались имитации кометных явлений, полярных сияний и их частоты, а также корреляции между солнечными пятнами и изменениями магнитного поля Земли. Неизвестно, кто подал идею, чтобы сравнить газовые разряды с космическими явлениями, но Фёрстер был убежден, что, проводя такую аналогию, можно сделать очень важные открытия [30].

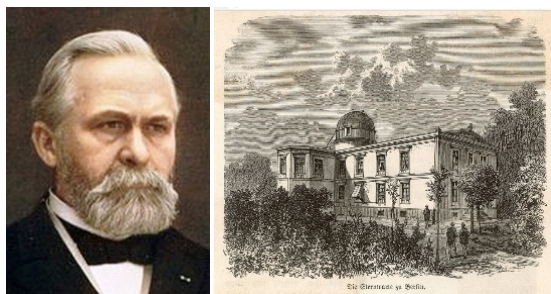


Рис. 17. Немецкий астроном Вильгельм Юлиус Фёрстер и Берлинская обсерватория (Германия. Рисунок Мэри Эванс. 1860 г.).

Fig. 17. German astronomer Wilhelm Julius Foerster and the Berlin Observatory (Germany. Drawing by Mary Evans, 1860)

Для руководства проектом он пригласил своего знакомого, Евгения Гольдштейна, одного из самых известных ученых в области электрического разряда в тот период времени. При этом главным аргументом приглашения явилось то, что он имел опыт использования газоразрядных трубок в лабораторных экспериментах. Гольдштейн стал ассистентом в Берлинской обсерватории, но не стал профессором в университете. Его официальной обязанностью было экспериментальное исследование взаимосвязи между электричеством и космическими явлениями.

В июле 1882 г. Венская Академия получила от Гольдштейна запечатанное письмо, которое не прочитали и открыли только в 1884 г. В нем содержалось краткое сообщение с описанием эксперимента, в котором электрод помещен во второе темное пространство в газовом разряде. В этом случае из этого электрода возникает свет в виде струны или полосы (нем. *Lichtstreif* — полоса света). Гольдштейн назвал эту светящуюся полосу «боковая полоса» (нем. *Lateralstreifen*). При определённых условиях и подходящем угле обзора эта боковая полоса выглядела как хвост кометы, похожий на большую комету Донати¹⁸, рис. 18. Такие кометные хвосты производили очень сильное впечатление. Фёрстер использовал их для продвижения своей междисциплинарной программы. Например, они были представлены германскому императору, принцу прусскому и другим важным чиновникам в 1892 г.



Рис. 18. Итальянский математик и астроном Джованни Батиста Донати (итал. Giovanni Battista Donati) и «Комета Донати», изображенная на картине Уильяма Дэйса «Воспоминание о 5 октября 1858 года» (1859, Лондон, галерея Тейт).

Fig.18. Italian mathematician and astronomer Giovanni Battista Donati (It. Giovanni Battista Donati) and “Comet Donati” depicted in the painting by William Dyes “Memories of October 5, 1858” (1859, London, Tate Gallery)

Самой загадочной проблемой физики комет был тот факт, что их хвост направлен в сторону от Солнца. На рис. 19 показан рисунок кометы Даниэ-

¹⁸ Комета Донати — долгопериодическая комета, открытая итальянским астрономом Джованни Донати 2 июня 1858 г. После Большой Кометы 1811 г. она была наиболее красивой из комет, явившихся в XIX веке.

ля¹⁹ (*comet Daniel*), сделанный немецким астрономом Максимилианом Вольфом (нем. *Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf*; 21.06.1863—03.10.1932) из Гейдельбергской астрономической обсерватории. Из ядра к Солнцу устремляются твёрдые частицы, которые окутаны туманной оболочкой (комой). Потоки солнечных лучей выбивают частицы газа из комы и отбрасывают их назад, вытягивая в длинный дымчатый хвост, который движется за ней в пространстве. Это объяснялось в то время предположением о существовании особой силы отталкивания, действующей на частицы кометы. Природа этой отталкивающей силы также была совершенно не ясна. Отталкивающая сила была в 150 раз сильнее, чем гравитация Солнца. Немецкий астроном Фридрих Зеллнер (*Johann Karl Friedrich Zoellner*, 1834—1882) предположил наличие электростатических сил, а шведский физико-химик Сванте Аррениус (швед. *Svante August Arrhenius*; 19.02.1859—02.10.1927) позже объяснил причину отклонения как воздействие светового давления.

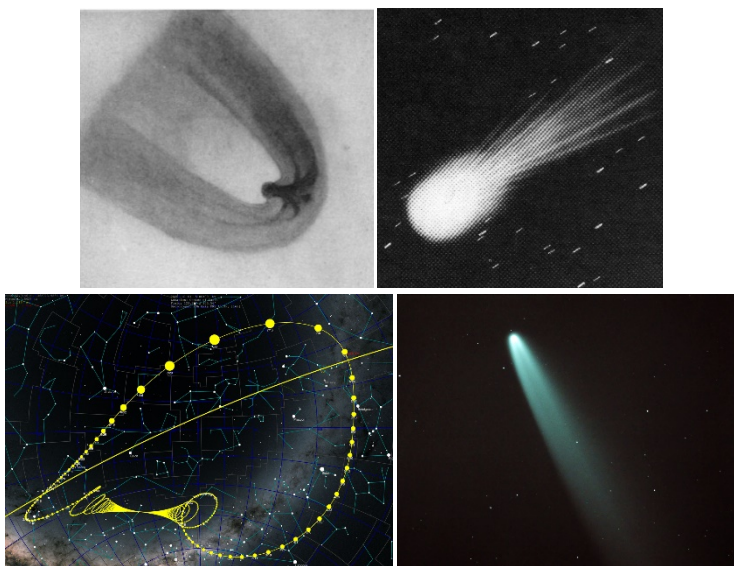


Рис. 19. Комета Даниэля: рисунок [30], сделанный Максом Вольфом (изображение повернуто) 1909 г., и фото, 1907 г. Комета «Неовайз» («NEOWISE» C/2020 F3) и её траектория. «Неовайз» наблюдалась в июне 2020 г. и вернется лишь через 6800 лет.

Fig. 19. Comet Daniel: drawing [30] by Max Wolff (image rotated) 1909 and photo 1907. Comet «Neowise» (C/2020 F3) and its trajectory. «Neowise» was observed in June 2020 and will return only 6,800 years later

¹⁹ Комета Даниэля открыта 7 декабря 1909 года Закеусом Даниэлем (Zaccheus Daniel, Zaccheus Daniel, Принстонский университет, Нью-Джерси, США) как объект девятой звездной величины.

Гольдштейн при построении экспериментальной модели кометы провел аналогию между космическим пространством и газоразрядной трубкой. Он считал, что в небе происходит то же самое, что и в трубке. Поскольку физический процесс в газоразрядной трубке может быть применен к комете, то эффекты имеют один и тот же оптический вид, а процессы могут быть идентифицированы как имеющие одинаковое происхождение.

Физическая идея хвостов кометы Гольдштейна состояла в том, что пространство — это вакуум, и поэтому его можно сравнить с разрядной трубкой. Согласно Гольдштейну существуют доказательства того, что катодные лучи исходят от Солнца. Когда катодные лучи солнца попадают в ядро кометы, образуются вторичные катодные лучи. Эти вторичные лучи испускаются перпендикулярно поверхности, на которую падают первичные лучи. Но поскольку Солнце является катодом, лучи от кометы подвержены отклонению, обнаруженному Гольдштейном. Вторичные лучи искривляются, и хвост кометы приобретает свой типичный вид.

Гольдштейн начиная с 1888 года и до своей отставки в 1921 г. официально работал над астрофизической проблемой под названием «Исследование электричества в космосе». За этот период времени ему удалось экспериментально воспроизвести кометные хвосты в газоразрядных трубках. Гольдштейн сделал более 70 публикаций, касающихся электричества, газовых разрядов и т. д., но при этом не написал ни одной статьи, посвященной электричеству в космосе. Трудно поверить, но это так. Более 30 лет Гольдштейн получал средства от прусского государства, ничего не публикуя о своих официальных исследованиях! Последним документом в личном деле Гольдштейна в обсерватории является заявление Фёрстера о присуждении ему премии.

Как выглядели искусственные хвосты комет Гольдштейна до сих пор не известно, так как утеряны фотографии экспериментов Гольдштейна. В Институте физики Кирхгофа в Гейдельберге (Heidelberg) его сотрудник Майкл Граули (Michael Grauli) попытался реконструировать хвосты комет в соответствии со скудными данными Гольдштейна, рис. 20, [35]. Эти эксперименты не являются исторической репродукцией оригинальных экспериментов Гольдштейна. Для такого воспроизведения слишком мало исходного материала.

Эксперименты Майкла Граули показывают, что Гольдштейн мог производить электрические эффекты, напоминающие хвосты комет. Детали вновь изготовленного искусственного хвоста кометы очень похожи на рисунки волка. Современные эксперименты не являются строгим историческим воспроизведением, и люди сто лет назад наверняка смотрели на

них другими глазами. Но эти картины дают нам представление о том, что Гольдштейн и Фёрстер показывали германскому императору.

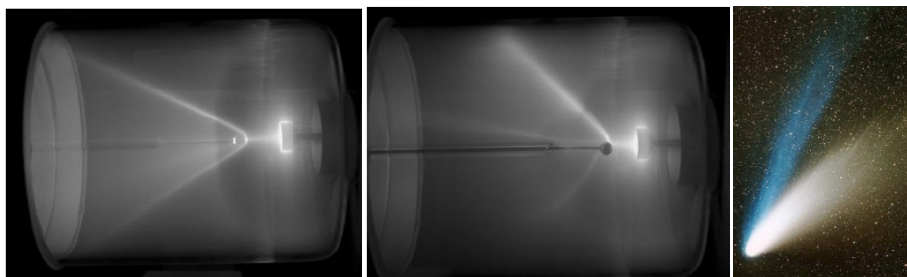


Рис. 20. Модели комет Гольдштейна: Модель 1 (слева [30]). Стекланный шарик помещен в газоразрядную трубку. Катодные лучи исходят от катода с правой стороны. Шар попал под лучи, и появились вторые лучи. Хвосты состоят из этих вторичных лучей. Модель 2 (посередине [30]). Стекланный шар заменен железным шаром. Комета имеет два хвоста и напоминает комету Хейла — Боппа, открытую 23 июля 1995 (справа).

Fig. 20. Goldstein comet models: Model 1 (left [30]). A glass ball is placed in a gas discharge tube. The cathode rays come from the cathode on the right side. The ball fell under the rays, and the second rays appeared. The tails are composed of these secondary rays. Model 2 (middle [30]). The glass ball is replaced with an iron ball. The comet has two tails and resembles the Hale–Bopp comet discovered on July 23, 1995 (right)

10. Заключение

Во второй половине XIX в. разряд электричества через разреженный газ стал темой интенсивных исследовательских экспериментов, прежде всего в Германии и отчасти в Великобритании. Появление усовершенствованных вакуумных газоразрядных трубок конструкции Генриха Гейсслера позволило многим ученым провести экспериментальные исследования катодных лучей.

Исследования, проведенные Грове, Гассиотом, Плюккером, Гитторфом, Круксом и другими учеными, представляют собой первые фундаментальные наблюдения новых явлений. Отличительной чертой этих исследований было использование газоразрядных трубок с холодным катодом. Для создания в них катодных лучей требовались большие вакуумированные стеклянные трубки и мощные источники напряжения. При электрическом разряде таких батарей образовывались положительные ионы газа, то есть происходил процесс ионизации. Эти ионы под действием электрического поля устремлялись к катоду и выбивали из его поверхности электроны, из которых и формировался поток катодных лучей. Заметим, что в трубках такого типа не существовало термоэлектронной эмиссии.

Под впечатлением экспериментов с катодными лучами Вильгельм Фёрстер запустил междисциплинарную программу, объединившую астрономию и физику катодных лучей. Фёрстер считал, что эксперименты Гольдштейна могут быть важны для исследования космоса. Катодно-лучевая модель кометы Гольдштейна позволила с неожиданной стороны взглянуть на природу формирования хвостов комет. Причины, по которым Гольдштейн ничего не публиковал о своих астрофизических предположениях, не известны, возможно, он не хотел делать поспешных выводов. После смерти Фёрстера и Гольдштейна их проект не был развит.

Благодаря совершенствованию конструкций газоразрядных трубок они стали своеобразными контейнерами, в которых можно было собирать ресурсы из различных дисциплинарных контекстов, наряду с экспериментальным аппаратом, построенным вокруг них. Трубки превратились во все более сложные интерфейсы, обеспечивающие связь между чувствами человека и микромиром. Шло зарождение катодно-лучевых технологий и формировалось одно из научных направлений, которое привело к появлению первых практических электронных приборов в области электротехники, а позже и радиотехники.

Список литературы

1. Watson W. An account of the phenomena of electricity in vacuo with some observations thereupon // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1751—1752. Vol. 47. P. 362—376.
2. Faraday Michael. VIII Experimental researches in electricity. Thirteenth series // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1838. Vol. 128. P. 125—168.
3. Gassiot John P. XIII. On some Experiments made with Ruhmkorff's Induction Coil // *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1854. Vol. VII. Fourth Series, January—June. P. 97—99.
4. Лакур П., Аппель Я. Историческая физика. Т. II. Одесса. Mathesis. 1908. С. 375.
5. Grove W. R. On the Electro-Chemical Polarity of Gases // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1852. Vol. 142. P. 87—101.
6. Gassiot John P. On the Stratification and Dark Band in Electrical Discharges as Observed in the Torricellian Vacua // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1858. Vol. 148. P. 1—16.
7. Plücker M. Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung // *Annalen der Physik und Chemie*. January 1, 1858. Band 105. S. 67—84.
8. Gassiot John P. On the Stratification in Electrical Discharges Observed in Torricellian and Other Vacua. Second Communication // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1859. Vol. 149. P. 137—160.
9. Gassiot John P. IV. Experimental Investigations on the Stratified Appearance in Electrical Discharges. Effect obtained by varying the Resistance // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1863. Vol. 12. P. 329—340.
10. Mayer W. H. T. Über das geschichtete elektrische Licht. Berlin. 1858. 29 S.

11. Graetz L. Die Elektrizität und ihre Anwendungen. Verlag Engelhorn Stuttgart. 1910. 690 S.
12. Plücker M. Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung in gasverdünnten Räumen // *Annalen der Physik und Chemie*. January 1, 1859. Band 107. S. 77—113.
13. Julius Plücker. Biography in *Encyclopaedia Britannica*.
URL: <https://www.britannica.com/biography/Julius-Plucker> (22.04.2020).
14. Hedenus Michael. Der Komet in der Entladungsröhre : Eugen Goldstein, Wilhelm Foerster und die Elektrizität im Weltraum. Diepholz : GNT-Vlg, 2007. 246 P.
15. Meinel Christoph. Rühmkorff, Röntgen, Regensburg : Historische Experimente zur Gasentladung. Regensburg : Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte, 1997. S. 35.
16. Hittorf W. I. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Erste Mitteilung // *Annalen der Physik und Chemie*. 1869. Band 136. No. 1. S. 1—31. No. 2. S. 197—234.
17. Hittorf W. Über die Elektrizitätsleitung der Gase // *Annalen der Physik*. 1884. Band 257. Heft 1. S. 90—139.
18. Is Static A Solar Message? Pupin Puts Question to Learned Society // *Radio world*. January 15, 1927. Vol. 10. No. 17. P. 8.
19. Michael Hedenus. Der Komet in der Entladungsröhre : Eugen Goldstein, Wilhelm Foerster und die Elektrizität im Weltraum. Diepholz : GNT-Vlg, 2007. P. 23.
20. Willner A. Ueber die Spectra einiger Gase bei hohem Drucke // *Annalen der Physik und Chemie*. 1869. Band 137. Heft 7. S. 337—361.
21. Goldstein E. “Über Beobachtungen an Gasspektren“ in *Berlin Akademie Monatsberichte*. 1874. S. 593—610.
22. Goldstein E. Beobachtungen an Gasspectri // *Annalen der Physik und Chemie*. 1875. Band 154. Heft 1. S. 128—149.
23. Goldstein E. “Vorläufige Mittheilungen über electriche Entladungen Verdünnten Gasen“ in *Berlin Akademie Monatsberichte*. 1876. S. 279.
24. Goldstein E. Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode inducirter Entladungen // *Annalen der Physik und Chemie*. 1898. Band 300. Heft 1. S. 38—48.
25. Goldstein E. “Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathodeinducirter Entladungen“ in *Berlin. Akd. Monatsber*, II, 1886. 691 S.
26. Эйхенвальд А. А. Электричество (курс лекций). Третье издание. М. : Типо-литография т-ва И. Н. Кушнеревъ и К^о, 1918. С. 545.
27. Терлецкий Е. Популяризатор с еврейми в машине времени. Тель-Авив : Э.РА, 2018. С. 630.
28. Varley C. F. Some Experiments on the Discharge of Electricity through Rarefied Media and the Atmosphere // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1871. Vol. 19. P. 236—242.
29. Noakes Richard. Cromwell Varley FRS, Electrical Discharge and Victorian Spiritualism // *Notes & Records of the Royal Society*. 2007. Vol. 61. P. 5—21.
30. Crookes W. The Bakerian lecture : On the illumination of molecular pressure, and the trajectory of molecules // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1879. Vol. 170. P. 135—164.
31. Thomson J. J. Mechanical effects produced by the rays. Conduction of Electricity Through Gases. Cambridge University Press, 1903. P. 501—502.
32. Humphrey T. E., Calisa Vaishnavi. A Century-Old Question: Does a Crookes Paddle Wheel Cathode Ray Tube Demonstrate that Electrons Carry Momentum? // *The Physics Teacher*. March 2014. Vol. 52. P.142—145.
33. Crookes O. M. Researches in the Phenomena of Spiritualism. London : J. Burns, 15, Southampton Row, Holborn, 1874. 141 P.

34. Brock William H. William Crookes (1832—1919) and the Commercialization of Science. Aldershot, UK : Ashgate, 2008. 556 P.
35. Hedenus M. Eugen Goldstein and his laboratory work at Berlin Observatory // Astron. 2002. Vol. 323, No. 6. P. 567—569.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

УДК 621.37-621.39(091)

Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, д. 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 30 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 5 октября 2020 г.

Принято к публикации: 9 октября 2020 г.

Аннотация: *Результаты экспериментальных исследований, полученные учеными в различных научных лабораториях, подтвердили разные версии природы катодных лучей. Кроме того, доказательная важность некоторых из этих результатов была неоднозначной. Неоднозначность результатов исследований катодных лучей, полученных Генрихом Герцем, стала причиной к укреплению ложного взгляда на их природу как на волновой процесс. Эксперименты Ф. Ленарда, ученика Генриха Герца, привели к прояснению корпускулярной природы катодных лучей и открытию электрона. Благодаря этому была разработана трубка Брауна и изобретен выпрямитель Венельта.*

Ключевые слова: *катодные лучи, эксперименты Генриха Герца, трубка Ленарда, окошко Ленарда, катодная трубка Брауна, выпрямитель Венельта.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 227—260.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 227—260.

Development of cathode-ray technologies at the turn of the 19th and 20th centuries

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: September 30, 2020

Peer-reviewed: October 5, 2020

Accepted: October 9, 2020

Abstract: *The results of experimental studies obtained by scientists in various scientific laboratories have confirmed different versions of the nature of cathode rays. In addition, the evidence-based importance of some of these results has been mixed. The ambiguity of the results of studies of cathode rays obtained by Heinrich Hertz became the reason for the strengthening of the false view of their nature as a wave process. The experiments of F. Lenard, a student of Heinrich Hertz, led to the clarification of the corpuscular nature of cathode rays and the discovery of the electron. Thanks to this, the Brown tube was developed and the Wehnelt rectifier was invented.*

Keywords: *cathode rays, experiments by Heinrich Hertz, Lenard tube, Lenard window, Brown cathode tube, Wehnelt rectifier.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Development of cathode-ray technologies at the turn of the 19th and 20th centuries,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 227–260, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Лекция Крукса «О лучистой материи» (On radiant matter), прочитанная 22 августа 1879 г. в Британской ассоциации содействия развитию науки (British Association for the Advancement of Science), была напечатана сразу же через 7 дней, сначала в «Chemical News»¹ [1]. Немецкий перевод этой статьи появился в Лейпциге той же осенью 1879 г. В этом переводе лучистая материя, или четвертое состояние материи, были проиллюстрированы качественными печатными блоками рисунков, заимствованных из английского оригинала. Новая научная статья, а с ней и трубки Крукса, обратили на себя внимание на европейском континенте, и вызвали новый

¹ Крукс был номинальным редактором и владельцем одного из самых успешных и престижных среди научных журналов того времени — *Chemical News*, с момента его основания в декабре 1859 г. и до своей смерти.

интерес к исследованию катодных лучей. В этом немалую роль сыграл молодой научный сотрудник Боннского университета Генрих Рудольф Герц (нем. *Heinrich Rudolf Hertz*, 22.02.1857—01.01.1894, рис. 1).

2. Исследования Генриха Герца

В начале 1880 г., 23 января, Генрих Герц защитил докторскую диссертацию (PhD) на тему «Об индукции во вращающихся сферах» (нем. *Ueber die Induction in rotirenden Kugeln*) в Берлинском университете. Через 14 дней, 5 февраля, он успешно сдал экзамены, полагающиеся после защиты диссертации. 15 марта 1880 г. Герцу был вручен докторский диплом (PhD) с «большой похвалой» (лат. *magna cum laude*), что являлось редкостью в Берлинском университете.



Рис. 1. Генрих Рудольф Герц с супругой Элизабет. 1886 г. Физический институт Боннского университета, где Генрих Герц работал и жил с 1889 г. до своей смерти в 1894 г.

Fig. 1. Heinrich Rudolf Hertz with his wife Elizabeth. (1886). Physical Institute of the Bonn University where Heinrich Hertz worked and lived from 1889 till his death in 1894

Вскоре Герц занял освободившееся место ассистента в Физическом институте Гельмгольца и получил в свое распоряжение физическую лабораторию, которая была оснащена лучшим оборудованием для того периода времени. У Герца появились широкие возможности для экспериментальных научных исследований.

В начале Герц занялся теоретическими вопросами в области электромагнетизма, упругости и испарения жидкости. Сразу после завершения работы по испарению Герц обратился к другой области, за которой он всегда следил с большим интересом, — к области электрического разряда в газах. Случилось это 29 июня 1882 г., о чем он сообщает в письме: «Я хотел бы поработать в несколько более экспериментальной области и оставить точные измерения в стороне, кроме того, рассматриваемая область очень темная и неизведанная, и ее исследование, вероятно, представляет большой теоретический интерес» [2].

Для экспериментальных исследований Герц собрал установку, которая состояла из катушки Румкорфа, электрометра и разрядной трубки оригинальной конструкции. Конструкция трубки Герца отличалась от трубок Гейсслера, так как позволяла изолировать рассматриваемое явление от остальной легкой массы разряда. Для экспериментов использовалась катушка Румкорфа большой мощности с длиной искры от 4 до 5 см на открытом воздухе и лейденская банка площадью около двух квадратных футов, которая подключалась к полюсам индуктора.

Эксперименты проводились с газоразрядной трубкой, состоящей из вложенных друг в друга двух стеклянных трубок. Одна трубка содержала в запаянном конце катод, в то время как ее второй конец был открыт. Этим концом трубка помещалась в другую стеклянную трубку, в которой размещался подвижный электрод — анод. Анод представлял собой цилиндр из металлической сетки, способный пропускать катодные лучи. Всё устройство помещалось под колпак воздушного насоса, который создавал под ним давление 30—50 мм рт. ст., после этого включалась катушка Румкорфа и инициировались электрические разряды. Благодаря оригинальной конструкции анода удалось получить удобный для исследования катодный пучок, который располагался за ним.

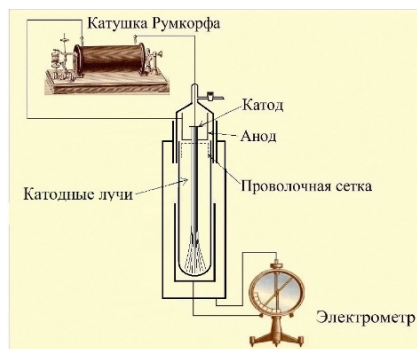


Рис. 2. Экспериментальная установка Г. Герца на катодной трубке для обнаружения переноса электрического заряда пучком катодных лучей. 1883 г.

Fig. 2. G. Hertz's experimental setup on a cathode tube for detecting the transfer of electric charge by a beam of cathode rays. 1883

Герц провел эксперименты, которые ранее были проведены другими учеными, в частности, Е. Гольдштейном. Результаты исследований были опубликованы в мае 1883. В начале статьи он отмечает: «В большинстве случаев электрический разряд настолько незаметен, что, кажется, не стоит упоминать о нем, но когда я впервые заметил его, то увидел такой поразительном вид, что я был вынужден провести несколько экспериментов с этим явлением» [3]. Им было, в частности, подтверждено, что катодные лучи оказывают значительное механическое воздействие. Проволока, подвешенная в потоке лучей, совершает сильные колебания, как и упругий

лист слюды, от которого отклоняется луч. Если положить кусок слюды на открытый конец трубки, то инициированные лучи мгновенно его отбрасывают на некоторое расстояние. Часть эффектов, которые он обнаружил, не были описаны в научной литературе. Это невзирая на то, что Гольдштейн неоднократно наблюдал подобные явления в своих многочисленных экспериментах с разрядом в разряженных газах.

Отметим только некоторые наиболее отличительные результаты экспериментов, которые получил Герц. Им не был подтвержден факт влияния магнита на катодные лучи. В эксперименте для доказательства того, что катодные лучи являются носителями электрического заряда, он установил газоразрядную трубку между пластинами заряженного конденсатора. В этом случае электрическое поле конденсатора должно было отклонить катодные лучи и сместить тень предмета на экране. Однако ничего подобного Герц также не увидел.

Неудача проведенных Герцем опытов объяснялась, в одном случае, недостаточной чувствительностью использованного им электрометра, а в другом — слабостью электрического поля конденсатора, которое он создал. Опыты по электрическому отклонению катодных лучей оказались не столь убедительными. Герц не обнаружил такого отклонения и пришел к выводу, что катодный луч — это колебательный процесс продольных волн в эфире. Он утвердился в понимании того, что катодные лучи не могут быть заряженными частицами, что было неправильно.

Полученные научные результаты экспериментов Герц обсудил с Е. Гольдштейном, который побудил того продолжить исследования природы тлеющего разряда и уделить основное внимание структуре этого явления, а также связи между его световыми и электрическими свойствами. Гольдштейн оказывал всяческую помощь в проведении исследований. За это Герц ему был очень благодарен, о чем он не преминул отметить в начале публикации, последовавшей после окончания экспериментов [4]. Для экспериментов, к сентябрю 1882 г., Герц построил мощную батарею, состоящей из тысячи элементов Планте.

Эксперименты проходили с определенными трудностями. Часто отказывала во время работы батарея и ее в конце концов пришлось заменить индуктором типа катушки Румкорфа [4, с.785—786]. Можно предположить, что это обстоятельство негативно отразилось на результатах проведенных опытов.

Герц поставил задачу получить тлеющий разряд, который при самых тонких методах исследования не обнаруживал бы следов разрывности. Оказалось, это вполне возможно, причем доказать отсутствие прерывно-

сти Герц смог шестью разными способами, не считая некоторых косвенных доказательств.

В эксперименте Герц не смог установить дискретность электрического разряда. Свои соображения по этому поводу он изложил следующим образом: «Из совокупности представленных экспериментов я прихожу к выводу, что испытанные разряды были непрерывными. Этот вывод следует из этого, что в целом разряд батареи следует рассматривать как непрерывный, если он не обнаруживает прерывистости по известным характеристикам, и, кроме того, что разряды индуктора в зависимости от размера устройства, могут составлять от $1/1000$ до $1/60$ секунды, в течение этого интервала его следует рассматривать также как непрерывный ток» [4, с. 796—797].

Только через 18 лет, после экспериментов Герца, в 1910 г. американский физик Роберт Милликен (англ. *Robert Andrews Millikan*; 22.03.1868—19.12.1953) опытным путем показал, что электрический заряд дискретен, то есть заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда. Дискретность катодных лучей была установлена по их поведению в электрическом и магнитном полях. Ошибочный вывод Герца, по всей видимости, связан в первую очередь с несовершенством экспериментальных технологий, которые он использовал.

Некоторые факты в тот период времени заставляли предполагать отсутствие связи между световым лучом и электрическим током в газоразрядной трубке. Например, было известно, что катодные лучи всегда нормальны к поверхности катода, где бы ни располагался анод, тогда как ток, очевидно, должен менять свое направление с изменением местоположения анода. Герц задался целью внести полную ясность в этот вопрос. В таком эксперименте главное — отделить светящийся пучок от электрического тока. Нормальность катодного луча к поверхности катода подсказала способ такого отделения. В этом случае катод должен иметь форму диска с отверстием посередине, в центре которого располагается анод, по виду напоминающий головку булавки, рис. 3а. Герц провел такой эксперимент и из него сделал вывод, что магнитное действие светящегося пучка, если оно вообще существует, то не превышает $1/300$ части того действия, которое наблюдалось бы, если бы светящийся пучок был образован носителями электрического тока [4, с. 801] Этот вывод Герца сегодня является неправильным, так как известно, что светящийся пучок в газоразрядной трубке состоит из электронов, носителей электрического заряда, движение которых рождает магнитное поле.

Герц не обратил внимание на магнитное поле движущихся электронов, по всей видимости из-за того, что в разрядной трубке имелась боль-

шая концентрация остаточного газа. Концентрация остаточного газа еще не стала к тому времени объектом пристального внимания экспериментаторов, а от нее, как выяснилось впоследствии, существенно зависели многие важные свойства газового разряда. В частности, при большой концентрации газа катодный ток создает встречный поток положительно ионизированных атомов, магнитное поле которого отчасти компенсирует магнитное поле катодного тока.

В изложенном опыте объектом наблюдения служили видимые катодные лучи. Для того чтобы иметь возможность следить за распределением невидимых линий тока, Герц построил камеру в виде небольшого прямоугольного ящика, в котором электроды располагались таким образом, что происходило отделение лучей от тока, рис. 3б. Направление линий тока определялось по их магнитному действию на магнитную стрелку, подвешиваемую над ящиком в разных точках. Предыдущий опыт позволил утверждать, что поведение стрелки обуславливалось именно током, а не лучами. Отмечая положения стрелки, Герц получил графики распределения силовых линий для нескольких положений анода и катода. Один из таких графиков показан на рис. 3б. Поскольку линии тока явным образом не совпали с катодными лучами (пунктирные линии), то Герц еще более укрепился в своем мнении об отсутствии связи между током и лучами [4, с. 801—804].

После этого Герц решил выяснить электростатическое воздействие катодных лучей, рис. 3в. Сначала он попытался установить электростатическое действие самих катодных лучей, а затем электростатическое действие на них других заряженных тел. В итоге он получил ошибочный результат. Если бы катодные лучи были носителями электрического заряда, то поле конденсатора отклоняло бы их, а тень предмета на экране смещалась. Однако ничего подобного Герц тоже не заметил, хотя действие магнита на тот же катодный луч наблюдалось без труда.

Неудачу двух последних опытов Герца следует объяснить низкой чувствительностью использованного им электрометра в первом случае, и слабостью электрического поля, которое он был в состоянии создать, во втором случае.

В этих опытах факт несовпадения силовых линий с катодными лучами в действительности не имеет того значения, которое придавал ему Герц. Это расхождение объяснялось большой скоростью вылетевших из катода электронов, однако Герцу такая трактовка была неприемлема. Мысль о быстрых частицах посещала Герца, как показывает одно его замечание, но он считал ее невероятной [4, с. 815].

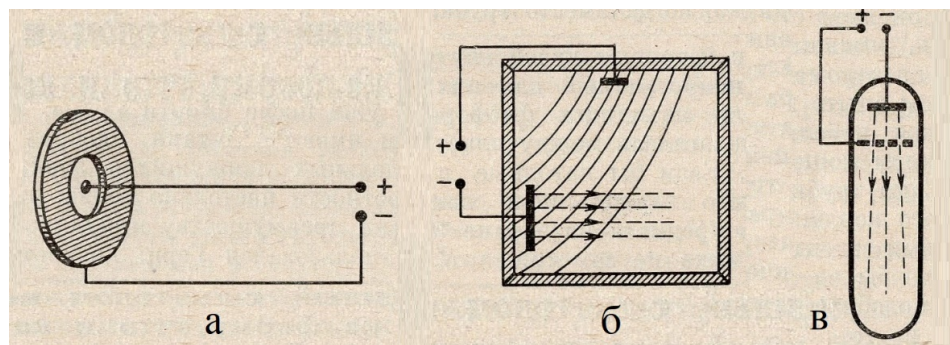


Рис. 3. Эксперименты Герца по отделению светящегося пучка от электрического тока:
а — модель катода в форме диска и в его центре анод в форме булавочной головки,
б — графики линий тока и лучей, в — опыт по выяснению электростатического действия катодных лучей.

Fig. 3. Hertz's experiments on the separation of a luminous beam from an electric current:
а — a model of a cathode in the form of a disk and an anode in the form of a pin head in its center,
б — graphs of streamlines and rays, в — an experiment on elucidating the electrostatic action of cathode rays

В результате своих опытов Герц решил, что катодные лучи непрерывны и ничего общего не имеют с электричеством. Более ошибочную позицию трудно даже предположить. К тому же Герц попытался развить ее, например, ввел понятие катодных лучей, создаваемых током, в отличие от обычных катодных лучей, создаваемых катодом [4, с. 809]. Он упорно подчеркивал аналогию между магнитным отклонением катодных лучей и магнитным вращением плоскости поляризации света [4, сс. 807, 816] и даже наметил крылатую аналогию: катодные лучи не более связаны с электричеством, чем свет с электрической лампочкой [4, с. 814].

Ошибочность выводов, сделанных Герцем по результатам проведенных экспериментов, сразу сказалась на дальнейшем развитии катодно-лучевых технологий. Среди физиков, особенно немецких, укрепился ложный взгляд на катодные лучи как на волновой процесс в эфире. Это сильно затормозило процессы познания природы катодных лучей, а ближайшему ученику Герца, Ленарду, стоило первенства в открытии электрона [5].

3. Лучи Ленарда

Лекция Крукса «О лучистой материи» была издана в виде небольшой книги объемом в 34 страницы в 1879 г., рис. 4. Книга имела успех у людей, интересующихся наукой, и продавалась во многих городах Европы. В

городе Прессбурге² (нем. *Pressburg*, ныне Братислава, Словакия), на востоке Австро-Венгерской империи на реке Дунай, о ней узнал Филипп Ленард (нем. *Philipp Eduard Anton von Lenard*, 07.06.1862—20.05.1947), когда ему было восемнадцать лет. Идя по дороге в школу, он увидел книгу взглянув в окно книжного магазина, что и предопределило его выбор научного пути. Воодушевленный смелым утверждением Крукса о том, что помимо твердого, жидкого и газообразного состояний, существует еще и четвертое агрегатное состояние материи, к которому он отнес катодные лучи. Ленард на протяжении двенадцати лет занимался исследованием катодных лучей.



Рис. 4. Общий вид города Прессбург со стороны реки Дунай (1901 г.)
и обложка книги Крукса «О лучистой материи» (1979 г.)

Fig. 4. General view of the city of Pressburg from the side of the Danube River (1901)
and the cover of Crookes's book "On Radiant Matter" (1979)

Ленард после окончания Королевской венгерской средней школы в 1880 г. провел два семестра в изучении естественных наук в Будапеште и Вене. После этого он предпочел работать в винном магазине своего отца в Прессбурге. В 1883 г. он продолжил учебу в Гейдельберге у Георга Германа Квинке (*Georg Hermann Quincke*) и Роберта Бунзена (*Robert Bunsen*). В 1886 г., после семестра обучения у Германа фон Гельмгольца в Берлине, он защитил диссертацию «О колебании падающих капель» (нем. *Ueber die Schwingung fallender Tropfen*) под руководством Георга Квинке и получил докторскую степень (PhD) в Гейдельберге³ (Heidelberg). После этого он до

² Этнический состав населения города Прессбург в 1880 г.: немцы (68 %), словаки (8 %), венгры (8 %) и прочие (16 %). Для сравнения, этнический состав населения города Братислава в 2001 г.: словаки (91,4 %), венгры (3,8 %) чехи (1,9 %), немцы (0,3 %) и прочие (2,6 %).

³ Гейдельберг (также Хайдельберг, нем. *Heidelberg*, алем. нем. *Heidelbärg*) — город в Германии, на северо-западе земли Баден-Вюртемберг. Население (2018) — около 160000 жителей. Город известен своим университетом и замком. Гейдельбергский университет (нем. *Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*) является старейшим университетом современной Германии, который основан в 1386 году.

1889 г. был ассистентом Квинке в физическом институте Рупрехт-Карлс-Университета Гейдельберга (нем. *Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*).

В 1890 г. Ленард поехал в Бреслау в качестве ассистента, а через год, с 1 апреля 1891 г., начал работать ассистентом Генриха Герца в Бонне. В 1892 г. Герц опубликовал свою последнюю статью, которую посвятил явлению прохождения катодных лучей через тонкие металлические пластинки [6]. Статья начиналась словами: «Катодные лучи отличаются от света существенным образом в отношении способности проникать через твердые тела». Описывая результаты опытов по прохождению катодных лучей через золотые, серебряные, платиновые, алюминиевые и др. тонкие металлические пластинки, Герц отметил, что он не заметил особых отличий в наблюдаемых явлениях. Лучи проходят через тонкие металлические пластинки не прямолинейно, а дифракционно рассеиваются. Этот факт, по его мнению, свидетельствует об их волновой природе. В этой работе Герц рассматривал прохождение катодных лучей не только в сплошных пластинах, но и через отверстия в них. Он отметил, что в последнем случае они должны распространяться по прямой после прохождения через отверстие, но этого не происходило. Герц, объясняя это явление, сделал предположение, что лучи дифракционно рассеиваются по мере прохождения.

Природа катодных лучей все еще оставалась неясной. Герц в связи с этим предложил Ленарду исследовать поведение катодных лучей вне газоразрядной трубки. Ленард для экспериментов с катодными лучами вне газоразрядной трубки сконструировал в 1892 г. оригинальную трубку, которую стали называть «трубкой Ленарда», рис. 5. Отличительной особенностью конструкции трубки явилось наличие небольшого отверстия диаметром 1,7 мм, через которое устремлялся поток катодных лучей вне трубки. Это отверстие получило название «окошко Ленарда». Благодаря этому впервые появилась возможность изучать катодные лучи независимо от газового разряда.

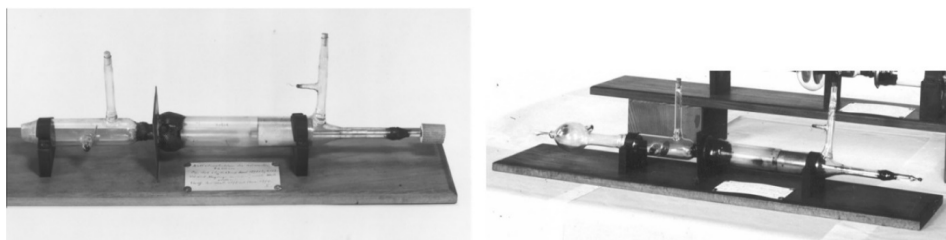


Рис. 5. Трубка Ленарда (слева) и трубка Ленарда с наблюдательной трубкой (справа), которую сделал Ленард в декабре 1892 г. и описал её в публикации 1894 г.

Fig. 5. The illustrations show a Lenard tube (left) and a Lenard tube with an observation tube (right), which Lenard made in December 1892 and described in an 1894 publication

В экспериментах Ленарда отверстие в боковой части разрядной трубки было герметично закрыто тонкой алюминиевой фольгой толщиной 0,0003 мм, рис. 6 [7]. Фольга могла выдерживать давление атмосферы только с одной стороны и обладала заметной проницаемостью, что позволяло катодным лучам выйти в открытое воздушное пространство. Таким образом, наблюдение катодных лучей значительно облегчалось, так как можно было выбирать и изменять условия эксперимента независимо от условий их происхождения. Лучи, выходящие из «окошка», получили название «лучей Ленарда».

Ленард сначала провел исследование катодных лучей на открытом воздухе, в вакууме и различных газах (светильный газ, водород, кислород и угольная кислота) [8]. Он установил, что катодные лучи делают воздух слабосветящимся. Окошко окружает ореол голубоватого света, умеренно яркий только на его поверхности, при этом чувствуется сильный запах озона. Вещества, содержащие люминофор⁴, если их поднести к окну, начинают светиться своим особым светом на ближайшей к окошечку стороне. С увеличением расстояния от окошечка интенсивность явления быстро уменьшается и исчезает на расстоянии примерно шести сантиметров. Только величина расстояния определяет яркость света. Все явления фосфоресценции в пространстве наблюдения прекращаются, если магнит, приложенный к разрядной трубке, отталкивает катодные лучи от внутренней поверхности окошка.

Дальнейшие эксперименты Ленарда были связаны с природой катодных лучей и ответом на фундаментальный вопрос: зависит ли их распространение от присутствия вещества или это происходит в пустом пространстве. Невозможность получения катодных лучей в полном вакууме до сих пор не позволяла решить этот вопрос. Ленард показал, что магнит отклоняет катодные лучи как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве [9]. На рис. 7 показано перемещение светлого пятна из области *O* в область *O*₁ под действием магнита *M*. Величина этого перемещения различна при различной степени разрежения воздуха. Чем сильнее разрежение воздуха в трубке, тем меньше отклоняются магнитом катодные лучи. Существуют различные виды катодных лучей. Ленард наблюдал, что иногда можно отклонить, по-видимому, только часть катодных лучей. Впрочем, он не обратил особенного внимания на этот эффект. Если бы он сделал это, то, может быть, ему удалось бы сделать то открытие, которым в конце 1895 г. профессор Рентген в Вюрцбурге поразил мир.

⁴ Люминофор (от лат. *lumen* — свет и греч. *phoros* — несущий) — вещество, способное преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение (способность люминесцировать).

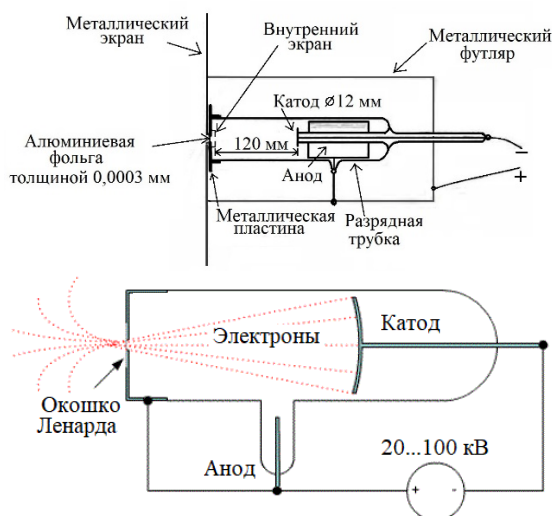


Рис. 6. Устройство [7] и принцип работы трубки Ленарда.

Fig. 6. Device [7] and the principle of operation of the Lenard tube

С одной стороны, магнитное отклонение катодных лучей, указывало на то, что они являются заряженными частицами, что совместимо с эфирной интерпретацией их природы. Можно было предположить, что магнитное поле изменило состояние эфира, вызвав отклонение лучей. С другой стороны, способность катодных лучей проходить через тонкие металлические листы, говорила о том, что они являются волнами в эфире, что может быть обосновано гипотезой, согласно которой катодные лучи являются заряженными частицами.

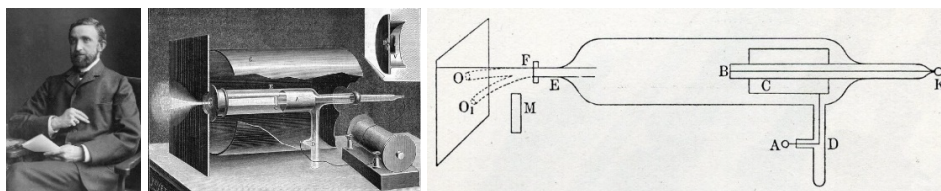


Рис.7. Филипп Эдуард Антон фон Ленард, общий вид трубки Ленарда и опыт по отклонению катодных лучей магнитом.

Fig. 7. Philip Edward Anton von Lenard, general view of the Lenard tube and experiment on the deflection of cathode rays by a magnet

Поскольку впервые была обнаружена проникаемость катодных лучей для твердых тел (металлов), то с появлением трубки Ленарда появилась возможность проверить проникаемость и для других веществ. Не

удалось найти ни одного твердого тела, которое реагировало бы на катодные лучи, как стекло на свет. Напротив, газообразные тела были намного более проницаемыми, чем твердые тела. Здесь излучающие линии измерялись сантиметрами и было несложно определить относительную меру проницаемости. Измеренная таким образом проницаемость была показана Ленардом в связи с плотностью газовой среды, поскольку каждый раз более тонкий газ был более проницаемым, чем более плотный.

Ленард заметил, что катодные лучи проникают в воздух (около 1 см) и другие вещества на разную глубину. Кроме того, он показал, что поглощение лучей пропорционально толщине и плотности поглощающего вещества. Проникающая способность лучей возрастает при большом напряжении, так как происходит увеличение их скорости и энергии [10].

Катодные лучи проходили через это окошко, и, таким образом, Ленард смог измерить их длину свободного пробега вне трубки. Как оказалось, пробег был намного длиннее, чем у атомов и молекул. Проникновение катодных лучей через золотую фольгу указывало на то, что они состоят из частиц, которые значительно меньше, чем атомы. В табл. 1 приведенные экспериментальные данные, полученные Ленардом для различных веществ.

Табл. 1. Экспериментальные данные по проникающей способности катодных лучей, полученные Ленардом для различных веществ [10].

Table 1. Experimental data on the penetrating ability of cathode rays obtained by Lenard for various substances [10]

Вещество	Проникающая способность, 1/см	Плотность, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\frac{\text{Проникающая способность, см}^2}{\text{Плотность, г}}$
Газообразный водород под давлением 3,3 мм	0,00149	0,000000368	4040
Атм. воздух давлением 0,78 мм	0,00416	0,00000125	3330
Газообразный водород под давлением 760 мм	0,476	0,0000849	5610
Атм. воздух давлением 760 мм	3,42	0,00123	2780
Сероводород H ₂ S. Кислота при давлении 760 мм	8,51	0,00271	3110
Коллодиевая кожа	3310	1,10	3010
Бумага	2690	1,30	2070
Стекло	7810	2,47	3160
Алюминий	7150	2,70	2650
Слюда	7250	2,80	2590
Искусственное сусальное золото	23800	8,90	2670
Серебро	32200	10,5	3070
Золото	55600	19,3	2880
		В среднем	3200

Из опытов Ленарда можно сделать общее заключение. Катодные лучи распространяются в пустоте беспрепятственно. Ленард смог проследить их в своей разрядной трубке на расстоянии нескольких метров от окошка. Катодные лучи в газах, в частности, при больших давлениях, заметны лишь на расстоянии нескольких миллиметров от окошка. Это означает, что они поглощаются газами и Ленард определил, что поглощение катодных лучей происходит тем сильнее, чем больше плотность того газа, в котором эти лучи распространяются.

Эксперименты Филиппа Ленарда привели к прояснению корпускулярной природы катодных лучей, хотя к его великому огорчению, приоритет в открытии электрона отошел в 1897 г. к Дж. Дж. Томсону.

4. Открытие Рентгена

В 1893 г. заведующий кафедрой физики⁵ университета немецкого города Вюрцбурга⁶ (нем. *Würzburg*) Вильгельм Рентген (нем. *Wilhelm Conrad Röntgen*, 27.03.1845—10.02.1923) заинтересовался исследованиями катодных лучей, рис. 8.

В экспериментах Рентген использовал сначала катодные трубки Гитторфа и Крукса, а после трубки Ленарда. Катодные трубки конструкции Ленарда дал ему сам разработчик. Эти трубки были использованы только в некоторых научных экспериментах. Рентген был хорошо знаком с Ленардом и его научными работами.

Трубки Гитторфа — Крукса имели более толстые стенки в сравнении с другими и были приспособлены для проведения исследований электрических разрядов в разреженных газах. Трубки Ленарда с окошками, закрытыми тонкой фольгой, использовались Рентгеном для исследования катодных лучей в воздухе. Помимо этого в трубках Ленарда можно было наблюдать флуоресценцию платиноцианида бария, если поместить его рядом с небольшим окном, через которое катодные лучи выходили в воздух.

Через два года после начала исследований Вильгельм Рентген обнаружил, что катодная трубка излучает до сих пор не известные науке лучи. Открытие Рентгена произошло ночью в пятницу 8 ноября 1895 г., когда он проводил эксперимент в своей лаборатории. Эксперимент был связан с эффектом прохождения электрического тока через газы при низком давлении. Это можно назвать судьбой, удачей или случайностью, но был ряд моментов,

⁵ С 1888 г. Рентген занимал должность профессора и одновременно директора Физического института Вюрцбургского университета.

⁶ Вюрцбургский университет имени Юлиуса и Максимилиана (нем. *Julius-Maximilians-Universität Würzburg*) — один из старейших университетов Германии, находится в Вюрцбурге, Бавария.



Рис. 8. Общий вид здания Физического института Вюрцбурга (1892 г.), Вильгельм Рентген в возрасте 50 лет в своей лаборатории Физического института университета Вюрцбурга и катодные трубки в первых экспериментах Рентгена.

Fig. 8. General Physics Institute of Würzburg (1892), Wilhelm Roentgen at the age of 50 in his laboratory at the Physics Institute of the University of Würzburg and cathode tubes in Roentgen's first experiments

которые сделали эту ночь незабываемой. Во-первых, Рентген в эксперименте полностью поместил трубку Гитторфа — Крукса в футляр из черного картона, по примеру Ленарда, сделав ее светонепроницаемой (рис. 9). Во-вторых, его лаборатория погрузилась во мрак. И, наконец, кусок бумаги, окрашенный кристаллами платиноцианида бария, лежал на скамейке на некотором расстоянии от трубки.



Рис. 9. Общий вид катодной трубки Рентгена в первых его экспериментах и эксперимент, объясняющий открытие X-лучей (1895 г.) [11]

Fig. 9. General view of the X-ray cathode tube in his first experiments and the experiment explaining the discovery of X-rays (1895) [11]

Этот кусок бумаги с платиноцианидом бария был «шансом», который природа дала Рентгену, чтобы раскрыть один из ее секретов. Когда кристаллы засветились мерцающей желто-зеленой флуоресценцией, то удивление посетило проницательный научный ум Рентгена. Неужели, катодные лучи могут заставить кристаллы светиться, но на таком расстоянии? Он поместил кристаллический экран на еще большем расстоянии от трубки, куда, как известно, проникали катодные лучи дальнего действия. Опять странное свечение! С колотящимся сердцем он схватил книгу и поместил ее между трубкой Крукса и экраном. Кристаллы продолжали светиться. Что

бы это ни было, но это проходило через книгу! Затем он попробовал металлы и обнаружил, что лучи проникают с разной степенью, хотя свинец и платина полностью останавливают их. После этого настало самое драматическое испытание из всех. Рентген обнажил руку, казалось его сердце, должно было, почти остановиться, когда он увидел тени своих костей. Во время экспериментов Рентген делал фотографии своих открытий, было очевидно, что он обнаружил нечто гораздо более захватывающее, чем катодные лучи — *X*-лучи! Для открытых лучей сам Рентген предложил название «*X*-лучи» (англ. *X-ray*), которое закрепилось в основном в англоязычной литературе. Однако в немецкоязычных странах излучение обычно называют в честь ученого, который его открыл: рентгеновские лучи.

Эксперименты Рентгена показали, что *X*-лучи возникают в месте столкновения катодных лучей с преградой внутри катодной трубки. В первых его экспериментах это были стеклянные стенки трубки: в местах, на которые падали катодные лучи, они флуоресцировали (рис. 8). Это и стало причиной появления неизвестных лучей. Подобные эффекты видели многие исследователи катодных лучей до Рентгена, но не придавали этому большого значения.

Стороннему наблюдателю рентгеновский снимок руки, показанный ниже (рис. 10), покажется ничем не примечательным. Однако на самом деле это первый в мире рентгеновский снимок, сделанный человеком 22 декабря 1895 г., и он принадлежит жене человека, случайно изменившего лицо в результате медицинского диагноза. Анна Берта Рентген испытала такой шок, когда увидела скелет левой руки с обручальным и помолвочным кольцами, что воскликнула: «Я видела свою смерть». Первый рентгеновский снимок в России был сделан в 1896 г. по инициативе русского ученого А. Ф. Иоффе, ученика В. Рентгена.



Рис. 10. Анна Берта Рентген и рентгеновский снимок её руки (декабрь 1895 г.).

Fig. 10. Anna Berta Roentgen and roentgenogram of her hand (December 1895)

В январе 1896 г. Рентген провел открытое собрание Физико-медицинского общества в Вюрцбурге, на котором представил свои открытия. В середине сеанса возникло предложение назвать новые лучи именем их первооткрывателя. Работа Рентгена по этому новому типу излучения бы-

ла отмечена 10 декабря 1901 г. первой в истории Нобелевской премией по физике, присужденной Шведской королевской академией наук. Робкий Рентген отказался выступать с Нобелевской лекцией. Он пожертвовал 50 000 шведских крон Вюрцбургскому университету и не стал подавать заявку на патент, тем самым он сделал свое открытие доступным для широкой публики. Уважаемый физик-экспериментатор получил множество наград за свои открытия, в частности, почетное гражданство города Леннепа (нем. *Lennepe*, родина Рентгена) и города Вюрцбурга, а также «Орден Гражданских заслуг Баварской короны» (нем. *Verdienstorden der Bayerischen Krone*).

Рентген в своих исследованиях мало использовал математику, несмотря на это он получил свои результаты с помощью оригинального и простого оборудования, большую часть которого он сконструировал сам. Он очень ценил умение импровизировать с аппаратурой и считал, что человек должен уметь делать все, что действительно необходимо, с помощью карманного ножа. Поэтому неудивительно, что он обычно не прибегал к услугам помощника и предпочитал проводить эксперименты и наблюдения собственноручно. На самом деле открытие Рентгена, как заметил сэр Дж. Дж. Томсон в своей лекции Rede⁷ 10 июля 1896 г., «связано с самым сильным из всех человеческих качеств, а именно — любопытством» [12].

5. Упущенные возможности Ленарда

Ленард единственный из плеяды ученых, исследовавших катодные лучи, был удостоен в 1905 г. Нобелевской премии по физике с формулировкой «за работы по катодным лучам». На церемонии вручения премии Арне Линдстедт из Шведской королевской академии наук сказал: «Ясно, что работы Ленарда по катодным лучам не только обогатили наше знание этих явлений, но и во многих отношениях заложили основу теории электронов». Несмотря на признание, которое получили его работы, Ленард все время страдал из-за того, что его вклад в науку не оценивается в достаточной степени. Он порой с пренебрежением и завистью относился к успехам других ученых. Ленард очень уважал и восхищался Герцем до приезда в Бонн и во время пребывания в нем, но став его ассистентом, считал, что тот обходится с ним недостаточно почтительно. Постепенно уважение к своему наставнику (который умер в 1894 г.) стало падать, поскольку Ленард становился все более антисемитски настроенным и участвовал в национал-социалистическом и нацистском движении.

⁷ Лектор сэра Роберта Педа (Sir Robert Rede's Lecturer) — это ежегодное назначение для чтения публичной лекции (Rede Lecture), лекции сэра Роберта Педа в Кембриджском университете. Он назван в честь сэра Роберта Педа, который в XVI веке был главным судьей Общего права.

Когда в 1895 г. Вильгельм Рентген открыл лучи, которые возникают при бомбардировке катодными лучами частей разрядной трубки, то Ленард был расстроен тем, что не он обнаружил их первым. Его угнетало то, что новые лучи стали называть именем первооткрывателя. Впоследствии он неизменно называл их «высокочастотным излучением», но никогда не употреблял их общепризнанного названия «рентгеновские лучи» или «рентгеновское излучение». Более того, Ленард считал, что, одолив Рентгену разрядную трубку, он внес вклад в открытие нового излучения и поэтому заслуживает особого упоминания.

Ленард полагал, что открытие должно, по меньшей мере, считаться совместным, однако вся слава открытия досталась одному Рентгену. Особой горечи Ленарду добавлял и тот факт, что Рентген не упомянул его имени в своих трех статьях [13—15], посвященных исследованию нового излучения, и даже не указал, что оно получено благодаря катодной трубке Ленарда! При этом, по-видимому, в решающих экспериментах Рентген трубкой Ленарда все же не пользовался [16].

Ленард негодовал, когда Рентген стал Нобелевским лауреатом и заявлял, что является матерью лучей, тогда как Рентген — лишь повивальная бабка. После того, как в 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл электрон и его открытие получило широкое признание, Ленард стал утверждать, что приоритет якобы принадлежал ему. Томсон дал вполне современное описание электрона, а Ленард же и в 1906 г. продолжал называть электрон «электричеством без материи, электрическим зарядом без заряженных тел» и говорил как об «электричестве в чистом виде».

И все же в его характере была добрая сторона, и часто он представлял собой скорее жалкую, чем угрожающую фигуру. Возможно, он испытывал глубокую личную потребность в дружбе, которую не мог завоевать, а если и мог, то не мог сохранить. Его недоверие к другим, неспособность пробудить уверенность в себе или симпатию тех, кто работал под его руководством, были причиной того, что он не основал великую школу физиков. Было высказано предположение, вероятно, правильное, что ключом к его характеру было то, что он был слабой личностью, которая стремилась защитить себя твердой оболочкой. Он был темным гением, омраченным сильными личными страхами, сомнениями и завистью, но, несомненно, гением и тем, кто оставил неизгладимое впечатление в физике [17].

Одним из главных научных достижений Ленарда было произведенное им в 1902 г. экспериментальное наблюдение, согласно которому свободный электрон (он назвал его катодным лучом) должен обладать определенной минимальной энергией для того, чтобы ионизовать газ (сделать

нейтральный газ электрически заряженным) путем выбивания из атома связанного электрона. Ленард называл выбитые атомные электроны вторичными катодными лучами. Он дал весьма точную оценку потенциала ионизации (энергии, необходимой для выбивания электрона) для водорода.

6. Катодная трубка Брауна

Многие ученые, начиная с Ю. Плюккера, были заняты систематическими научными исследованиями катодных лучей и не задумывались о практическом применении полученных результатов. В то время как другие ученые искали способы применить их в практических целях. Первым такую область приложений указал французский физик Альберт Гесс (*Albert Hess*), который предложил использовать катодные лучи для изучения переменных магнитных полей. Для этой цели им было разработана конструкция устройства на базе трубки Гейсслера, которое он описал в общих чертах в статье в 1894 г. [18]. Катодные лучи образуются в трубке Гейсслера, конец которой напротив катода герметично закрыт металлической пластиной с диаметром отверстия от 1 до 2 мм. Это отверстие закрыто алюминиевой фольгой толщиной 0,002—0,003 мм. Исследуемое магнитное поле располагают таким образом, чтобы отклонение лучей происходило в направлении диаметра отверстия. Лучи проходят через тонкую фольгу, выходят из трубки Гейсслера и попадают на вертикальную тонкую стенку металлического герметичного ящика, за которой находится фотопленка. Движение катодного луча в каждый момент времени фиксируется на фотопленке и после ее проявления получается кривая изменения напряженности магнитного поля. В статье Альберт Гесс подчеркивает, что детали устройства можно легко изменять в соответствии с косвенными указаниями, исходя из результатов работ Ф. Ленарда [8, 9].

Однако первым, кто обратил внимание на практическую сторону катодных технологий, был профессор Страсбургского университета Карл Фердинанд Браун (нем. *Karl Ferdinand Braun*, 06.06.1850—20.04.1918) рис. 11. В 1896 г. Браун задумался о возможности использования газоразрядной трубки в качестве визуального индикатора колебательных и переходных явлений в электрических цепях. К этому времени наибольшую известность получили конструкции газоразрядных трубок Гитторфа, Крукса, Ленарда и Рентгена.

Зимой 1896/97 г. в Физический институт Страсбургского⁸ университета прибыл большой деревянный ящик с надписью «Осторожно, стекло» и адре-

⁸ Страсбургский университет (фр. *Université de Strasbourg*) в 1621 году получила статус полноценного университета во время Римско-Германской империи. С 1681 года Страсбург принадлежал

сом отправителя «Франц Мюллер⁹, ранее Г. Гейсслер, Бонн». В нем, среди прочего, находилась стеклянная трубка длиной 50 см с выпуклым концом, внутри которой можно было увидеть экран из слюды, покрытой фосфоресцирующей краской. Это была специальная версия газоразрядной трубки, сделанная на заказ и предназначенная для профессора Брауна и его сотрудников.



Рис. 11. Город Страсбург на карте Европы, общий вид Физического института Страсбургского университета в 1897 г. и Карл Фердинанд Браун.

Fig. 11. The city of Strasbourg on a map of Europe, general view of the Physics Institute of the University of Strasbourg in 1897 and Karl Ferdinand Brown

За основу своего визуального индикатора Браун взял трубку Крукса 1879 г. Для реализации замысла в ее конструкцию он внес некоторые изменения, которые отвечали требованиям задуманного индикатора. Для этого пришлось сузить расходящиеся лучи от катода до узкого светового пучка с помощью окошка Ленарда, а внутри в конце трубки разместить флуоресцентный экран. На экране от столкновения с ним катодных лучей возникало пятно света, для перемещения которого использовался эффект отклонения катодных лучей с помощью магнитного поля. При таком воздействии пятно начинало колебаться синхронно с изменяющимся полем, и его движение отражало изменения напряжения или тока.

Газоразрядная трубка Брауна на основе трубки Крукса получила название «осциллоскоп». С современных позиций это был упрощенный вариант осциллографа, описание которого было опубликовано в журнале «Annalen der Physik und Chemie» в 1897 г. [19]. После этого трубка получила название по фамилии ее изобретателя — «трубка Брауна» (нем. — *Braunsche Röhre*).

Франции. После франко-прусской войны 1870/71 г. он вернулся в Германию и восстановлен как Kaiser-Wilhelms-Universität в 1872 году. После окончания Первой мировой войны в 1918 году он был восстановлен как французский университет, а после победы Германии над Францией в 1940 году снова стал немецкоязычным университетом до конца 1944 г. В начале 1945 г. и до сегодня — французский университет. В 2019 г. в Страсбургском университете обучалось 52 114 студентов.

⁹ Франц Мюллер (*Franz Müller*) — преемник Генриха Гейсслера в мастерской физических инструментов, основанной Гейсслером в Бонне.

Трубка Брауна показана на рис. 12. Алюминиевый плоский дисковый холодный катод K служил источником катодных лучей, а электрод A сбоку от трубки действовала как анод. Пучок катодных лучей проходил через круглую диафрагму C с отверстием диаметром 2 мм в центре. Отверстие служило для сужения расходящегося потока катодных лучей в пучок небольшого диаметра. Внутри трубки, на конце, противоположном катоду, был установлен круглый слюдяной экран D , покрытый виллемитом (сульфидом цинка). Фосфоресцирующий экран крепился к стеклянной стенке E таким образом, чтобы флуоресцентное пятно, создаваемое катодными лучами, можно было видеть сквозь стекло и слюду. Внутри трубки находился воздух под низким давлением. В месте попадания пучка катодных лучей на экране появлялось световое пятно.

Катодные лучи в основном генерировались с помощью 20-пластинчатой индукционной машины Тёплера (нем. *August Joseph Ignaz Toepler (Töpler)*, 07.09.1836—6.03.1912), рис. 12. Удивительно, но требуемое высокое напряжение около 50 кВ, необходимое для создания разряда в разреженном газе, обеспечивалось ручным генератором электростатического напряжения. Скорости вращения индукционного устройства было достаточно для многих экспериментов. Включенный в цепь регулируемый искровой разрядник позволял выбирать наиболее благоприятный тип разряда. Браун впервые продемонстрировала возможность записи электрических сигналов на флуоресцентном экране газоразрядной трубки. Интересно отметить, что трубка Брауна была сконструирована до того, как была разгадана природа катодных лучей.

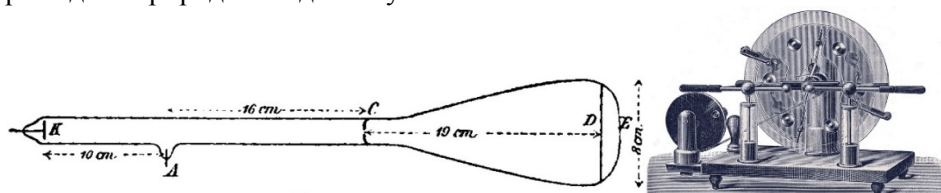


Рис. 12. Трубка Брауна [19] и индукционная машина Тёплера.

Fig. 12. Brown tube [19] and Töpler induction machine

В статье [19] описаны эксперименты, в которых Ф. Браун использовал специально сделанные на заказ вакуумные стеклянные трубки с экраном, покрытым люминофором. Целью исследования было измерить электричество и сделать его видимым в течение длительного периода времени. Брауну удалось нарисовать кривую на экране генерируемым в трубке электронным пучком. Для отклонения катодного луча использовался соленоид, который размещался снаружи стеклянной колбы в месте ее суже-

ния (между диафрагмой и экраном) перпендикулярно оси трубки. Этот соленоид он назвал «индикаторной катушкой».

Для наблюдения временной зависимости переменных во времени токов Браун отклонял катодный луч с помощью одной катушки и наблюдал за экраном через вращающееся зеркало, чтобы обеспечить горизонтальную временную развертку. Методику использования вращающегося зеркала он позаимствовал у Б. Феддерсена, который изучал колебательную природу искровых разрядов. Этой техникой эксперимента Браун овладел в совершенстве, он назвал ее «вращающимся зеркалом Кёнига¹⁰» (*rotating König mirror*) в честь ученого, который последним в 1897 г. практически применил этот способ отображения зависящих от времени явлений.

К катушке индуктивности подводился переменный электрический ток (исследуемый сигнал), который давала электростанция города Страсбурга. След, оставляемый на экране катодным пучком лучей, преобразовывался вращающимся зеркалом в синусоидальную кривую. Зеркало крепилось к якорию электромагнита, а его катушка питалась током, частота которого была кратной частоте тока катушки индуктивности. Такая визуализация позволила связать синусоидальную форму кривой на экране с переменным электрическим током электросети. Форма волны электроснабжения центральной электростанции Страсбурга (120 В, 50 Гц) была представлена слабой мерцающей синусоидальной волной. В экспериментах трубка работала при напряжениях 10—20 кВ и позволяла наблюдать на экране колебания электрического напряжения с частотой 50—60 Гц. Частотный диапазон трубки в основном ограничивался индуктивностью отклоняющих катушек. На рис. 13а показана синусоидальная зависимость переменного тока частотой 50 Гц от сети электростанции Страсбург от времени в сравнении с синусоидальными колебаниями камертона, изображенного на рис. 13b. Кривые были нарисованы вручную в соответствии с их видом во вращающемся зеркале.



Рис. 13. Измеренные осциллограммы временной зависимости (а) переменного тока электростанции Страсбург, (b) колебания камертона [19].

Fig. 13. Measured waveforms of the time dependence of (a) ac current of the Straßburg power station, (b) tuning fork oscillation [19]

¹⁰ Рудольф Кёниг (нем. *Rudolf König*; 26.11.1832 — 02.10.1901) — немецкий физик, бизнесмен, занимался изготовителем на основе своих изобретений научных акустических приборов.

На рис. 14 показана зависимость тока через первичную обмотку индукционной катушки от времени. Для разомкнутой вторичной обмотки (случай а) нарастание тока от α до β происходит так быстро, что эту часть кривой трудно реализовать. В течение интервала от β до γ искра при разрыве все еще дает контакт.

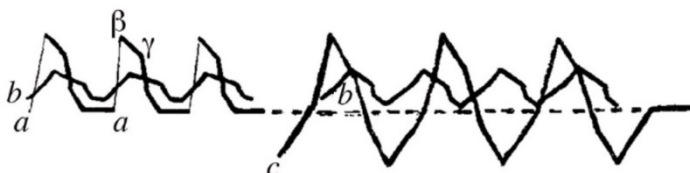


Рис. 14. Измеренные формы сигналов временной зависимости тока через первичную катушку индукционной катушки Румкорфа для (а) — разомкнутой вторичной катушки, (б) — короткозамкнутой вторичной цепи, (в) — вторичной катушки с конденсатором [19].

Fig. 14. Measured waveforms of the time dependence of the current through the primary coil of a Ruhmkorff induction coil for (a) – secondary coil open circuited, (b) – secondary circuit short-circuited, (c) – secondary coil terminated with a capacitor [19]

Для фазовых измерений с помощью фигур Лиссажу использовались две ортогонально расположенные пары индикаторных катушек. Это позволило Фердинанду Брауну также продемонстрировать двумерное отклонение катодного луча. Обе индикаторные катушки питались токами, проходящими через первичную и вторичную обмотки катушки Румкорфа с неподвижным прерывателем. Используя катушки индуктивности без железных сердечников и с ними, а также подключая к цепи конденсатор, он мог изменять фазовую задержку между индикаторными катушками, а также генерировать 3-ю гармонику, как это видно из фигур Лиссажу, изображенных на рис. 15.

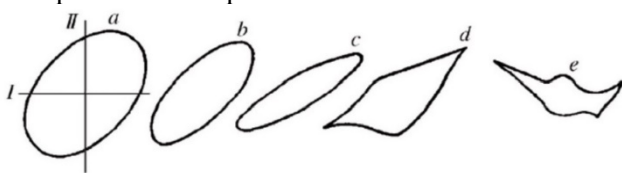


Рис. 15. Измеренные фигуры Лиссажу [19].

Fig. 15. Measured Lissajou's figures [19]

Браун не только придумал идею использования газоразрядной трубки в качестве визуального индикатора, но также ввел циклографический метод использования трубки, то есть средства отображения неподвижных фигур на флуоресцентном экране за счет одновременного применения двух прямоугольных отклонений. С открытием электрона, носителя элементарного электрического заряда, трубку Брауна чаще стали называть «электронно-лучевой» трубкой, рис. 16.

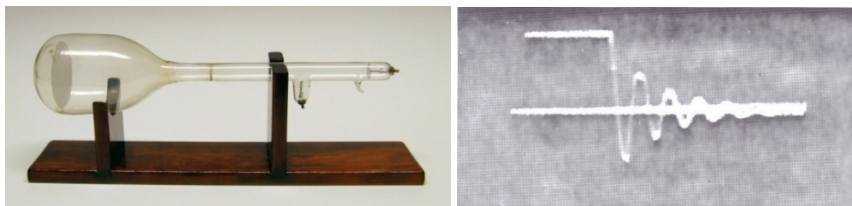


Рис. 16. Катодная трубка Брауна образца 1900 г. и вид затухающих электрических колебаний на экране трубки Брауна, полученный в 1897 г. [20].

Fig. 16. Brown cathode tube, sample 1900 and the form of damped electric oscillations on the screen of the Brown tube, obtained in 1897 [20]

В 1899 г. Джонатан Зеннек (*Jonathan Zenneck*), ученик Брауна, упростил дисплей на трубке Брауна. Вместо вращающегося зеркала, которое использовалось для определения временной шкалы, была использована электрическая система горизонтального сканирования. Эта система перемещала электронный луч по экрану с постоянной скоростью, а затем возвращала его в крайнее левое положение в конце каждого цикла. Вся конструкция напоминала современный поворотный потенциометр, в котором электродвигатель использовался для привода колеса с прикрепленной к нему проволокой. Два контактных кольца крепились к проводу и были подключены через щетки к батарее. В соленоиде таким образом протекал линейный пилообразный ток и производилось линейное сканирование, как в современных приборах.

Катодная трубка Брауна сыграла важную роль в его исследованиях в области беспроводного телеграфирования. В Нобелевской лекции от 11 декабря 1909 г. он сказал: «...позвольте, я напомним об устройстве, которое было очень полезно для меня и других экспериментаторов. Я имею в виду катодную трубку, которую я описал в 1897 г. Она обеспечивала визуальную картину изменения тока и напряжения до 100000 Гц. С ее помощью мы можем определить период, исследовать как форму кривой, так и интенсивность колебаний, определить затухание и фазу колебания» [20].

Электронно-лучевое устройство Брауна сразу нашло применение в различных технических областях. Нужно отметить, что Ф. Браун не запатентовал конструкцию своей катодной трубки — осциллографа. Он решил сделать свое изобретение доступным для научных исследований и всячески содействовал его распространению. Одним из наиболее плодотворных направлений такого применения оказалась область беспроводной передачи информации. После изобретения этой трубки в нее были внесены различные усовершенствования, которые сделали ее использование более удобным.

7. Открытия и изобретения Венельта

В этот же период времени, в 1898 г., в университете города Эрлангена (город в Баварии) молодой немецкий ученый Артур Венельт (*Arthur Rudolph Berthold Wehnelt*, 04.04.1871—15.02.1944, рис. 17) защитил диссертацию на тему «Исследования темного катодного пространства» (нем. *Studien über den dunklen Kathodenraum*) и получил докторскую степень (PhD) с «высшей похвалой» (лат. *summa cum laude*). Руководителем его диссертации был Е. Видеманн¹¹ (*Eilhard Gustav Heinrich Wiedemann*, 01.08. 1852—07.01.1828). В своей диссертации Венельт исследовал темное пространство возле катода в газоразрядных трубках и установил, что высокое сопротивление темного пространства катода соответствует сопротивлению диэлектрика.

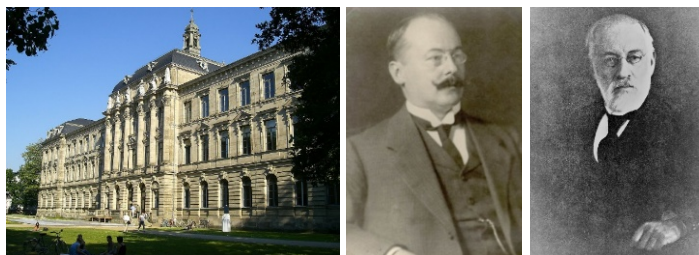


Рис. 17. Общий вид университета города Эрлангена (нем. *Universität Erlangen*), Артур Рудольф Венельт и его руководитель докторской диссертации Эйльхард Видеманн.

Fig. 17. General view of the University of Erlangen (German. *Universität Erlangen*), Arthur Rudolph Wehnelt and his doctoral dissertation supervisor Eilhard Wiedemann

Венельт после защиты диссертации сосредоточился на совершенствовании катодно-лучевых технологий. В 1899 г. он изобрел прерыватель, названный в его честь (нем. *Wehnelt-Unterbrecher*) [21]. Устройство предназначалось для быстрого ритмического прерывания постоянного тока. Прерыватель Венельта состоял из тонкого платинового электрода, погруженного в разбавленную серную кислоту, на котором последовательно формировались изолирующие пузырьки газа, которые лопались, а потом снова образовывались, рис. 18. Этот тип прерывателя позволял получать более быстрые токи, нежели с помощью механических прерывателей. Прерывания были настолько резкие, что не нужен был конденсатор. Прерыватель обладал не только большой быстротой переключения, но и был

¹¹ Эйльхард Эрнст Густав Видеманн был немецким физиком и историком науки. Он был сыном физика Густава Генриха Видемана (1826–1899) и старшим братом египтолога Альфреда Видемана (1856–1936). В 1872 году защитил диссертацию «Об эллиптической поляризации света и ее связи с цветом поверхности» и получив докторскую степень (PhD). Долгое время с 1877 года он редактировал *Annalen der Physik und Chemie* вместе со своим отцом.

достаточно мощным, способным работать при больших напряжениях. Например, при напряжении около 100 В можно было достичь 1000 прерываний в секунду. Искровой индуктор, работающий с таким прерывателем, отличается отсутствием конденсаторной коробки. Прерыватели Венельта благодаря своим преимуществам оставались до середины 20-х гг. XX в. предпочтительными устройствами для всех мощных искровых индукторов рентгеновской техники, пока их не вытиснули высоковольтные трансформаторы с мощными выпрямителями.

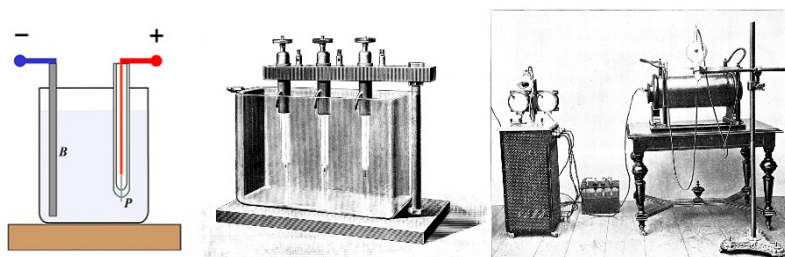


Рис. 18. Общее устройство прерывателя Венельта (слева). Промышленный образец трехкомпонентного прерывателя Венельта и этот прерыватель в комплекте рентгеновского аппарата. Аппаратура производства компании Сименс и Гальске. 1901 г.

Fig. 18. General arrangement of the Wehnelt breaker (left). An industrial prototype of a three-component Wehnelt interrupter and this interrupter included in the X-ray apparatus. Apparatus manufactured by Siemens & Halske. 1901

После непродолжительной работы ассистентом в Техническом университете Берлина Венельт вернулся в Эрланген, где в 1901 г. завершил научную работу для habilitation¹². Ее тема была «Измерение тока и напряжения на катодах в газоразрядных трубках» (нем. *Strom- und Spannungsmessung an Kathoden in Entladungsröhren*). В тот период времени наибольший интерес среди работ, проводимых А. Венельтом, представляли эксперименты, относящиеся к усилению потока катодных лучей в трубке Брауна и изучение законов испускания электронов нагретыми телами.

В 1902 г. Вельнет показал, что разряд электричества с катода ограничен областью, которая покрыта световым свечением. В этом случае полный ток, протекающий через трубку, пропорционален полностью покрытой области [22]. Это означает, что плотность тока на катоде остается постоянной, пока есть пространство для расширения свечения. Одновре-

¹² Хабилитация (нем. *Habilitation* от лат. *habilis* «способный, пригодный») — в некоторых европейских и азиатских странах процедура получения высшей академической квалификации, следующей после ученой степени (PhD). После прохождения процедуры хабилитации претенденту присваивается ученая степень хабилитированного доктора (лат. *doctor habilitatus, Dr. habil.*), которая дает право на занятие профессорской должности в университете.

менно с Венельтом два других ученых, английский физик Гарольд Вильсон (*Harold Albert Wilson*, 1874—1964) [23] и физик из Эрлангенского университета Н. Хель (*N. Hehl*) [24] также, обнаружили постоянство плотности тока. Разряд, когда катод не покрыт свечением, называется «нормальным», и катодное падение потенциала имеет постоянное значение, независимо от давления и тока в трубке. Если катод полый или трубчатый, то разряд остается в нормальной форме с большим сопротивлением, до тех пор, пока внутренняя и внешняя сторона катода не покроются свечением.

Если катод представляет собой закрытый цилиндр с отверстием на плоской поверхности, ближайшей к аноду, то с этой поверхности при понижении давления до некоторого уровня начинает образовываться разряд. При постепенном понижении давления наступит стадия, когда яркий линейный разряд пройдет через центр отверстия и свечение появится как на задней, так и на передней стороне пластины. По мере того, как давление становится все меньше и меньше, свечение распространяется все дальше и дальше по внутренней части цилиндра, и темное пространство, отделяющее его от металла, становится все шире и шире, и вся внутренняя часть заполняется светом. При очень низких давлениях это свечение исчезает, и пучок положительных лучей проходит через отверстие в цилиндр, при этом разность потенциалов намного больше, чем при высоких давлениях.

В 1903 г. Венельт экспериментально случайно обнаружил эмиссионную способность оксидов щелочноземельных металлов при высоких температурах, рис. 19. Во время экспериментов он подверг проверке закон испускания электронов нагретыми телами, открытый незадолго до этого английским физиком О. Ричардсоном.

Для экспериментов были выбраны образцы платиновой проволоки. Первый же опыт полностью подтвердил закон, но А. Венельт спустя некоторое время решил повторить эксперимент еще с одним образцом. Каково же было его удивление, когда платина стала испускать поток электронов, во много раз больший, чем накануне. Прибор, измерявший электронную эмиссию, едва не вышел из строя. Поскольку свойства металла не могли так резко измениться, оставалось предположить, что виновником электронного «шквала» является случайно попавшее на поверхность проволочки вещество с более высокой способностью к эмиссии электронов, чем платина. Но что же это за вещество? Ученый стал поочередно наносить на платину различные материалы, подозреваемые в изменении электронного потока, но все они без труда доказывали свою явную непричастность к этому делу. И когда А. Венельт уже решил, что докопаться до истины ему вряд ли удастся, он вдруг вспомнил, что в смазке насосной установки, при-

нимавшей «участие» в эксперименте, содержалась окись бария, которая могла случайно попасть на платиновую проволочку. Ученый вновь включил приборы и уже через несколько мгновений его радость не знала границ. Венельт доказал, что причиной этого явления может быть поверхностное загрязнение платиновой проволоки. Так было открыто вещество, которое по способности испускать электроны при нагреве не имеет себе равных.

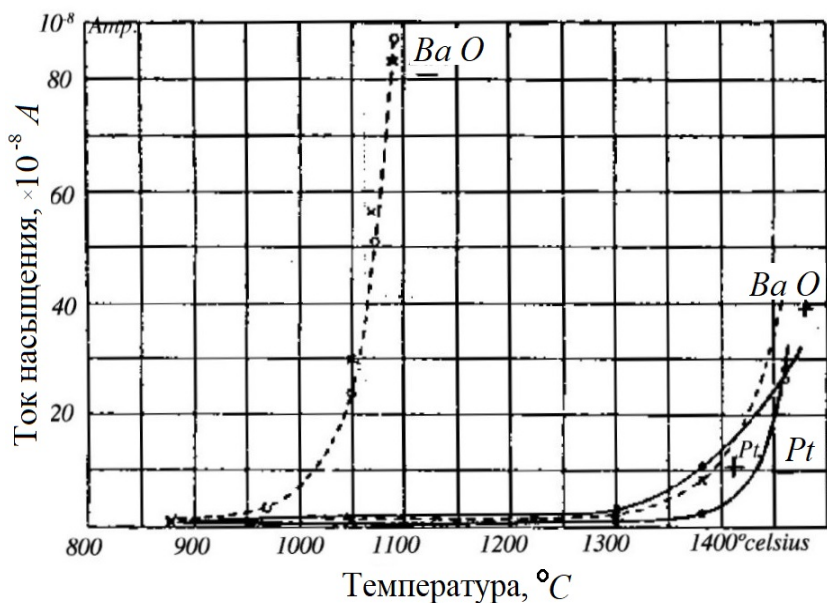


Рис. 19. Зависимость тока насыщения термоэлектронной эмиссии от температуры для чистой платиновой проволоки (сплошные кривые) и платиновой проволоки с покрытием BaO (штриховые кривые) для положительной и отрицательной полярности катода (процесс сначала происходит при очень низкой температуре!) согласно [25].

Fig. 19. Saturated emission current vs. temperature for pure platinum wire (solid curves) and BaO coated platinum wire (slashed curves) for positive and negative polarity of the cathode (onset a very low temperature!) according to [25]

Однако в достоверность полученного результата научный мир поверил не сразу [26]. После того как А. Венельт опубликовал результаты своих опытов, многие физики занялись их проверкой. Одно за другим начали появляться в печати сообщения о том, что А. Венельт сильно преувеличил эмиссионную способность окиси бария. Да и самому А. Венельту больше не удавалось подтвердить свое открытие. Однако, невзирая на это, он первым, предложил использовать окисные катоды в выпрямительных клапанах.

15 января 1904 г. Венельт подает заявку на получение патента на катодную трубку — выпрямитель (диод), состоящий из подогреваемого оксидного катода и холодного анода [27]. Патент на изобретение «Электрического клапана» (нем. *Elektrisches Ventil*) был получен уже в следующем году. В патенте Венельт приводит особенности катода с оксидным покрытием, ссылаясь на свою статью 1903 г. [26]. Предмет изобретения сформулирован следующим образом: «Электрический клапан, представляющий собой разрядную трубку с горячим катодом с металлическим покрытием и холодным анодом из любого металла». В патенте не приведен рисунок самого выпрямительного устройства и содержится только текст о выпрямлении токов низкой частоты таким устройством, по-существу указан способ осуществления этого процесса. В описании патента отмечается, что клапан способен передавать токи любой величины, что делает его особенно подходящим для преобразования токов переменного направления (однофазных и многофазных переменных токов) в токи одного и того же направления в соответствии с хорошо известными схемными решениями. Венельт не дал никаких подробностей о конструкции этого клапана и о его применении для каких-либо технических целей в вышеупомянутом описании своего изобретения.

В 1904 г. Венельт продолжил эксперименты по исследованию веществ повышающих эмиссионную способность катода. Он стал наносить на платиновую проволоку нитраты *Ca*, *Sr* и *Ba* и нагревать ее на открытом воздухе. Уже в июле 1904 г. выходит его статья [25] с результатами проведенных исследований по оксидным катодам. Он обнаружил, что оксиды щелочноземельных металлов имеют самую низкую работу выхода из 40 исследованных оксидов, и количественно измерил токи эмиссии *BaO* и *CaO* на платиновых проволоках в зависимости от температуры по сравнению с чистой платиной. Он наблюдал начало эмиссии уже при 875 °C для *BaO* и *CaO* по сравнению с началом эмиссии для чистой платины *Pt* при 1600 °C. Артур Венельт также обнаружил, что уравнение Ричардсона справедливо не только для металлов, но и для оксидных катодов. Его сотрудник Феликс Йенч (*Felix Hermann Ferdinand Jentsch*, 14.0.1882—10.11.1946) в 1908 г. измерил работу выхода нескольких оксидов [28]. Предложение Венельта об использовании оксидных катодов в вентилях выпрямителя нашло практическое воплощение в выпрямителях Siemens & Halske для заряда автомобильных аккумуляторов, рис. 20 [29].

Открытие Венельта нашло практическое применение только через 30 лет при производстве радиоламп для радиоприемников с питанием от электросети переменного тока. Катоды, покрытые соединениями щелоч-

ноземельных металлов, получили название «оксидные катоды». Такие катоды работают при температуре темно-красного каления 800—900 °С. На каждый ватт электроэнергии, затрачиваемый на их накал, они дают иногда до четверти ампера электронной эмиссии. Срок службы таких катодов достигает нескольких тысяч часов. В дальнейшем радиолампы стали изготавливаться с катодами из никеля с покрытием кальция, бария и стронция.

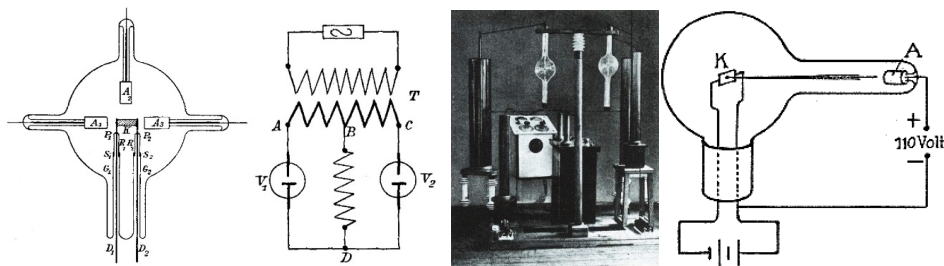


Рис. 20. Трехфазная выпрямительная трубка Венельта [29] с горячим катодом с оксидным покрытием и схема двухпериодного выпрямителя [29]. Установка (справа) получения постоянного тока при выпрямлении переменного тока по патенту Венельта [26].

Катодная трубка (справа) выпрямитель конструкции А. Венельта. 1904 г.

Fig. 20. Three-phase rectifier tube of Wehnelt [29] with a hot cathode with an oxide coating and a circuit of a two-period rectifier [29]. Installation (right) for obtaining direct current when rectifying alternating current according to the Wehnelt patent [26]. Cathode tube (right) rectifier designed by A. Wehnelt. 1904

Венельт усовершенствовал трубку Брауна в 1905 г. с помощью нагреваемого катода. Нить накала представляла собой узкую полоску платиновой фольги с небольшим пятном оксида кальция на ней. Небольшой диаметр пятна излучения обеспечивал хорошую фокусировку. Анод был сделан из алюминиевой проволоки. Пластика накалялась посредством тока вспомогательной батареи и соединялась с отрицательным полюсом источника электричества, в то время как положительный полюс был соединен с алюминиевой проволокой. Из раскаленного катода уже при разности потенциалов в 100—200 вольт начинали исходить сильные катодные лучи. Разность потенциалов использовалась только для направления и увеличения скорости лучей. При работе лампы с низкими анодными напряжениями, то есть с более медленными электронами, в отличие от ламп с холодным катодом, которым для газового разряда требовалось высокое напряжение, увеличивалась чувствительность к отклонению пучка электронов. На рис. 21 показано устройство катодной трубки Венельта [30].

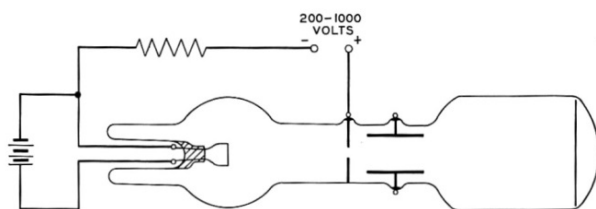


Рис. 21. Катодная трубка Венельта [30]. 1905 г.

Fig. 21. Wehnelt cathode tube [30]. 1905

Вскоре А. Венельт, основываясь на полученных результатах [22], сумел сделать важное усовершенствование катодной трубки с горячим катодом. Для концентрации электронного излучения он установил цилиндр с отверстием между катодом и анодом и подал на него отрицательный электрический потенциал, рис. 22. Изменяя силу заряда на этом электроде, можно было усиливать или ослаблять электронный поток с катода, делая точку на экране то более яркой, то тусклой. Цилиндрический электрод вскоре стали называть «венельт-цилиндр» (нем. *Wehnelt-Zylinder* или *Wehneltzylinder*).

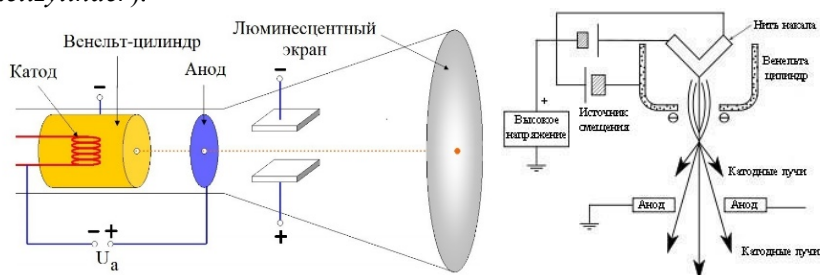


Рис. 22. Усовершенствованная трубка Брауна с горячим катодом и цилиндром Венельта. Современное устройство Венельт-цилиндра (справа).

Fig. 22. Improved hot cathode brown tube with Wehnelt cylinder.
 Modern device of the Wehnelt-cylinder (right)

Венельт-цилиндр по-существу представлял собой подогреваемый катод. У цилиндра Вельнета дно с отверстием можно трактовать как своеобразный управляющий электрод типа сетки, которая фокусирует пучок электронов, летящий к аноду. Сквозное отверстие, расположенное в центре цилиндра, имело диаметр, который обычно находился в диапазоне от 200 до 1200 мкм. Электроны, направление полета которых очень сильно отклонялись от оси пучка, равномерно отталкивались отрицательным потенциалом от стенок цилиндра и направлялись обратно к оси пучка. Цилиндр таким образом производил фокусировку электронного пучка. Сфокусированным пучком легче было проводить эксперименты, например, в тонкой катодной трубке. Ток пучка можно было контролировать с помо-

щью цилиндра Венельта, который ограничивал зону пространственного заряда катода и находился под отрицательным потенциалом по отношению к катоду. Цилиндр Венельта позволял значительно снизить ранее требуемое очень высокое анодное напряжение. Благодаря этому трубка Брауна получила дальнейшее развитие. К слову, А. Венельт ввел в употребление слово «электроника».



Рис. 23. Медаль Джона Скотта.

Fig. 23. John Scott Medal

В 1905 г. А. Венельт за свои научные исследования был отмечен престижной премией *John Scott Medal*, рис. 23. Аптекарь Джон Скотт из Эдинбурга учредил фонд в размере \$ 4000, который после его смерти в 1815 г. начал вручать медаль его имени и денежную премию. Медаль Джона Скотта существует до сих пор, ею награждаются как мужчины, так и женщины, чьи изобретения улучшили значительным образом «комфорт, благополучие и счастье человеческого рода». С 1919 г. эту награду вручает городской совет города Филадельфии согласно ежегодному списку номинантов, представленных Институтом Франклина. Эту премию в последующие годы получили такие известные радиотехники как, Р. Фессенден (*Reginald A. Fessenden*, 1922), Т. Эдисон (*Thomas Edison*, 1929), Ли де Форест (*Lee De Forest*, 1929), Г. Маркони (*Guglielmo Marconi*, 1931), Н. Тесла (*Nikola Tesla*, 1934) и И. Лангмюр (*Irving Langmuir*, 1937).

8. Заключение

Наряду с катодными лучами, наблюдаемыми при разрядах в сильно разреженных газах, был открыт целый ряд совершенно аналогичных лучей, которые все можно объединить общим термином — катодные лучи. Общим для всех них явилось то, что они представляют из себя потоки отрицательно заряженных частиц — электронов, тождественных в отношении величины заряда и массы, и различающихся лишь по величине скорости. Условия их возникновения позволяют выделить некоторые разновидности лучей: 1. Обыкновенные катодные лучи. 2. Ленардовы лучи. 3. Отраженные и вторичные катодные лучи. 4. Лучи от накаливаемых катодов. 5. Анодно-катодные лучи.

При помощи разряда в сильно разреженном газе можно получить катодные лучи лишь сравнительно больших скоростей. Пучки катодных лучей любой скорости и любой мощности получают другим способом, а именно используя для извлечения электронов из катода явление электронной эмиссии — выход электронов проводимости из накаливаемого металла в окружающую среду.

Системные эксперименты Ф. Ленарда по прохождению катодных лучей через вещество показали, что поглощение было примерно пропорционально его плотности и, кроме того, оно очень быстро уменьшалось с увеличением скорости лучей. Он доказал, что катодные частицы высокой энергии могут проходить сквозь атомы.

Открытия и изобретения в области катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков сыграли основную роль в появлении первой усиленной электронной лампы — катодного реле конструкции австрийского физика Роберта фон Либена (*Robert von Lieben*, 05.09.1878—20.02.1913).

Список литературы

1. Crookes W. On radiant matter // Chemical News. 1879. Vol. 40, No. 1023. Pp. 91—93, 104—107, 127—131.
2. Gesammelte Werke von Heinrich Hertz, Band 1, Schriften vermischten Inhalts. Leipzig, 1895. S. XXIV.
3. Hertz H. Ueber eine die electrische Entladung begleitende Erscheinung // Annalen der Physik und Chemie. 1883. Band 19. S. 78—86.
4. Hertz H. Versuche über die Glimmentladung // Annalen der Physik und Chemie. 1883. Band 19. S. 782—816.
5. Григорьян А. Т., Вьяльцев А. Н. Генрих Герц. 1857—1894. М. : Наука, 1968. 309 с.
6. Hertz H. Ueber den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten // Annalen der Physik und Chemie. 1892. Band 45. S. 28—32.
7. Philipp L. On cathodic rays in Gases at the Atmospheric Pressure and in an Extreme Vacuum // Scientific American Supplement. May 6, 1893. No. 905. P. 14464—14465.
8. Lenard P. Ueber Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vacuum // Annalen der Physik und Chemie. 1894. Band 51. No. 2. S. 225—267.
9. Lenard P. Ueber magnetische Ablenkung der Kathodernstrahlern // Annalen der Physik und Chemie. 1894. Band 52. S. 23—33.
10. Lenard P. Ueber die Absorption der Kathodernstrahlern // Annalen der Physik und Chemie. 1895. Band 56. S. 256—275.
11. Ebel Fred E. X-Rays (After Class Feature) // Popular Electronics. 1960. No. 10. P. 89—92, 128.
12. Röntgen, and the Discovery of X-Rays // Nature. April 7, 1934. P. 511.
13. Röntgen W. C. Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mitteilung. In : Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik-med. Gesellschaft, Würzburg. 1895. S. 137—147.
14. Röntgen W. C. Eine neue Art von Strahlen. 2. Mitteilung. In : Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik-med. Gesellschaft, Würzburg. 1896. S. 11—17.
15. Röntgen W. C. Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. In : Mathematische und Naturwissenschaftliche Mitteilungen aus den Sitzungsberichten der Königlich

- Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Physikalisch-Mathematische Klasse. 1897. S. 392—406.
16. Гельфер Е. Вчера наступило завтра. Как Альберт Эйнштейн боролся за европейский мир и теоретическую физику. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nplus1.ru/material/2018/03/28/albert-einstein-and-aryan-physics> (дата обращения 08.09.2020).
 17. Anrade E. N. da C. Obituaries Prof. P. Lenard // *Nature*. December 27, 1947. Vol. 160. P. 895—896.
 18. Hess Albert. Sur une application des rayons cathodiques à l'étude des champs magnétiques variables // *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Paris, 1894. Tome 119. P. 57—58.
 19. Braun F. Ueber ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme // *Annalen der Physik und Chemie*, Leipzig. 1897. Bd. 60, S. 552—559.
 20. Браун Ф. Мои работы по беспроволочной телеграфии и по электрооптике. Речь, произнесенная при получении премии Нобеля в Стокгольме 11 декабря 1909 г. С дополнениями автора. Перевод с рукописи Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. Одесса : изд-во «Матезис», 1910. С. 27—28.
 21. Wehnelt A. Ein elektrolytischer Stromunterbrecher // *Annalen der Physik*. 1899. Band 68. No. 6. S. 234—272.
 22. Wehnelt A. Ueber die Verteilung des Stromes an der Oberfläche von Kathoden in Entladungsröhren // *Annalen der Physik*. 1902. Band 7. No. 2. S. 237—255.
 23. Wilson H. A. The current density at the cathode in the electric discharge in air // *Philosophical Magazine*. Series 6. 1902. Vol. 4. P. 608—614.
 24. Hehl N. Über die dimensionen der Gebilde an der Kathode // *Physikalische Zeitschrift*. 1902. Bd. 3. S. 547—552.
 25. Wehnelt A. Über den Austritt negativer Ionen aus Glühenden Metallverbindungen und damit zusammenhängende Erscheinungen // *Annalen der Physik*. 1904. Band 4. No. 8. S. 425—468.
 26. Wehnelt A. Über den Austritt negativer Ionen aus Glühenden Metallverbindungen und damit zusammenhängende Erscheinungen // *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Sozietät Erlangen*. 1903. Band 5. S. 150—158.
 27. Wehnelt Arthur. Elektrisches Ventil. Deutsche Patentschrift Nr. 157845. Patentiert im Deutschen Reiche 15 Januar 1904.
 28. Jentsch F. Über die Elektronenemission glühender Metalloxyde // *Annalen der Physik*. 1908. Vol. 27. S.129—156.
 29. Wehnelt A. Ein elektrische Ventilrohr // *Annalen der Physik*. 1906. Vol. 19. S.138—156.
 30. Wehnelt A. Empfindlichkeitssteigerung der Braunschen Röhre durch Benutzung von Kathodenstrahlen geringer Geschwindigkeit // *Physikalische Zeitschrift*. 1905. Band 6. No. 22. S.732, 733.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.