

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2020
Том 3
№ 3

2020
Vol. 3
No. 3

Sevastopol

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

д. т. н., проф. ГИМПИЛЕВИЧ 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 16.12.2020

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 8,27. Уч.-изд. л. 7,9. 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., Вольвач Л.Н., Ларионов М. Г.** Необычное и продолжительное
вспышечное явление в блазаре 3C454.3
A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, Unusual by duration and shape
of the flare in blazar 3C454.3 265

Радиотехника и связь (05.12.00) — Radio engineering and communication

- Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И.** Увеличение допусков
на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии
I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk, A. A. Azarov, and E. I. Shirokova, Increasing the
tolerances for the mutual displacement of the elements of the wireless power
transmission system 277
- Чернега В. С., Еременко А. Н.** Особенности использования твердотельных лазеров
при лечении мочекаменной болезни
V. S. Chernega and A. N. Eremenko, Features of use of solid state lasers in the treatment
of urolithiasis 287
- Алдонин Г. М., Черепанов В. В.** Вейвлет-анализ структур биосистем человека
G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov, Wavlet-analysis of the structures of human
biosystems 296

Электроника (05.27.00) — Electronics

- Мирющенко Н. И., Духина Н. Г., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В.,
Агапов А. Н.** Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-
лучевой трубки «Успех-4М»
**N. I. Miryushchenko, N. G. Dukhina, S. A. Pleshanov, K. V. Revenko, V. V. Chugunov,
and A. N. Agapov,** Effectiveness of a magnetic protection on-board cesium atomic
beam tube “Uspeh-4M” 308

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

- Пестриков В. М.** Открытие природы катодных лучей
V. M. Pestrikov, Discovery of the origin of cathode rays 325
- Пестриков В. М.** Применение катодно-лучевых технологий для усиления
электрических сигналов
V. M. Pestrikov, Application of cathode-ray technologies for amplification
of electrical signals 360

УДК 523.9

Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3

¹ Вольвач А. Е., ¹ Вольвач Л. Н., ² Ларионов М. Г.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН,

Москва, Российская Федерация

volvach@bk.ru

Получено: 07 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 22 ноября 2020 г.

Принято к публикации: 5 декабря 2020 г.

Аннотация: Проанализированы данные длительного многочастотного мониторинга активного ядра галактики (АЯГ) 3C 454.3. Необычная по форме и продолжительности вспышка, которая произошла в объекте в 2010—2020 гг., может быть объяснена явлением, связанным с совпадением плоскостей аккреционного диска (АД) сверхмассивной черной дыры (СМЧД) и орбиты компаньона. Присутствие орбитального периода в 2,3 года и полупериода 1,1 год в вариациях излучения 3C 454.3 в течение последней вспышки свидетельствуют также в пользу указанной гипотезы, а не в пользу резкого изменения гамма- (γ) и доплер- (δ) факторов, которые могли бы привести к значительному удлинению наблюдаемого орбитального периода. Существенные по амплитуде мелкомасштабные флуктуации плотности потока излучения во время продолжительной вспышки могут быть следствием неоднородностей материи в АД размерами порядка 10^{14} — 10^{15} см и могут быть использованы для изучения распределения вещества АД. Выполнены оценки уровня возможных гравитационных волн (ГВ), идущих от 3C 454.3.

Ключевые слова: активные ядра галактик, черные дыры, гравитационные волны.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 265—276.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3 / А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 265—276.

Unusual by duration and shape of the flare in blazar 3C454.3

A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹, and M. G. Larionov²

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
Moscow, 117997 Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: November 7, 2020

Peer-reviewed: November 22, 2020

Accepted: December 5, 2020

Abstract: Data from the long-term multi-frequency monitoring of the active galactic nuclear 3C 454.3 are analyzed. An unusual shape and duration of the flare occurred in the object in 2010—2020. This phenomenon of the flare can be explained by coincidence of the planes of the accretion disk (AD) of the Central supermassive black hole (SMBH) and the orbit of the companion. The presence of the orbital period of 2.3 years and half period 1.1 year in the radiation variations of 3C 454.3 during the flare also supports this hypothesis, rather than a sharp change in the γ and Doppler (δ) factors that could lead to a significant extension of the observed orbital period. Large amplitude small-scale fluctuations in the radiation flux density during a long flare can be the result of inhomogeneities of matter in AD with dimensions of the order of 10^{14} — 10^{15} cm and can be used to study the substance of AD. Estimates of the level of possible gravitational waves (GW) coming from 3C 454.3 are made.

Keywords: active galactic nuclei, black holes, gravitational waves.

For citation (IEEE): A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, “Unusual by duration and shape of the flare in blazar 3C454. 3,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 265—276. (In Russ.).

1. Введение

АЯГ 3C 454.3 — один из ярчайших блазаров многие десятилетия изучается в широком диапазоне частот электромагнитного спектра. В радиодиапазоне мониторинг начат в Мичиганской радиоастрономической обсерватории в 1974 г. на частоте 14,5 ГГц. На миллиметровых волнах в наблюдениях участвовал РТ-22 КрАО в Симеизе (Крым) [1].

ДСЧД становится тесной двойной системой (ТДС), когда компаньон центральной СЧД в перицентре орбиты пересекает АД. Двигаясь со сверх-

звуковой скоростью, он создает ударные волны, распространяющиеся по диску также со сверхзвуковой скоростью и достигающие истоков «джетов», что и инициирует вспышки в АЯГ. Именно состояние ТДС обеспечивает их свойство как АЯГ. Этим и объясняется относительная немногочисленность популяции АЯГ ($\sim 10^4$) среди многочисленных эллиптических галактик ($\sim 10^{10}$).

Многочастотные наблюдения, выполненные на одиночных радиотелескопах, являются независимым способом исследования внутренней структуры АЯГ, которая недоступна даже для глобальных интерферометров и служат важным дополнением к интерферометрии со сверхдлинными базами — РСДБ.

В работах [2, 3, 4] нами продолжен новый метод исследований АЯГ в рамках модели ДСЧД без привлечения других данных кроме радиодиапазона. На основе длительного многочастотного мониторинга в радиодиапазоне определены параметры ТДС из СМЧД, включая орбиты и массы систем.

В предлагаемой работе анализируются новые данные, полученные во время детального мониторинга продолжительной вспышки в 3C 454.3 на миллиметровых волнах в течении 2010—2020 гг. Предложена интерпретация необыкновенного по длительности вспышечного явления и оценена мощность гравитационных волн (ГВ), излучаемых 3C 454.3.

2. Наблюдения и обработка

Радионаблюдения на 22,2 и 36,8 ГГц производились с помощью 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) Крымской астрофизической обсерватории. Использовались радиометрические системы с диаграммной модуляцией [1]. Так удавалось избежать присутствия в данных аномального спектра флуктуаций коэффициентов усиления усилителей, существенно искажающего результаты. Дополнительным преимуществом используемого способа приема было снижение уровня флуктуаций неоднородностей атмосферы, которые существенны на сантиметровых и особенно на миллиметровых длинах волн.

Антенная температура от источника фиксировалась как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антенны, когда радиотелескоп устанавливался на источник поочередно то одним то другим приемными рупорами. Наблюдения каждого источника, как правило, состояли из 5—20 измерений. Затем рассчитывалось среднее значение, и вычислялась среднеквадратичная ошибка среднего. Параллельно с наблюдениями исследуемых объектов проводились наблюдения калибровочных источников, параметры которых указаны в таблице 1.

Таблица 1. Параметры калибровочных источников.

Table 1. Parameters of calibration sources

Частота, ГГц	Принятые значения потоков для источников, Ян			
	DR 21	3C 274	NGC 7027	3C 286
36.8	18.3	14.3	5.1	1.56
22.2	19.5	21.5	5.4	2.37

Примечание: В первой колонке таблицы указана частота, во второй—пятой — принятые спектральные плотности потоков.

Антенные температуры от источников пересчитывались в плотности потоков с использованием зависимости:

$$P = 2kT_a/S_{эфф}, \quad (1)$$

где P — поток радиисточника, k — постоянная Больцмана, T_a — антенная температура от источника, $S_{эфф}$ — эффективная площадь радиотелескопа. Изменение эффективной площади антенны $S_{эфф}$ от угла места h определялась по данным наблюдений калибровочных источников на разных h и азимутах A_z антенны с введением соответствующих поправочных коэффициентов. В диапазоне h от 60° до 90° изменений $S_{эфф}$ не отмечено и на этих углах поправочные коэффициенты не вводились.

Среднеквадратичные ошибки плотностей потоков включали ошибки измерений антенной температуры. Типичные ошибки значения T_a находились в пределах 5 %. При данной методике наблюдений учитывались также ошибки, возникающие вследствие изменений уровня шумов аппаратуры, вариаций коэффициента поглощения в атмосфере, нестабильности коэффициента усиления радиометра и ошибки наведения радиотелескопа.

Мониторинг на частоте 14,5 ГГц выполнялся на 26-метровом радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета в период 1974 по 2012 гг., базы данных которого были ранее опубликованы и использованы в работах [4, 5]. Мониторинг на частоте 15 ГГц выполнялся с помощью 40-метрового радиотелескопа Owens Valley Radio Observatory [6] в период 2008—2019 гг.

Данные в гамма-диапазоне получены в рамках миссии FERMI на инструменте LAT¹. Источник 1FGL 2253.9+1608 был позиционно отождествлен с блазаром 3C 454.3 [7]. Каждая точка соответствует усредненному за сутки фотонному потоку, интегрированному в диапазоне энергий от 100 МэВ до 300 ГэВ.

¹ http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html

3. Результаты

На рис. 1 приведены кривые блеска источника в радио и гамма-диапазонах длин волн в период с 2008 по 2020 гг. На основе данных радиодиапазона за весь период наблюдений с 2014 г. выполнен гармонический анализ вариаций плотности потока излучения с помощью метода Шустера [4]. В таблице 2 приведены данные гармонических составляющих, усредненные по всем частотам (первая строка таблицы).

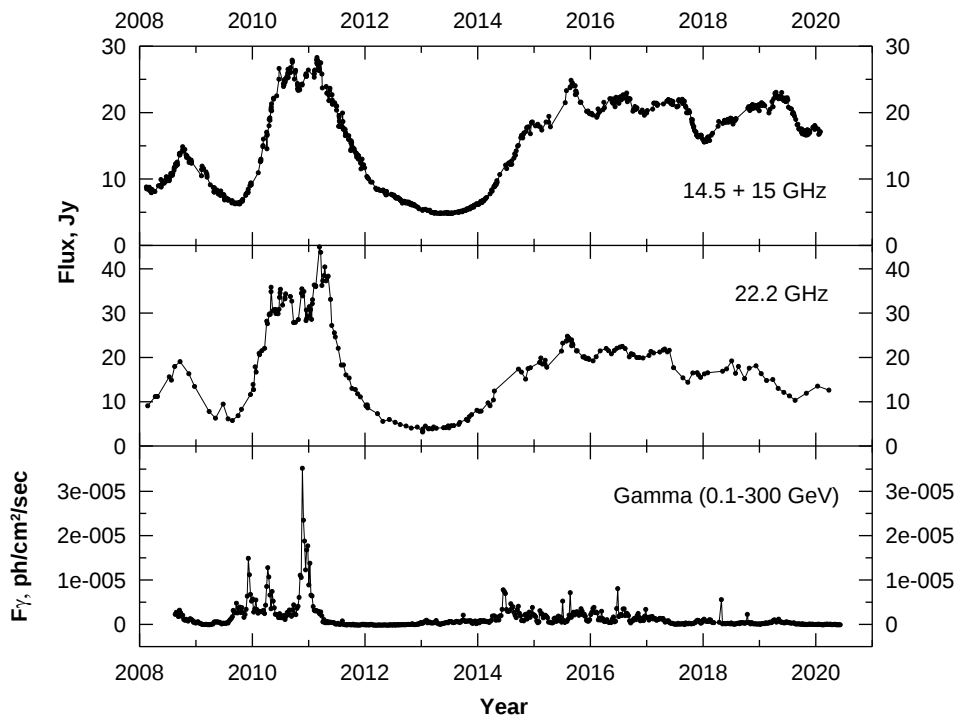


Рис. 1. Данные многочастотного мониторинга 3C454.3 в период с 2008 по 2020 гг.

Fig. 1. Data of multifrequency monitoring 3C454.3 in the period from 2008 to 2020

Как и в гармоническом анализе данных, проведенном нами ранее, уверенно выделяется период в 14 лет, который следует отнести к прецессионным движениям центральной массивной черной дыры и связанных с ней центральных областей аккреционного диска. Самый короткий период в 2,3 года можно соотнести периодам вращения центрального тела и компаньона по орбите. Этот период, естественно, более четко выделяется на высоких частотах 22,2 и 36,8 ГГц. Близкие значения периодов для 3C454.3 выявлены также в работе [8].

Во второй строке таблицы 2 показаны периоды в системе координат, связанной с источником ($z = 0.86$) при значении $\gamma = 5$. Для блазара 3C454.3 пересчет осуществлялся по формуле, указанной в работе [9]:

$$T_{\text{ист}} \approx T_{\text{набл}} \cdot \gamma^2 / (1+z). \quad (2)$$

Таблица 2. Результаты гармонического анализа
многочастотного мониторинга 3C454. 3.

Table 2. Results of harmonic analysis of multifrequency monitoring 3C454. 3

$T_{1966-2020}$ (years)	14.0 ± 1.4 ($T_{\text{pr, obs}}$)	7.3 ± 0.7	2.3 ± 0.2 ($T_{\text{orb, obs}}$)	1.1 ± 0.1
$T_{[\gamma^2/(1+z)]}$ (years)	188 ± 19 ($T_{\text{pr, ist}}$)	100.0 ± 10.0	31.0 ± 2.8 ($T_{\text{orb, ist}}$)	15.0 ± 1.5

Отношение прецессионного и орбитального периодов составляет величину около шести. В таблице 3 приведены три варианта данных по размерам орбиты и массам компаньонов, рассчитанных в рамках модели двойных систем из СМЧД, основанной на законах небесной механики и дающей значения масс компаньонов и их связь с размерами орбиты [10]:

$$m = (16\pi^2 \cdot r^3) / (3G \cdot T_{\text{orb}} \cdot T_{\text{np}}), \quad (3)$$

$$M = m (0.75 \cdot T_{\text{np}} / T_{\text{orb}} - 1), \quad (4)$$

где M , m , r — масса центральной СМЧД, компаньона и радиус орбиты компаньона соответственно.

Таблица 3. Параметры компаньонов СМЧД 3C 454.3 и время жизни до слияния.

Table 3. Parameters of SMChD 3C 454.3 companions and lifetime before fusion

Radius of the companions orbit	Mass of the companion	Mass of the central SMBH	Life-time, years
$6.0 \cdot 10^{17}$ cm	$1.6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$5.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$1.3 \cdot 10^4$
$4.5 \cdot 10^{17}$ cm	$6.8 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$2.4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$5.5 \cdot 10^4$
$3.0 \cdot 10^{17}$ cm	$2.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$7.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$4.2 \cdot 10^5$

4. Дискуссия

Как следует из приведенных параметров системы в таблице 3, приемлемыми значениями для радиуса орбиты компаньона и масс черных дыр являются данные во второй строке. В этом случае вопрос о потерях на

гравитационное излучение остро не стоит, и нет непомерно большого значения массы центрального тела. Скорость движения компаньона по орбите при этом составляет около 30000 км/с, которая является не только сверхзвуковой для газово-пылевой среды АД, но и почти релятивистской (0.1 с). Температура за фронтом ударных волн при таких скоростях поднимается выше $T \approx 10^{10} K$.

Температуру нагрева газа за фронтом ударных волн, возникающих от сверхзвукового движения компаньона двойной черной дыры, определяем из соотношения:

$$m_p v^2 / 2 = 3kT / 2, \quad (5)$$

где m_p — масса иона, v — направленная скорость движения газа ($\approx 3 \cdot 10^9$ см/с).

Вспышка в 3C 454.3 началась, по-видимому, в 2010 г. В это время компаньон начал приближаться к центральным областям АД (рис. 1). Амплитуда вспышки достигла максимальных значений и удерживалась на этих уровнях около года. После этого, в течение полутора лет спектральная плотность потока упала в 10 раз и через такое же время восстановилась, но не до максимального уровня, на котором находилась до 2020 г. (см. панель 14,5+15 ГГц). Такого не было замечено ни в одном АЯГ. Начавшаяся с начала 2010 г. вспышка в 3C 454.3 продолжается уже десять лет. Благодаря совпадению плоскостей АД и орбиты компаньона последний перемещается по орбите, расположенной внутри АД, поэтому мы и наблюдаем специфический профиль вспышки. Эпизодический выход спада амплитуды вспышки можно объяснить уменьшением γ -фактора в 2 раза, возможно, за счет прецессионного и нутационного движения оси центральной СМЧД.

Все предыдущие вспышечные явления в этом и других объектах имели острые максимумы без плато. По-видимому, ситуация, когда компаньон длительное время находится внутри АД, случается довольно редко. Для этого необходимо, чтобы угол между направлением на наблюдателя и выбросом (джетом) находился внутри конуса прецессии, что обеспечивает попадание излучения к наблюдателю. Вспышка будет продолжаться и далее до тех пор, пока компаньон либо не разрушит АД полностью, либо наступит момент, когда компаньон все-таки выйдет из АД. Анализируя данные на рис. 1, создается впечатление, что компаньон все-таки выйдет из АД. В этом случае АД не разрушится полностью или частично, а восстановится. Этому способствуют два обстоятельства:

а) из-за прецессии орбиты (движение перицентра) компаньон перемещается с каждым новым оборотом по новой траектории в АД,

б) скорость замещения «выметенного» вещества в АД выше скорости движения компаньона по орбите. Это обеспечивают высокие тепловые скорости и дополнительное внешнее давление вещества в АД.

По нашим данным прецессионный период в системе составляет около 14 лет [11]. Значительную часть этого периода компаньон уже находится в АД. На основе кривой изменения потока (на частоте 36,8 ГГц, например) он будет там находиться еще некоторое время до полного выхода из АД [12]. В первом приближении можно принять, что компаньон будет находиться в АД целый период прецессии.

Если говорить о толщине d АД вокруг центрально СМЧД, то она много меньше диаметра. Были получены ориентировочные данные об угле раствора конуса прецессии в системе i и угле между выбросом (джетом) и направлением на наблюдателя $\gamma^2 \approx 1/\theta \approx 25$ (при $\theta \approx 2.5^\circ$).

С другой стороны, интервалы активности в источнике по времени составляют большую часть прецессионного периода, откуда следует, что $i \geq \theta \approx 5^\circ$. Поэтому вариация углов наклона АД к плоскости орбиты компаньона не превышает $\pm 2.5^\circ$, что составляет 1/25 от радиуса АД.

Если предположить наличие в системе 3C454.3 стационарной аккреции на центральную СМЧД со стороны АД, то естественно считать, что толщина АД составляет не менее двух гравитационных радиусов центральной СМЧД: $d_{ad} \approx 2R_g \approx 2 \cdot 10^{16}$ см [5]. Это подтверждает мнение о том, что АД является физически тонким, но оптически толстым по Томсоновскому рассеянию (отношение толщины к диаметру диска около 25).

Согласно новым данным о сверхдлительной вспышке в 3C454.3 и высказанных предположениях о толщине АД можно получить размеры орбиты компаньона в рамках модели двойной тесной системы из СМЧД, предложенной нами в [2, 11]. Если использовать значение для массы центральной СМЧД (строка 2 табл. 3), то $R_{orb} \approx 2R_g \cdot 25 \approx 5 \cdot 10^{17}$ см. Тогда эти данные почти совпадают со значением для радиуса орбиты компаньона (строка 2 табл. 3).

Таким образом, неудивительно, что компаньон при совпадении плоскостей орбиты и АД несколько орбитальных периодов находится внутри АД.

Временные масштабы изменений потоков во время вспышек могут дать информацию о распределении размеров неоднородностей материи в АД. Известно, что характерное время значительных изменений потоков может составлять величину порядка дней. При скоростях движения компаньона в АД ($3 \cdot 10^9$ см/с) это дает размер неоднородности $l \approx 10$ а. е. Таким способом мы можем зондировать структуру АД на предмет распределения в нем вещества.

Оцененное время жизни системы 3C454.3 по формуле (1) работы [13] дает значение $\tau_{\text{сл}} = 4,5 \cdot 10^4$ лет при значениях двойной системы, указанные во второй строке таблицы 3. По космическим меркам ($T \approx 10^{10}$ лет) — величина ничтожная, но она дает ответ на вопрос, почему АЯГ такие немногочисленные ($N_{\text{АЯГ}} \approx 10^4$) среди массивных эллиптических галактик ($N_{\text{эллг}} \approx 10^4$).

В связи с изложенным можно отметить, что в последние годы сильно возрос интерес к проблеме возможности обнаружения гравитационных волн от массивных ускоренно двигающихся астрофизических объектов. К ним, безусловно, относится уникальная двойная система 3C454.3. До недавнего времени считалось, что достоверно установленной единственной двойной системой из СМЧД является ОЖ 287. Основные наблюдательные данные для этой системы были получены в оптическом диапазоне в течение более 100 лет. Это первая из двойных СМЧД, для которой были определены параметры орбиты и характеристики СМЧД для нахождения значений мощности гравитационных волн от этого источника.

С использованием кривой блеска в оптическом диапазоне была построена прецессионная модель двойной СМЧД для источника ОЖ 287 [14]. Мощность ГВ, идущая от источника:

$$dE/dt = L_{\text{ОЖ287}} = \{[32 \cdot G^4 \cdot M^2 \cdot m^2 (M+m) \cdot (1+3.5e^2+1.4e^4)]/[5c^5 \cdot a^5 (1-e^2)^{1/2}]\} \approx 2.3 \cdot 10^{44} \text{ эрг/с (6)}$$

где масса центральной СМЧД $M = 1.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, масса компаньона $m = 1.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$, эксцентриситет орбиты $e = 0,7$, большая полуось орбиты $a = 10^{17}$ см. Это принятые значения параметров ОЖ 287 [15]. Полученные данные согласуются по порядку величины с данными в работах других авторов [14, 16, 17]. Во время вспышечных явлений в ОЖ 287 мощность ГВ может возрасти на несколько порядков.

Оценим мощность ГВ идущих от нашего источника 3C 454.3. Как было показано выше, эта двойная СМЧД является тесной двойной системой с радиусом орбиты компаньона $R_{\text{орб}} \approx 4.5 \cdot 10^{17}$ см. Если допустить аналогичный ОЖ 287 эксцентриситет $e = 0,7$, массы центральной СМЧД и компаньона (строка 2 табл. 3), то получим мощность ГВ, излучаемую двойной системой 3C 454.3, равную $dE/dt = L_{3C 454.3} \approx 4.5 \cdot 10^{46} \text{ эрг/с}$, что в 200 раз больше, чем от источника ОЖ 287.

Таким образом, блазар 3C 454.3 ($z = 0,8$) в настоящее время является самым мощным излучателем ГВ. Он находится несколько дальше, чем ОЖ 287 ($z = 0,3$). Но даже с учетом разницы в расстоянии $R_{3C454.3}/R_{\text{ОЖ287}} \approx 2,7$ амплитуда ГВ от него на Земле будет существенно больше. Это связано, в

первую очередь, с тем, что по параметрам модели у ЗС 454.3 гораздо более массивный компаньон (его масса на 2 порядка больше). В этой связи будет интересно оценить время жизни этой системы до слияния [18, 19].

Учитывая приведенную мощность потерь на гравитационное излучение $L_{ЗС\,454.3} \approx 4,5 \cdot 10^{46}$ эрг/с, время жизни системы до слияния составляет всего $T_{сл} \approx 5,5 \cdot 10^4$ лет, что по космическим меркам ничтожно мало. Этот результат лишний раз доказывает, почему яркие АЯГ так немногочисленны.

Если бы слияние в ЗС 454.3 произошло в настоящее время, то это был бы ~~неизъяненный~~ подарок для гравитационных детекторов LIGO, VIRGO, LISA и им подобным. Но на это не приходится рассчитывать. Указанные детекторы эффективно работают на временных шкалах секунды и меньше. Двойные системы из СМЧД излучают ГВ на частотах 10^{-8} — 10^{-9} Гц. В этом случае для регистрации таких «растянутых» событий лучше всего подходят детекторы установки IPTA [20], работающие как раз в этом диапазоне частот.

5. Выводы

1. Проанализированы данные длительных многочастотных мониторингов необычного всплещного явления в источнике ЗС454.3 за период 2010—2020 гг.
2. Форма изменения потока во время вспышки может указывать на совпадение плоскостей аккреционного диска АД и орбиты компаньона центральной сверхмассивной черной дыры СМЧД.
3. Наличие предполагаемого орбитального периода в 2,3 года в вариациях излучения ЗС 454.3 в течение длительной вспышки свидетельствуют также в пользу высказанной гипотезы, но не в пользу резкого изменения γ - и доплер-факторов, которые могли бы привести к наблюдаемому эффекту удлинения орбитального периода.
4. По нашим прогнозам, из-за прецессии центрального тела компаньон центральной СМЧД через некоторое время все-таки выйдет из АД, если последний сохранит свою устойчивость и не разрушится.
5. По данным мониторинга наблюдаются значительные по амплитуде флуктуации плотности потока излучения во время продолжительной вспышки, которые могут быть следствием неоднородностей материи в АД размерами порядка 10^{15} — 10^{16} см. Поэтому, подробный длительный мониторинг ярких двойных СМЧД может быть использован для изучения распределения характерных размеров вещества в АД.
6. Выполнены оценки уровня возможных гравитационных волн (ГВ), идущих от ЗС 454.3. Показано, что данная система является в насто-

ящее время самым мощным излучателем ГВ и амплитудой ГВ на Земле, превосходящей аналогичную от OJ 287.

7. Оцененное время жизни системы 3C 454.3 показывает, что это очень короткоживущий объект со временем жизни всего $5,5 \cdot 10^4$ лет.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-29-11005 (А.Е.В., М.Г.Л.). В исследовании использованы данные программы мониторинга 40-метрового радиотелескопа OVRO [6], которая частично поддержана грантами НАСА NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G и NSF, а также грантами AST-0808050 и AST-1109911.

Список литературы

1. Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Обзор внегалактических радиоисточников на волне 1,35 см // Изв. КРАО. 1979. Т. 60. С. 3—13.
2. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Корреляция развития вспышечного явления в блазаре 3C 454.3 в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. 2008. Т. 85, № 11. С. 963—971.
3. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др. Субпарсекковая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. 2010. Т. 87, № 1. С. 33—42.
4. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М., Сергеев С. Г., Дорошенко В. Т., Назаров С. В., Борман Г. В., Пушкарев А. Б., Чеснок Н. Г. Многочастотные исследования нестационарного излучения блазара 3C 454.3 // Астрон. журн. 2011. Т. 88, № 7. С. 662—670.
5. Вольвач А. Е., Кутькин А. М., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н. и др. Продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C 454.3 // Астрон. журн. 2013. Т. 90, № 1. С. 53—59.
6. Richards J. L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V. et al. Blazars in the Fermi era: the OVRO 40 m telescope monitoring program // ApJS, 2011, vol. 194:29, pp. 1—22.
7. Sasada M., Uemura M., Arai A. et al. Multiband Photopolarimetric Monitoring of an Outburst of the Blazar 3C 454.3 in 2007 // PASJ, 2010, vol. 62, no. 3, pp. 645—652.
8. Рябов М. И., Сухарев А. Л. Определение характера спектральных и временных изменений потоков радиоизлучения активных ядер галактик и квазаров на различных фазах их активности // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13, № 3. С. 98—104.
9. Rieger F. M. Periodic variability and binary black hole systems in blazars // AIP Conference Proceedings, 2005, vol. 745, pp. 487—492.
10. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др. Субпарсекковая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. 2010. Т. 87, № 1. С. 33—42.
11. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Переменность излучения блазара 3C 454.3 за период 40 лет // Астрон. журн. 2007. Т. 84, № 6. С. 503—513.
12. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Мониторинг вспышечного явления 2014—2018 гг. в блазаре 3C454.3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 5—12.
13. Rodriguez C., Taylor G. B., Zavala R.T. et al. A Compact Supermassive Binary Black Hole System // Astrophys. J., 2006, vol. 646, pp. 49—60.

14. Valtonen M. J. New Orbit Solutions for the Precessing Binary Black Hole Model of OJ 287 // *ApJ*, 2007, vol. 659, pp. 1074–1081.
15. L. Dey, A. Gopakumar, M. Valtonen, et. al. The Unique Blazar OJ 287 and Its Massive Binary Black Hole Central Engine // *Universe*, 2019, vol. 5, 108, pp. 1–16.
16. Sun Yu-Tao, Liu Jie-Ying, Liu Jin-zhong, Ai Yan-Li, Zhou Ming, Qiao Er-lin. A Research on the Gravitational Wave Radiation of OJ 287 // *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2011, vol. 35, iss. 2, pp. 123–132.
17. Hobbs G., Archibald A., Arzoumanian Z. et al. The international pulsar timing array project: using pulsars as a gravitational wave detector // *CQGra*, 2010, vol. 27, 084013, pp. 1–11.
18. Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 5—23.
19. Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Дмитроца А. И. Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 24—31.
20. Manchester R. N. The Parkes Pulsar Timing Array // *ChJAS*, 2006, vol. 6, suppl. 2, pp. 139–147.

Информация об авторах

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

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

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Information about the authors

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

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

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.3.051.025

Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии¹

¹ Широков И. Б., ² Сердюк И. В., ³ Азаров А. А., ⁴ Широкова Е. И.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ shirokov@ieee.org

² serdyuk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Получено: 5 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 10 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 12 декабря 2020 г.

Аннотация: В статье представлена система беспроводной передачи энергии. Структурно система состоит из двух микрополосковых линий, не излучающих энергию в пространство в отсутствие парной линии, так как являются фрагментами направленного микроволнового ответвителя. Сближение структур друг относительно друга образует направленный ответвитель. Результаты моделирования, а также экспериментальные исследования были представлены ранее. Представлен комплекс действий, направленных на увеличение допусков на взаимное смещение элементов. Внесенные в систему изменения также позволяют увеличить мощность энергии, передаваемой системой. Значения офсетного сдвига при этом могут быть увеличены до расстояния $W/2$, где W — длина стороны структуры. С учетом того, что актуальным является использование системы беспроводной передачи энергии для решения задачи беспроводной подзарядки аккумуляторных батарей беспилотных летательных аппаратов (далее БпЛА), актуальной является задача увеличения данных параметров до предельных значений.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; электромагнитное поле; микрополосковая линия передачи; симметричная полосковая линия передачи; переходное затухание; потери, беспроводная передача энергии, аккумуляторные батареи, автономный электротранспорт, офсетный сдвиг.

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): Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И. Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 277—286.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Широков, И. Б. Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, А. А. Азаров, Е. И. Широкова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 277—286.

Increasing the tolerances for the mutual displacement of the elements of the wireless power transmission system

I. B. Shirokov¹, I. V. Serdyuk², A. A. Azarov³, and E. I. Shirokova⁴

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

¹shirokov@ieee.org

²serdyuk@ieee.org

³azarov@ieee.org

⁴shirokova@ieee.org

Received: December 5, 2020

Peer-reviewed: December 10, 2020

Accepted: December 12, 2020

Abstract: The article presents a wireless power transmission system. Structurally, the system consists of two microstrip lines that do not emit energy into space in the absence of a paired line, since they are fragments of a directional microwave coupler. The convergence of structures relative to each other, forms a directional coupler. The simulation results, as well as experimental studies were presented earlier. A set of actions aimed at increasing the tolerances for the mutual displacement of elements is presented. The changes made to the system also allow to increase the power of the energy transmitted by the system. In this case, the offset values can be increased up to the distance $W/2$, where W is the length of the side of the structure. Taking into account the fact that it is relevant to use a wireless energy transmission system to solve the problem of wireless recharging of batteries for unmanned aerial vehicles (hereinafter UAVs), it is urgent to increase these parameters to near-limit values.

Keywords: wireless power transmission; electromagnetic field; microstrip transmission line; symmetrical strip transmission line; crosstalk attenuation; loss, wireless power transmission, rechargeable batteries, autonomous electric transport, offset shift.

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. “Increasing the tolerances for the mutual displacement of the elements of the wireless power transmission system,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 277–286, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Системы беспроводной передачи энергии получают в современном мире все большее распространение. Использование данных систем заключается в решении задач подзарядки аккумуляторных батарей, однако сами системы беспроводной передачи энергии делятся на множество видов по различным параметрам. Основные параметры, определяющие тип системы беспроводной передачи энергии и ее применение, это рабочая частота и передаваемая мощность. Данные параметры определяются исходя из емкости подзаряжаемой аккумуляторной батареи, а также расстояний между передающей и приемной частями системы передачи энергии. В среднем емкость аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) гражданского типа собственной массой до 1 кг и продолжительностью полета до 1 часа может составлять порядка 10—20 А/ч. Таким образом, для решения задачи подзарядки аккумуляторных батарей БПЛА ряд современных систем не может применяться по причине малой мощности передачи энергии, малой дальности передачи энергии, а также больших потерь энергии.

Таким образом, одним из важнейших параметров системы беспроводной передачи энергии является ее рабочая дальность действия. Именно этому вопросу в настоящей статье уделяется особое внимание.

Не менее важным параметром системы является так называемый офсетный сдвиг, определяющий расстояние, на которое могут смещаться элементы системы друг относительно друга. В существующих системах взаимный сдвиг структур значительно понижает коэффициент передачи и может быть критичным для решения задачи беспроводной передачи энергии. Надо понимать, что на практике при подзарядке аккумуляторных батарей системы стабилизации и управления положением БПЛА могут не справляться с задачей точной его посадки даже при наличии системы прецизионного позиционирования. Таким образом, возникает необходимость улучшать данные параметры системы беспроводной передачи энергии до предельных значений. Этому вопросу в настоящей статье также уделяется особое внимание.

2. Подход к решению проблемы

Ранее была разработана и представлена система беспроводной передачи энергии на расстоянии до 10 мм [1, 2]. Также был представлен вариант электромагнитной структуры [3] максимально эффективно подходя-

щей для решения данной задачи. В работе [4] представлены математические обоснования применения предложенной структуры. Актуальность и работоспособность представленной системы подробно описана в [5].

В упомянутых выше работах представлены результаты компьютерных моделирований систем передачи энергии в среде MWO AWR Design Environment и результаты экспериментальных исследований. По факту наличия достаточно близких совпадений моделирования и эксперимента был сделан вывод о том, что данная среда разработки дает приближенный к реальным значениям результат. Она может быть использована для предварительного моделирования подобного рода систем при их проектировании, учитывая тот факт, что затраты на изготовление опытного образца реальной системы могут быть существенными.

Основной целью данной работы является улучшение параметров системы передачи энергии, связанных с взаимным смещением ее элементов приема и излучения, описываемых в упомянутых выше работах. Для увеличения расстояния офсетного сдвига была увеличена длина микрополосковой линии. Линия спирали была продолжена во внутреннюю сторону. Это дополнение позволило увеличить расстояние офсетного сдвига до значения половины линейных размеров самой структуры, конечно, с определенными потерями по коэффициенту передачи энергии.

Основной причиной возникновения необходимости улучшения параметров передачи является увеличение мощности системы. Была поставлена задача проверки так называемой масштабируемости системы. При этом мощность системы определялась временем зарядки батарей. Время зарядки было задано равным 30 мин. Исходя из этих характеристик, а также параметров емкости аккумуляторной батареи, было определено значение передаваемой мощности системы беспроводной передачи энергии. Данное значение составляло единицы киловатт. Для определенности будем использовать значение 1 кВт.

Исходя из этого предложенная ранее электромагнитная структура, используемая для системы беспроводной передачи энергии, была модернизирована. Ширина линии, а соответственно и зазор между линиями спирали был увеличен до 70 мм. Толщина диэлектрической подложки при этом была увеличена до 20 мм. При этом физические параметры рассчитывались таким образом, чтобы уменьшить рабочую частоту функционирования системы, что упростит реализацию выпрямительного блока, с учетом увеличения рабочего расстояния передачи энергии.

Внешний вид структуры в среде моделирования AWR Design Environment Microwave office показан на рис. 1. Были проведены исследования для двух расстояний и на пониженных частотах (менее 100 МГц).

Использование предложенной конфигурации также подразумевает увеличение длины микрополосковой линии в сравнении с предложенной ранее. В данном варианте длина микрополосковой линии электромагнитной структуры составляла приблизительно 11 м. При этом размеры одного элемента системы передачи энергии составляли: длина была равна 1250 мм, ширина — 1190 мм. Соответственно рабочая площадь электромагнитной структуры составляла примерно $1,4 \text{ м}^2$. Данное значение выбиралось исходя из известной универсальности применимости системы. Предполагалось также использование данной системы беспроводной передачи энергии для подзарядки батарей городского электротранспорта. При этом один элемент системы устанавливался под днище кузова транспортного средства, другой встраивался в дорожное полотно.

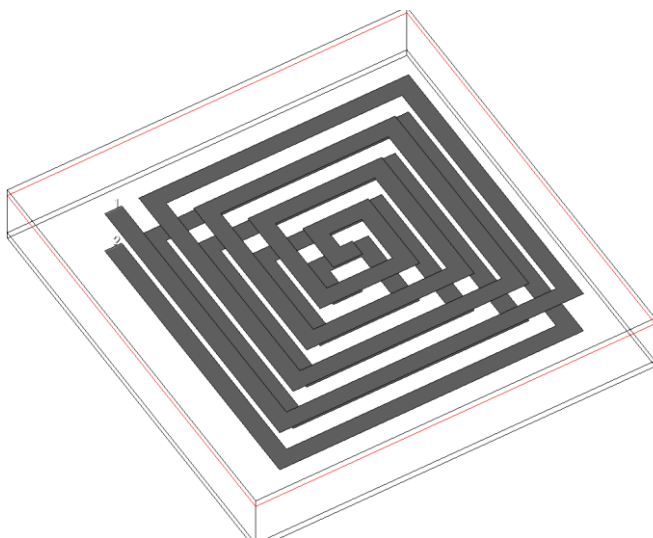


Рис. 1. Электромагнитная структура в МВО.

Fig. 1. Electromagnetic structure in MWO

При этом полагалось, что указанное значение размеров структуры будет минимально возможным для организации беспроводной передачи энергии с указанным значением мощности на расстояния до 200 мм.

3. Конструкция и моделирование

В работе описывается конструкция системы беспроводной передачи энергии и проводится моделирование ее работы на расстоянии 200 мм и 170 мм между полосковыми структурами.

Также в качестве объекта исследований было решено использовать толщину диэлектрической подложки. Были выбраны значения толщин равные 20 мм и 30 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки была выбрана равной 5.

Исследования влияния сдвигов структур проводились при значениях 140 мм, 280 мм, 480 мм и 620 мм. Указанные структуры и сдвиги показаны на рис. 2 (1 — 140 мм, 2 — 280 мм, 3 — 480 мм, 4 — 620 мм).

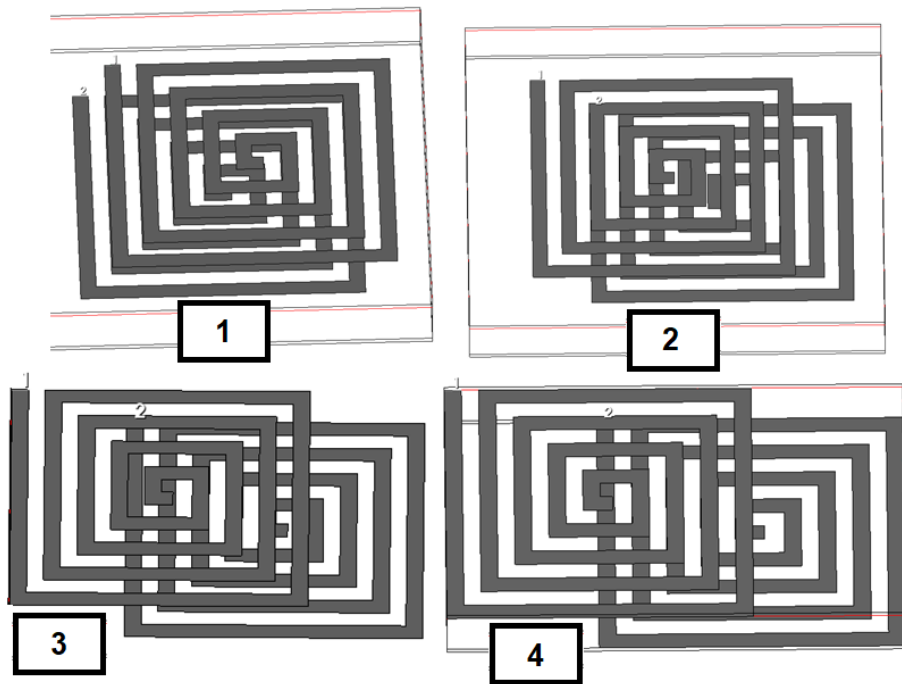


Рис. 2. Смещение структур друг относительно друга в среде МВО.

Fig. 2. Displacement of structures relative to each other in the MVO environment

С учетом всех параметров было построено два графика зависимостей коэффициента передачи от частоты для толщины диэлектрика равной 20 мм и 30 мм для всех сдвигов, показанных на рис. 2. Данные графики показаны на рис. 3 (толщина диэлектрической подложки равна 20 мм) и рис. 4 (толщина диэлектрической подложки равна 30 мм)

По результатам исследований были составлены две таблицы, отображающие полученные зависимости с указанием максимальных коэффициентов передачи в зависимости от рабочей частоты системы. Таблица 1 соответствовала рис. 3, таблица 2 — рис. 4.

В данных таблицах показаны значения частот и коэффициентов передачи для структур с толщинами диэлектрических слоев равных 20 мм и 30 мм на расстояниях между структурами в 170 мм и 200 мм, и при офсетных сдвигах соответствующих 0 мм, 140 мм, 280 мм, 480 мм и 620 мм.

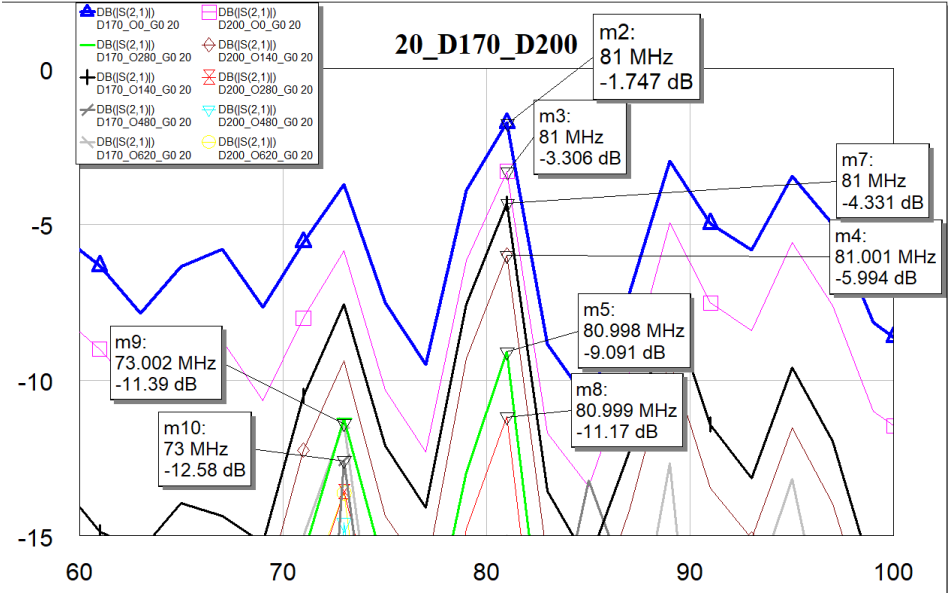


Рис. 3. Результаты моделирования структур при толщине диэлектрика равной 20 мм.

Fig. 3. The results of structures modeling with a dielectric thickness of 20 mm

Таблица 1. Максимальные значения коэффициента передачи для фиксированных частот от офсетных сдвигах структур на расстояниях 170 мм и 200 мм при толщине диэлектрика 20 мм.

Table 1. The maximum values of transmission coefficients at frequencies from offset shifts of structures at distances of 170 mm and 200 mm with a dielectric thickness of 20 mm

	0 мм	140 мм	280 мм	480 мм	620 мм
170 мм	81 МГц -1.747 дБ	81 МГц -4.331 дБ	81 МГц -9.1 дБ	73 МГц -12.57 дБ	73 МГц -11.3 дБ
200 мм	81 МГц -3.3 дБ	81 МГц -5.9 дБ	81 МГц -11.17 дБ	73 МГц -14.5 дБ	73 МГц -12.58 дБ

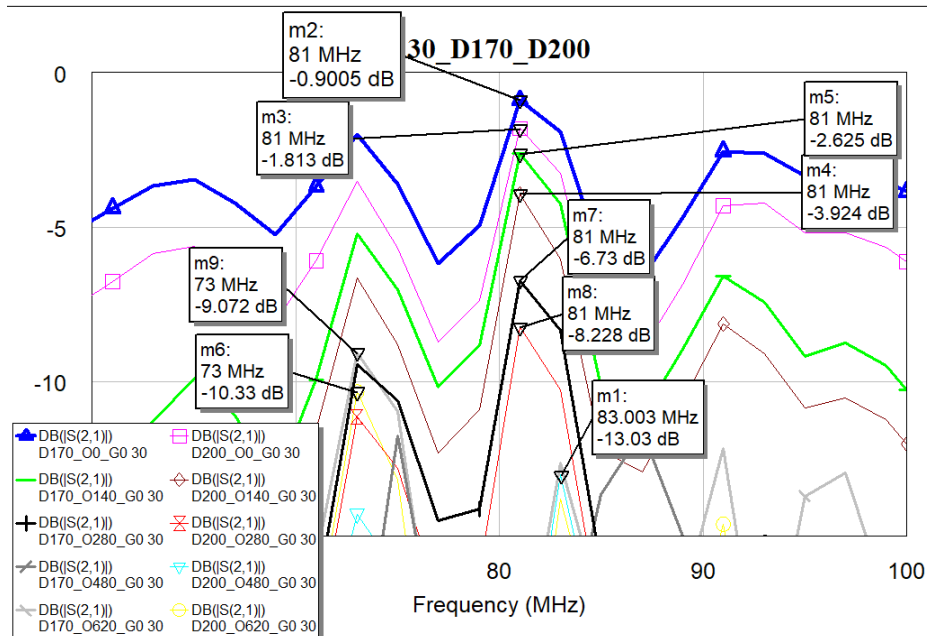


Рис. 4. Результаты моделирования структур при толщине диэлектрика равной 30 мм.

Fig. 4. The results of structures modeling with a dielectric thickness of 30 mm

Таблица 2. Максимальные значения коэффициента передачи для фиксированных частот от офсетных сдвигов структур на расстояниях 170 мм и 200 мм при толщине диэлектрика 30 мм.

Table 2. The maximum values of transmission coefficients at frequencies from offset shifts of structures at distances of 170 mm and 200 mm with a dielectric thickness of 30 mm

$\begin{matrix} \leftrightarrow \\ \updownarrow \end{matrix}$	0 мм	140 мм	280 мм	480 мм	620 мм
170 мм	81 МГц -0.9 дБ	81 МГц -2.6 дБ	81 МГц -6.7 дБ	75 МГц -11.7 дБ	73 МГц -9.02 дБ
200 мм	81 МГц -1.8 дБ	81 МГц -6.7 дБ	81 МГц -8.2 дБ	83 МГц -13.0 дБ	73 МГц -10.3 дБ

На основании полученных в результате исследований данных, которые сведены в таблицы, можно сделать вывод, что система беспроводной передачи энергии может быть использована для подзарядки аккумуляторных батарей повышенной емкости. Использование батарей повышенной емкости предполагает передачу энергии повышенной мощности.

Также из таблиц видно, что использование системы с толщиной диэлектрика, равной 30 мм, дает допустимые значения офсетного сдвига порядка 140 мм на рабочих расстояниях до 200 мм.

4. Заключение

В ходе проведения исследований, представленных в статье, были разработаны компьютерные модели микрополосковых структур, подходящих для подзарядки аккумуляторных батарей как БПЛА, так и автономного городского электротранспорта. Полученные в результате проведенных исследований значения коэффициента передачи энергии на соответствующих частотах указывают на то, что система беспроводной передачи энергии, представленная ранее, является полностью масштабируемой. Простое увеличение геометрических размеров электромагнитных структур приводит к увеличению значения передаваемой мощности и увеличению максимального рабочего расстояния системы передачи энергии при увеличенных возможных сдвигах электромагнитных структур системы.

Можно также сделать вывод, что потери, сопутствующие процессу беспроводной передачи энергии, являются допустимыми при использовании описанных элементов системы.

Предельные значения расстояний между элементами системы передачи энергии были взяты исходя из максимального значения клиренса электромобиля.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Севастопольского региона, номер проекта 20-48-920001.

Список литературы

1. Широков И. Б. Пат. 2704602 (РФ). Способ беспроводной передачи высокочастотной электрической энергии. Опубл. в Б. И., 2019. № 31.
2. Широкова Е. И., Азаров А. А., Широков И. Б. Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 380—389.
3. Shirokov I., Azarov A., and Serdyuk I. The Radiating Structure of a Short-Range Wireless Energy Transmission System, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018, pp. 1—4, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602659.
4. Широков И. Б., Азаров А. А., Широкова Е. И. Расчет энергетических параметров полосковой структуры для системы беспроводной передачи энергии. В сб. : Морские технологии и решения — 2020 по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии : проблемы и решения — 2020 под общ. ред. Масюткина Е. П. Керчь, Керченский государственный морской технологический университет, 2020. С. 80—82.

5. Широкова Е. И., Азаров А. А., Широков И. Б. Система беспроводной передачи энергии. В сб. : Тр. конференции IEEE 2019 российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (ElConRus'19), Санкт-Петербург, Москва, Россия, 28—30 января 2019 г. С. 1065—1069.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Азаров Андрей Андреевич, аспирант Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Igor V. Serduk, associate professor Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey A. Azarov, graduate student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.373.826:616.62-003.7

Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни¹

¹ Чернега В. С., ² Еременко А. Н.

¹ Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
vs_chernega@mail.ru

² Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,
Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки
бульвар Ленина 5/7, 295051, Симферополь, Россия
medicallyug@gmail.com

Получено: 17 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 2 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 8 декабря 2020 г.

Аннотация: Приведены параметры твердотельного гольмиевого лазера, применяемого при лечении мочекаменной болезни. Представлены результаты экспериментальных исследований величины удельной потери массы мочевых камней при воздействии на конкремент импульсов гольмиевого лазера, излучающего импульсы с длиной волны 2,1 мкм, частотой от 8 до 12 Гц и энергией от 0,6 до 1,6 Дж. Получены значения удельной потери массы при локализации камней в различных сегментах мочеточников и чашечно-лоханочной системы почек, которая изменялась от $0,383 \pm 0,087$ мг/Дж до $0,487 \pm 0,083$ мг/Дж, в зависимости от пола больного и места локализации конкремента. Показано, что эта величина позволяет оценить длительность полного разрушения конкремента и прогнозировать длительность проведения операции литотрипсии.

Ключевые слова: гольмиевый лазер, удельная потеря массы камней, длительность разрушения конкремента, литотрипсия.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Чернега В. С., Еременко А. Н. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 287—295.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Чернега, В. С. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни / В. С. Чернега, А. Н. Еременко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 287—295.

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.).

Features of use of solid state lasers in the treatment of urolithiasis

V. S. Chernega¹ and A. N. Eremenko²

¹Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
v_chernega@rambler.ru

²V. I. Vernadsky Crimean Federal University
St. Luke's Clinical Medical Multidisciplinary Center
5/7, Lenina Boulevard, Simferopol, 295007, Russian Federation
medicallyug@gmail.com

Received: November 17, 2020

Peer-reviewed: December 2, 2020

Accepted: December 8, 2020

Abstract: The parameters of a solid-state holmium laser used in the treatment of urolithiasis are presented. The results of experimental studies of the value of the specific mass loss of urinary stones when the calculus is exposed to pulses of a holmium laser emitting pulses with a wavelength of $2.1\ \mu\text{m}$, a frequency of 8 to 12 Hz, and an energy of 0.6 to 1.6 J mass with localization of stones in various segments of the ureters and the renal calyceal system, which varied from $0.383 \pm 0.087\ \text{mg/J}$ to $0.487 \pm 0.083\ \text{mg/J}$, depending on the gender of the patient and the location of the calculus. It was shown that this value makes it possible to estimate the duration of the complete destruction of the calculus and to predict the duration of the lithotripsy operation.

Keywords: holmium laser, specific stone loss, duration of calculus destruction, lithotripsy.

For citation (IEEE): V. S. Chernega et al. "Features of use of Solid State Lasers in the treatment of urolithiasis", *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 287–295, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Мочекаменная болезнь (МКБ) характеризуется наличием твердых минеральных конкрементов (камней) в мочевыводящей системе человека: почках, мочеточниках, мочевом пузыре, образующихся в процессе его жизнедеятельности. МКБ встречается не менее чем у 3 % населения нашей страны. Проблема МКБ в Крыму и Севастополе дополнительно усугубляется в связи с высоким уровнем минерализации питьевой воды. 30—40 % урологических больных, находящихся на стационарном излечении в боль-

ницах, составляют люди, страдающие мочекаменной болезнью. Если не удастся излечить больного консервативными методами, врачи вынуждены осуществлять оперативное вмешательство. В настоящее время для удаления мочевых камней открытые операции проводятся редко. На смену им пришла малоинвазивная литотрипсия — способ дробления камней путем воздействия на него ультразвуковых ударных волн или лазерного излучения, генерируемых специальным устройством — литотриптером. Наиболее перспективным способом дробления мочевых конкрементов является лазерная литотрипсия с использованием литотриптера на основе твердотельного гольмиевого лазера, который является «золотым стандартом» контактной литотрипсии [1]. Гольмиевый лазер выполняется на основе кристалла искусственного рубина Al_2O_3 , легированного ионами хрома Cr^{+3} и гольмия Ho^{+3} . Такой лазер получил обозначение Ho:YAG (Holmium: Yttrium-Aluminum-Garnet). В качестве генератора накачки применяется ксеноновая лампа-вспышка. Зарубежной и отечественной промышленностью выпускается несколько типов гольмиевых литотриптеров. Типовыми параметрами гольмиевого лазера являются: длина волны оптических колебаний 2100 нм; максимальная мощность излучения 30 Вт; энергия импульсов может регулироваться от 0,2 до 4 Дж; частота импульсов может устанавливаться от 3 до 25 Гц, а длительность импульсов — от 150 до 850 мкс. Преимуществом гольмиевого литотриптера является высокое поглощение излучения в биоткани и малая глубина проникновения в биоткань (до 0,4 мм), что позволяет локализовать область воздействия на конкремент без повреждения окружающей слизистой оболочки.

При трансуретральной контактной лазерной литотрипсии оптический зонд проводится хирургом через естественное физиологическое отверстие, уретру, мочевого пузыря и мочеточник до его непосредственного контакта с камнем. Затем по оптическому волокну подаются импульсы лазера, под действием которых происходит разрушение мочевого конкремента. Механизм разрушения мочевых конкрементов под действием лазерных импульсов достаточно подробно освещен в [2].

Одним из важнейших параметров литотрипсии является время полной фрагментации конкрементов, от которого зависит вероятность осложнений как во время операции, так и в послеоперационный период [3]. Кроме этого, длительность операции оказывает существенное влияние на ее стоимость. Поэтому оценка длительности предстоящей операции является весьма актуальной задачей.

Продолжительность всей операции по удалению мочевых конкрементов, состоящей из ряда этапов, в значительной степени определяется

длительностью собственно дробления (фрагментации) камней. Время фрагментации мочевого камня зависит от его объема, плотности, места локализации, параметров лазерных импульсов, пола и анатомических особенностей больного, а также некоторых других факторов. В урологической практике при диагностировании мочекаменной болезни для указания размера мочевого конкремента до сих пор используется один или два линейных размера [4]. При этом не учитывается форма камня, что приводит к существенной погрешности оценки его объема. Использование компьютерной томографии (КТ) при предоперационном обследовании позволяет оценить не только объем конкремента, но и его рентгенологическую плотность. При наличии таких данных авторами [5] было предложено вместо линейных размеров или объема конкремента использовать массу камня, которая учитывает как объем, так и плотность камня.

Для прогнозирования времени полной фрагментации мочевого камня при воздействии на него лазерных импульсов необходимо знать зависимость изменения массы камня от параметров лазерного излучения [2]. На настоящее время в отечественных и зарубежных литературных источниках, за исключением [1], практически отсутствуют сведения об интенсивности изменения массы мочевых камней при проведении контактной гольмиевой литотрипсии. Однако в статье [1] приведены данные об удельном расходе массы камней при дроблении лазерными импульсами *in vitro*, полученными без учета места локализации конкрементов и пола пациентов.

Целью работы является получение статистических параметров величины интенсивности потери массы мочевых конкрементов *in vivo*, локализованных в различных сегментах мочевыделительной системы (МВС) человека и с учетом пола больного при проведении трансуретральной контактной лазерной литотрипсии гольмиевым литотриптером.

2. Объекты исследований и методика эксперимента

Объектами исследований являлись искусственные мочевые камни, выполненные из стоматологического сверхпрочного гипса типа VegoStone с рентгенологической плотностью 2534 и 1400 единиц Хаунсфилда (HU), а также мочевые камни, локализованные в различных частях левого и правого мочеточников и чашечно-лоханочной системы (ЧЛС) человека. Масса конкрементов, находящихся в организме человека (*in vivo*), определялась косвенным образом на основе измеренных с помощью компьютерной томографии (КТ) объема и рентгенологической плотности. Масса камней, подвергавшихся дроблению, варьировалась от 0,0375 г до 4,98 г, а средняя рентгенологическая плотность камней находилась в диапазоне от 390 до

2400 HU. Доступ к конкрементам *in vivo* осуществлялся трансуретральным способом с помощью полуригидного или гибкого уретероскопов. Разрушение искусственных образцов выполнялось в лабораторных условиях (*in vitro*) гольмиевым лазером (Ho:YAG) типа Auriga (Германия) [1], а дробление мочевого камня — *in vivo* гольмиевым лазером отечественного производства типа Triple. Фрагментация камней *in vivo* производилась импульсами длительностью 500 мкс с энергией от 0,6 до 1,8 Дж и частотой от 8 до 12 Гц. Передача лазерных импульсов от излучателя до камня осуществлялась по оптическим волокнам диаметром от 270 до 600 мкм. Наблюдение за процессом дробления происходило посредством эндовидеокамеры типа ENDOCAM® Performance HD с выводом изображения на хирургический монитор и одновременной записью процесса литотрипсии на электронный носитель. В процессе дробления камня *in vivo* фиксировались возраст и пол больного, место локализации камня, фамилия хирурга, а также энергия и частота лазерных импульсов, диаметр оптического волокна. Дробление выполнялось до полной фрагментации камня. При этом фиксировалось число импульсов лазера, затраченных на фрагментацию камня. Образовавшиеся осколки транспортировались в мочевой пузырь с помощью урологической корзинки. Для обработки экспериментальных данных использовался программный пакет «Анализ данных» системы Excel.

3. Оценка удельной величины потери массы при воздействии лазерных импульсов

Среднее значение массы мочевого конкремента, локализованного в МВС пациента, вычислялась на основе объема и рентгенологической плотности камня, определенных с помощью обработки данных КТ программой отечественной разработки Inobitec DICOM Viewer Professional, по формуле [5]:

$$m = (1,539 + 0,000485 HU) V,$$

где V — объем конкремента в см^3 ; HU — средняя рентгенологическая плотность конкремента, измеренная в единицах Хаунсфилда.

Действительное значение массы конкремента является случайной величиной, характер которой определяется погрешностями определения объема и рентгенологической плотности камня. Время разрушения камня при контактной лазерной литотрипсии зависит не только от массы камня, но и от суммарной энергии импульсов лазера $E_{\text{сум}}$, затраченной на полную фрагментацию камня. Поэтому для учета энергетических затрат на фрагментацию конкремента предлагается ввести относительную единицу из-

мерения γ — коэффициент удельной величины потери массы камня на 1 джоуль затраченной энергии, определяемый отношением начальной массы камня m к суммарной энергии импульсов $E_{\text{сум}}$, затраченной на полную его фрагментацию:

$$\gamma = m / E_{\text{сум}} \text{ [мг/Дж]}. \quad (1)$$

Значение коэффициента γ , рассчитываемого по формуле (1), является случайной величиной. Это связано как с погрешностью определения объема и рентгенологической плотности конкрементов при КТ, так и с погрешностью измерения суммарной энергии лазерных импульсов, затраченной на полную фрагментацию камней. Для исследования статистических характеристик коэффициента удельной величины потери массы вначале выполнялась проверка его распределения на нормальность. Были рассчитаны для выборки данных коэффициента удельной потери массы γ его среднее значения, медиана и мода распределения, а также ряд других показателей. Расчет выполнялся в системе Excel с использованием функции «Описательная статистика». Результаты расчетов экспериментальных данных, измеренных при проведении трансуретральной контактной лазерной литотрипсии конкрементов, расположенных в различных сегментах мочеточников и чашечно-лоханочной системы почек мужчин и женщин приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические данные коэффициента удельной величины потери массы камня на 1 джоуль затраченной энергии.

Table 1. Statistical data of the coefficient of the specific value of the stone mass loss per 1 joule of energy expended

	А	В
1	Столбец1	
2		
3	Среднее	0,398681416
4	Стандартная ошибка	0,008403278
5	Медиана	0,397
6	Мода	0,388
7	Стандартное отклонение	0,089328074
8	Дисперсия выборки	0,007979505
9	Экссесс	0,164851954
10	Асимметричность	0,032292577
11	Интервал	0,443
12	Минимум	0,155
13	Максимум	0,598
14	Сумма	45,051
15	Счет	113

Как видно из приведенных данных расчета, среднее значение, медиана и мода распределения отличаются между собой на величину менее одного процента (примерно 0,75 %). Экссесс и асимметричность близки к нулю. Из этого следует вывод, что можно предполагать, что выборочные данные коэффициента γ подчиняются нормальному закону распределения.

Средние значения и другие параметры распределений коэффициента γ при дроблении конкрементов в мочеточниках и ЧЛС несколько различаются между собой, однако, как показали статистические расчеты, различия среднего значения, медианы и моды для каждого из этих распределений остаются несущественными.

На основе экспериментальных данных установлено, что величина γ распределена по нормальному закону, а среднее значение удельной величины потери массы камня на единицу затраченной энергии при фрагментации *in vivo* гольмиевым лазером искусственных камней составило:

$0,383 \pm 0,087$ мг/Дж — при локализации камня в чашечно-лоханочной системе почек;

$0,429 \pm 0,014$ мг/Дж — при локализации камня различных сегментах мочеточников.

При этом выявлено, что средняя величина γ при дроблении камней в мочеточниках у мужчин и у женщин заметно различаются: ($0,406 \pm 0,069$ у мужчин и $0,487 \pm 0,083$ у женщин), что объясняется анатомическими особенностями строения нижних отделов МВС у различных полов (более длинная мужская уретра, наличие простаты обуславливают меньшую подвижность и свободу манипуляций уретерореноскопом). Среднее значение γ при дроблении камней в чашечно-лоханочной системе не зависит от пола больного и составляет $0,382 \pm 0,087$ мг/Дж.

Расчет удельной величины потери массы конкремента, выполненный на основе результатов экспериментальных исследований *in vitro*, приведенных в [1], показал, эта величина сопоставима с данными, полученными авторами данной статьи. Так, при дроблении искусственных мочевых камней в лабораторных условиях величина γ оказалась равной $0,442 \pm 0,083$ мг/Дж. Более высокое значение γ объясняется тем, что дробление проходило в лабораторных, практически идеальных условиях.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что, несмотря на то, что величина γ также является случайной величиной, среднее значение этого параметра может служить оценкой удельной величины потери массы конкремента при лазерной контактной фрагментации кам-

ней, локализованных в различных сегментах мочевыделительной системы человека.

Величина удельной потери массы конкрементов является базовой при прогнозировании времени собственно дробления. Ожидаемое время «чистого» дробления камня, при заданных энергии и частоте импульсов гольмиевого литотриптера, можно вычислить на основе формулы [5]

$$T_p = m / (\gamma_i \times F_i \times E_i),$$

где m — масса камня в миллиграммах; E_i — значение энергии импульса в джоулях (Дж), F_i — частота следования импульсов лазера с E_i энергией в герцах (Гц); γ — удельная величина потери массы камня на единицу энергии при заданной области локализации конкремента и пола больного.

4. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований в реальных условиях показано, что для оценки длительности дробления целесообразно использовать предложенный авторами параметр удельной скорости потери массы камня, представляющий собой отношение общей массы камня к суммарной энергии лазерного излучения, затраченной на его полное разрушение.

Полученные экспериментальные значения величины удельной потери массы мочевых конкрементов при контактной лазерной литотрипсии позволяют на основании результатов предоперационного обследования пациентов и устанавливаемых параметров излучения лазерного литотриптера оценить время собственно дробления камня, так и операции литотрипсии в целом.

Список литературы

1. Мартов А. Г., Диамант В. М., Борисик А. В. и др. Сравнительное исследование эффективности электроимпульсного и лазерного литотриптеров in vitro // Урология. 2013. №2. С.61—70.
2. Chernega V, Tlukhovskaya-Stepanenko N., Eremenko A. The prediction of urinary calculi fragmentation duration under the holmium laser pulses // ITM Web of Conferences. 2019. Т. 30, 13002. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_13002.pdf (дата обращения: 12.11.2020).
3. Song Fan, Binbin Gong, Zongyao Hao et al. Risk factors of infectious complications following flexible ureteroscopy with a holmium laser : a retrospective study // Int J. Clin. Exp. Med. 2015, vol. 8(7), pp. 11252–11259.

4. Мочекаменная болезнь / Tiselius H-G., Alken P., Buck C. и др. Перевод с англ. Научн. ред. А. Г. Мартов. Европейская ассоциация урологов. EAU 2010. 106 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/34954305-Mochekamennaya-bolezn-h-g-tiselius-p-alken-c-buck-m-gallucci-c-seitz-m-straub-o-traxer.html> (дата обращения: 12.11.2020).
5. Чернега В. С., Тлуховская-Степаненко Н. П., Еременко А. Н., Еременко С. Н. Оценка скорости фрагментации мочевого камня при контактной литотрипсии гольмиевым лазером // Урология. 2018. № 5. С. 37—40.

Информация об авторах

Чернега Виктор Степанович, к. т. н., доц., доцент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Еременко Алексей Николаевич, врач-уролог, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки, г. Симферополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-5318-6561.

Information about the authors

Viktor S. Chernega, Associate Professor on Department of Information Systems. Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Alexey N. Eremenko, urologist, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, St. Luke's Clinical Medical Multidisciplinary Center, Simferopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-5318-6561.

УДК 681.513.8

Вейвлет-анализ структур биосистем человека¹

Алдонин Г. М., Черепанов В. В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
ул. Киренского, 28, Красноярск, 660041, Российская Федерация
GAlodonin@sfu-kras.ru

Получено: 1 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 12 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 16 декабря 2020 г.

Аннотация: Показано, что актуальной задачей мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы является создание эффективных алгоритмов компьютерных технологий обработки биосигналов на основе нелинейных динамических моделей. Поскольку биопроцессы имеют нелинейный характер и фрактальную структуру, рассмотрены актуальные нелинейные методы анализа состояния систем организма. Для этих развивающихся систем характерна структурная самоорганизация по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. Исследована важная связь «систем коммуникации» организма, их организация в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близком к «золотому сечению». Примеры подобных структур — нервная, мышечная системы сердца и сосудистая и бронхиальная системы организма человека. Впервые предлагается получение детальной информации о состоянии биосетей организма человека. Предсказана возможность топической диагностики на основе вейвлет-анализа биосигналов («вейвлет-интроскопии» биосетей).

Ключевые слова: электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, реограмма, самоорганизация, самоподобие, фракталы, скейлинг, автоволны, солитон, n -мерный тор, КАМ-теорема, ФПУ-теорема «возврата», вейвлет-интроскопия биосетей.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Вейвлет-анализ структур биосистем человека // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 296—307.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Алдонин, Г. М. Вейвлет-анализ структур биосистем человека / Г. М. Алдонин, В. В. Черепанов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 296—307.

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.).

Wavlet-analysis of the structures of human biosystems

G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov

Siberian Federal University,
School of Engineering Physics and Radio Electronics
28 Kirensky str., 660041 Krasnoyarsk, Russian Federation
GAldonin@sfu-kras.ru

Received: December 1, 2020

Peer-reviewed: December 12, 2020

Accepted: December 16, 2020

Abstract: *The actual task of monitoring the state the human body is the creation of effective algorithms for computer technologies for processing biosignals based on nonlinear dynamic models. The development of nonlinear methods for analyzing the state of body systems is important, since bioprocesses have a nonlinear nature and fractal structure, which, as for developing systems, are characterized by structural self-organization according to the principle of scale-invariant self-similarity. An important connection has been established between the “communication systems” of the organism, their organization in the form of self-similar fractal structures with scaling nearby to the “golden ratio”. Examples of such structures are the nervous, muscular systems of the heart and the vascular and bronchial systems of the human body. For the first time, it is proposed to obtain detailed information about the state of the bio-networks of the human body for topical diagnostics based on wavelet-analysis of biosignals (wavelet-introspecty).*

Keywords: *electrocardiogram, photoplethysmogram, rheogram, self-organization, self-similarity, fractals, scaling, autowaves, soliton, n-dimensional torus, KAM-theorem, FPU-theorem of “return”, wavelet-introspecty of bionets.*

For citation (IEEE): G. M. Aldonin et al. “Wavlet-analysis of the structures of human biosystems”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 296–307, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Инфаркт и инсульт могут быть первыми и иногда последними предупреждениями о заболевании, т. к. сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) зачастую протекают бессимптомно, а наиболее эффективный способ борьбы с заболеваниями — это своевременная диагностика и профилактика.

Уровень развития технического прогресса позволяет создавать все более совершенные средства диагностики ФСО [1, 2]. Своевременная диагностика и профилактика позволяют резко снизить риск развития ССЗ.

2. Теоретико-прикладная основа разработки методов и средств вейвлет-интроскопии биосетей

В данной работе рассматривается новый подход в исследовании физико-физиологических явлений и электрических процессов в ПНСС четырехкамерного сердца во всех звеньях. Сегодня происходит все более активное проникновение физических методов и подходов в биологию и медицину. Существующие модели имеют в основном феноменологический характер, не вполне учитывающий физико-физиологические процессы в сердце.

Поскольку деятельность биосистем организма, как самоорганизующихся систем, представляет собой нелинейные процессы, то для мониторинга состояния сердечной деятельности (СД) необходима разработка физически и физиологически адекватных нелинейных моделей СД на основе положений теории самоорганизации.

Одним из применений синергетического подхода является анализ природы электрических процессов в сердце, в частности в важнейшей биосистеме — проводящей нервной системе сердца (ПНСС). Активная среда представляется как ансамбль некоторых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Как известно, данный подход восходит к модели Н. Винера и А. Розенблута [3, 4] согласно которой активная среда состоит из совокупности сцепленных элементов, находящихся в одном из трех возможных состояний: возбуждения, рефрактерности или покоя.

Основной функцией клеток пейсмейкера является автогенерация электрического импульса. Модели возбуждения дают решения в виде автоволновых вихрей, и некоторые из моделей поддерживают распад волн в спирально-волновую турбулентность.

Природные процессы, в том числе и биосистемы, имеют циклический характер. Одними из фундаментальных положений при анализе самоорганизации систем являются механизмы кооперативного поведения ансамбля систем, понятие системы слабосвязанных нелинейных осцилляторов (ССНО).

Процесс развития автоколебаний в таких самоорганизующихся системах целесообразно представить моделью системы связанных нелинейных осцилляторов (ССНО) [10, 11] на основе теоремы Ферми — Паста — Улама (ФПУ) (1), которая объясняет образование различных мод колебаний по мере распространения возбуждения по связям между элементами структуры (рис. 1): от первоначальных самых высокочастотных колебаний элемента структуры до самых низкочастотных граничных совместных колебаний всех элементов структуры.

$$m \frac{d^2 y_n}{dt^2} = k(y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) + k\alpha[(y_{n+1} - y_n)^3 - (y_n - y_{n-1})^3], n = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (1)$$

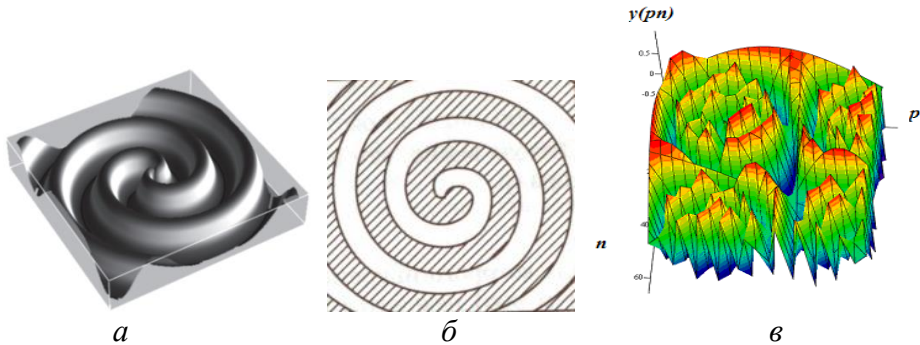


Рис. 1. Волны возбуждения в активной среде: *а* — спиральные волны модели ФитцХью — Нагумо, *б* — спиральная волна уравнения Гинзбурга — Ландау, *в* — модель ССНО на основе теоремы ФПУ и автоволновые структуры в виде спиральных волн.

Fig. 1. Excitation waves in an active medium: *a* – spiral waves of the FitzHugh–Nagumo model, *b* – spiral wave of the Ginzburg–Landau equation, *c* – CNOS model based on the FPU theorem and autowave structures in the form of spiral waves

То есть управление ритмом всех клеток синоатриального узла (САУ) в режиме автоколебания в САУ может быть достигнута лишь группой электрически связанных через межклеточную жидкость клеток пейсмекера как ССНО. Эта система колебаний представляет собой n -мерный тор (рис. 2, *а*), критерий устойчивости которого согласно теореме А. Н. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. Мозера (КАМ-теореме) [5, 6, 7, 8, 9] является иррациональное отношение соседних мод, наилучшее из которых соответствует «золотому сечению» [5, 12], а спектр колебаний в n -мерном торе имеет гармонический характер и подчиняется закону $1/f$ (2), рис. 2, *б*).

$$F = F_0(t) + \sum_{i=0}^n F_i(t), F_i(t) = 0.618 \cdot A_{i+1} \cdot e^{j(1.618\omega_{i+1}t + 0.618\varphi_{i+1})}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Теорема ФПУ определяет самоорганизацию как систему мод (рис. 2, *в*) в виде n -мерного тора, критерий устойчивости которого определяется КАМ-теоремой, то есть иррациональным соотношением мод, наилучшим из которых является «золотое сечение» (3):

$$w^* = \frac{1}{1+\frac{1}{\dots}}, \text{ или } w^* = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.6180339 \dots \quad (3)$$

Механизм распространения возбуждения в водителе ритма происходит за счет формирования солитонов в ССНО, согласно КАМ-теореме (рис. 2, *г*).

Теорема ФПУ и нелинейная модель ССНО на основе КАМ-теоремы в виде n -мерного тора объясняет, каким образом тысячи клеток пейсмеке-

ра синхронно, за счет метаболизмов на клеточном уровне размером в десятки микрон создают на мембране потенциал в десятки милливольт с цикличностью в секундном диапазоне [13]. Образуется волна возбуждения в виде солитона, периодичность которого определяется количеством осцилляторов — клеток пейсмейкера (рис. 2, *д*).

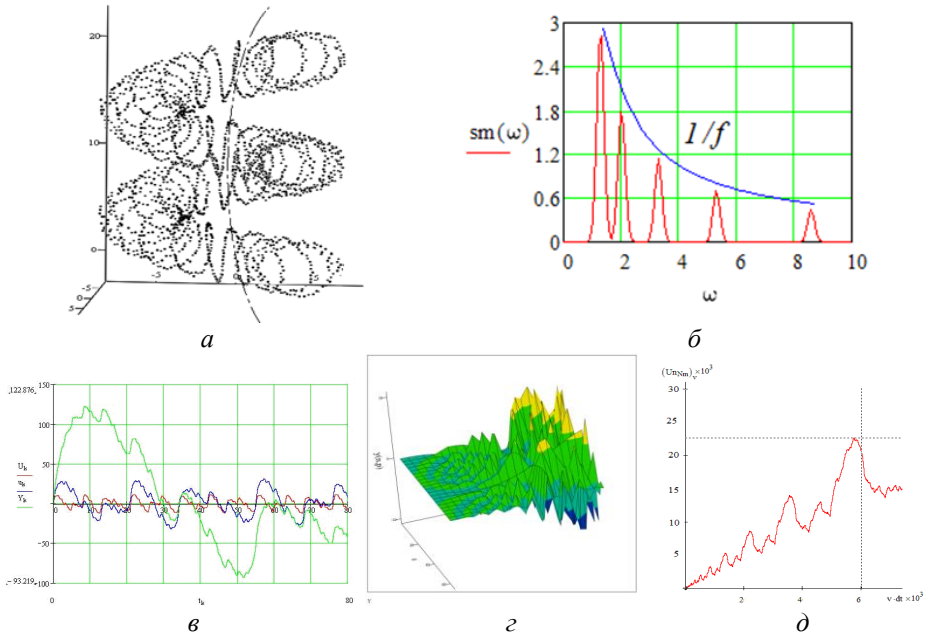


Рис. 2. Инвариантный тор — *а* и его спектр — *б*, система мод — *в*, модель *n*-мерного тора — *г*, механизм возбуждения *P*-клеток согласно модели *n*-мерного тора КАМ-теоремы — *д*.

Fig. 2. Invariant torus — *a* and its spectrum — *б*, system of modes — *в*, model of the *n*-dimensional torus — *г*, excitation mechanism of *P*-cells according to the model of the *n*-dimensional torus of the KAM theorem — *д*

3. Нелинейные модели основных биосигналов

Основные биосистемы организма человека представляют собой фрактальные структуры с масштабно-инвариантным самоподобием [14, 15]. Примеры подобных структур — проводящая нервная (рис. 3, *а*) и мышечная (рис. 3, *б*) системы сердца, сосудистая (рис. 3, *в*) и бронхиальная системы (рис. 3, *г*).

Получение детальной информации о состоянии биосистем возможно при учете нелинейного характера процессов в них, фундаментальных законов самоорганизации биопроцессов и биосистем, их самоподобной мас-

штабно-инвариантной фрактальной структуры. Учет этих факторов обеспечивает создание методики топической диагностики важнейших биосистем.

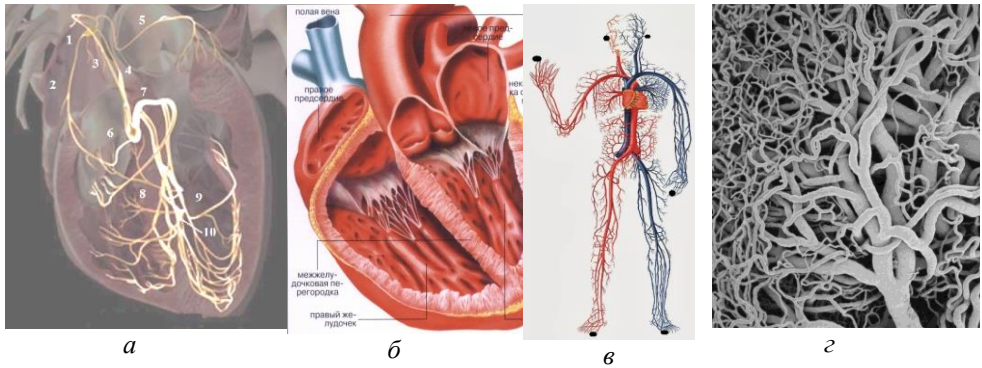


Рис. 3. Фрактальная структура биосистем: проводящей нервной сети в сердце (а), мышечной системы сердца (б), системы кровообращения человека (в) и дыхательные пути в легком (г).

Fig. 3. Fractal structure of biosystems: the conducting nervous network in the heart (а), the muscular system of the heart (б), the human circulatory system (в) and the respiratory tract in the lung (г)

Германом Гельмгольцем с учениками еще в 1850 г. установлена форма нервного импульса в ПНСС и его распространение в виде уединенной волны колоколообразной формы [16] (в современном понимании солитон) [17], подобной частице, движущаяся с постоянной скоростью в ПНСС, ветвящейся с самоподобием по закону $1/f$.

$$S_i(x, t_i) = u_i ch^{-2} \frac{x-ct_i}{\Delta}, ch \equiv \frac{e^z + e^{-z}}{2}, c = \frac{u_i}{3}, \Delta = \sqrt{\frac{12}{u_i}}, \quad (4)$$

где: u_i – амплитуда возбуждения; $i=1, \dots, n$, n — число ветвей ПНСС.

Волна возбуждения в виде солитона (4) распространяется от водителя ритма вначале в правое и затем в левое предсердие, достигая атриовентрикулярного (А-В) узла. Затем волна распространяется по межжелудочковой перегородке через пучок Гиса и проходит по правой и левой ножкам пучка Гиса и разветвляется по волокнам Пуркинье на миокарде левого и правого желудочков, вызывая их сокращение. При этом важно отметить изменение направления вектора поляризации в сегментах ПНСС (рис. 4, а, б).

Векторная кардиограмма описываемая в пространстве концом суммарного вектора электродвижущих сил (5), возникающих при деполяризации и реполяризации миокарда в процессе сердечного цикла, результирующий электрический вектор сердца быстро меняется по мере распростра-

нения импульса по миокарду. При этом важно учесть изменение направления вектора поляризации в сегментах ПНСС [12].

$$U(x, t) = S_1(t_1) + S_2(t_2) + S_3(t_3) + S_4(t_4) + S_5(t_5) + S_6(t_6) + S_7(t_7) + S_8(t_8), \quad (5)$$

где $S_i(t_i)$ — векторный солитон во время t_i , $U(x, t)$ — результирующий био-потенциал ЭКС.

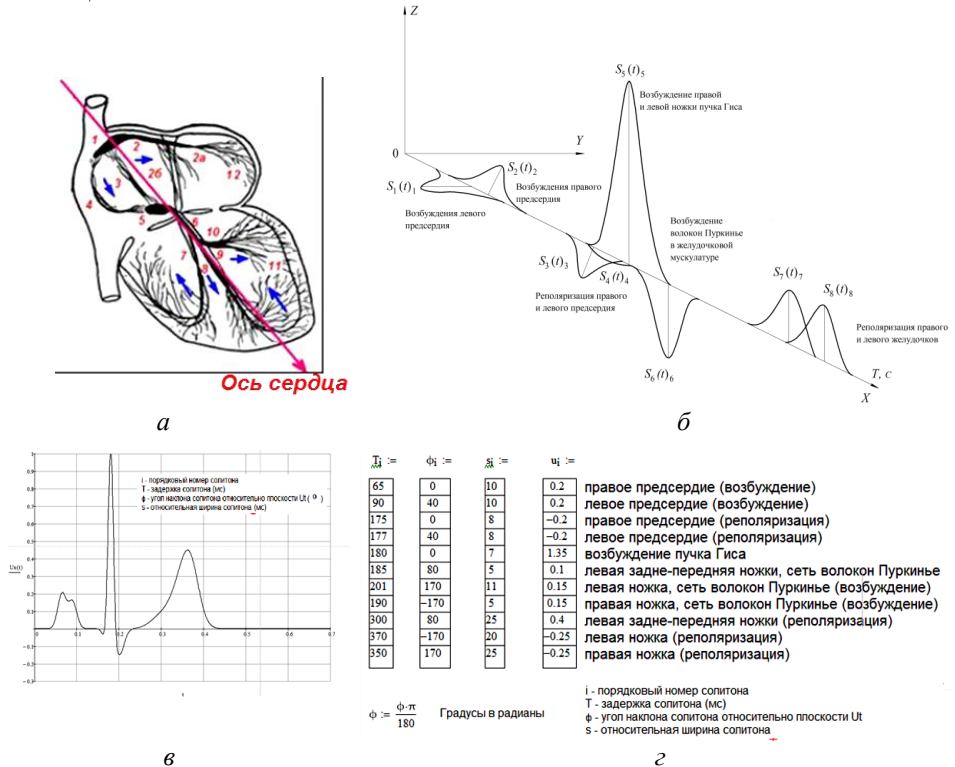


Рис. 4. Топология ПНСС — а и распространение возбуждения по сегментам ПНСС — б, Суммарный вектор электродвижущих сил — в и параметры солитонной модели ЭКС — г.

Fig. 4. Topology of CNNH — а and propagation of excitation along the segments of CNNH — б, total vector of electromotive forces — в and parameters of the soliton model of EKS — г

4. Вейвлет-интроскопия

В последнее время в кардиологии развиваются методы топической диагностики основных биосистем организма. В данной работе эта проблема рассматривается на основе положений теории самоорганизации.

Для определения структурных свойств биосигналов и биопроцессов эффективно применение вейвлет-анализа. Вейвлет-преобразование одно-

мерного сигнала заключается в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. В ходе исследования использовались различные материнские вейвлеты из которых наиболее адекватными для анализа биосигналов являются «солитон» и «мексиканская шляпа».

Вейвлет-диаграммы биосигналов отражают фрактальные масштабно-инвариантные структуры со скейлингом, близким к «золотому сечению» (рис. 5). В ренормгрупповом подходе скелетные функции вейвлет-преобразования выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги ($\bar{S}_c$) — масштабную инвариантность или их самоподобие в норме.

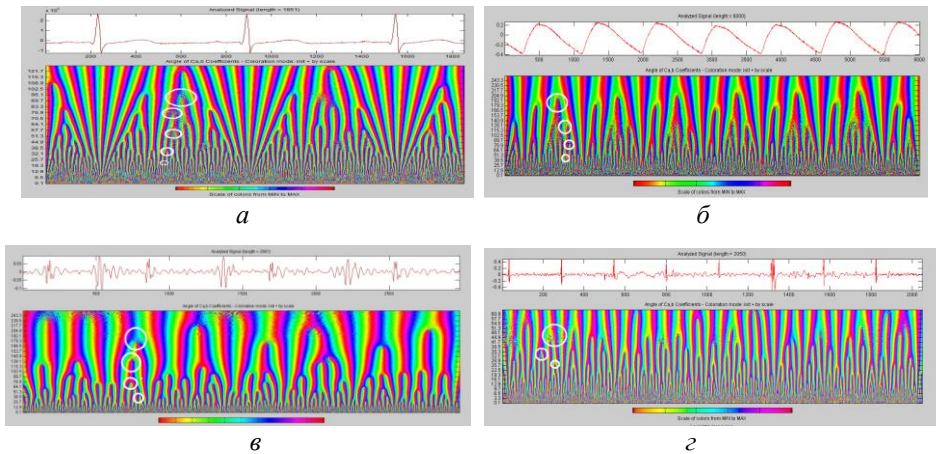


Рис. 5. Вейвлет-диаграммы биосигналов с турбулентностями в узлах ветвления:
а — электрокардиосигнал, *б* — пульсовая волна, *в* — фонокардиосигнал, *г* — шумы легких.

Fig. 5. Wavelet diagrams of biosignals with turbulence in the branching nodes:
a – electrocardiosignal, *б* – pulse wave, *в* – phonocardiosignal, *г* – lung noises

Исследована возможность топической диагностики состояния биосистем фрактальных структур биосигналов с масштабно-инвариантным самоподобием на основе вейвлет-интроскопии. Достоинством вейвлет-спектра ЭКС и ПВ является их представление в частотной и временной области, т. е. содержит пространственно-временную информацию о работе: ПНСС (рис. 5, *а*), сосудистой сети (рис. 5, *б*), мышечной системы (рис. 5, *в*) и бронхиальной системы (рис. 5, *д*), что может служить основой для топической диагностики [18].

На рис. (рис. 6, *в*, *г*) показано 2D и 3D вейвлет-преобразование *P*-волны ЭКС. Сопоставляя узлы ПНСС и сосудистой сети и соответствующую

щие по фазе и времени волны спектра вейвлет-диаграмм, можно получить латентную ЭКГ, отображающую весь процесс прохождения возбуждения от пейсмейкера в виде солитонов по всем сегментам ПНСС.

Для выявления более тонкой структуры возбуждения в ветвях ПНСС повышена частота квантования до 8 кГц, которая позволяет визуализировать ветвления ПНСС более высокого порядка. На (рис. 6, а, б) представлено 3D-вейвлет-преобразование ЭКС с частотой 8 кГц.

Структура *P*-волны наблюдается как сумма отдельных волн правого и левого предсердий и отражает истинное распространение возбуждения по миокарду правого и левого желудочков. На вейвлет-диаграммах с повышенным разрешением в *P*-волне дополнительно проявляются волны возбуждения в пучке Бахмана и нисходящем пучке к межпредсердной перегородке (к *AB*-узлу).

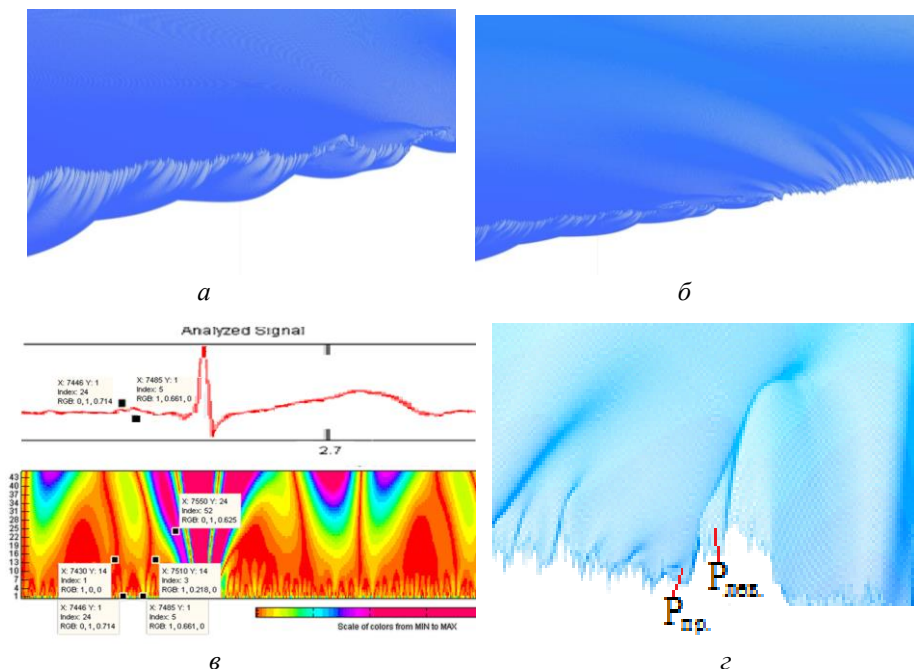


Рис. 6. Экспериментальная запись возбуждения области пейсмейкера (а) и предсердной области ПНСС (б). Выявление *P*-волны ЭКС в 2D (в) и 3D (г) вейвлет-преобразованиях.

Fig. 6. Experimental recording of excitation of the pacemaker region (a) and the atrial CNNH region (б). *P*-wave detection of ECS in 2D (в) and 3D (г) wavelet transforms

Такой же подход, как для ПНСС для топической диагностики, можно применить для вейвлет-интроскопии сосудистой системы (рис. 7, а) [19].

На рис. 7, б представлен пример вейвлет-интроскопии с помощью вейвлет-преобразования экспериментального сигнала ПВ при его прохождении по сосудам сонной артерии и выявление узлов ветвления сосудистой сети.

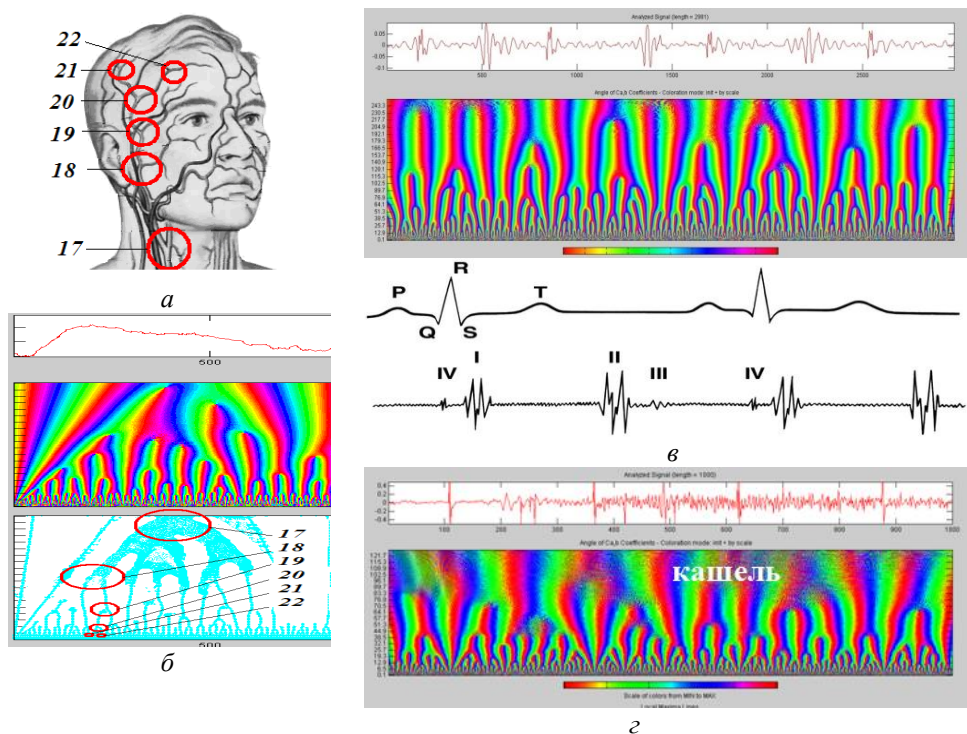


Рис. 7. Вейвлет-интроскопия: сонной артерии — а, б; фонокардиосигнала — в, и сигнала системы дыхания — з.

Fig. 7. Wavelet introscopy of the carotid artery – а, б; phonocardiogram – в and respiratory system signal – з

Аналогично такая технология вейвлет-интроскопии может применяться для анализа фонокардиосигнала (рис. 7, в) и сигнала системы дыхания (рис. 7, з).

5. Заключение

Полученные результаты динамического моделирования биопроцессов и биосистем на базе положений теории самоорганизации раскрывают феноменологию формирования в природных системах. Учет масштабно-

инвариантной фрактальной структуры биосистем с самоподобием вида $1/f$ (признак наличия в них структурных связей), дают их физически и физиологически адекватное описание, устанавливают критерии структурной устойчивости биосистем, как критерии их нормы. Это дает общую теоретико-прикладную основу разработки методов и средств структурного анализа биосигналов на основе вейвлет-интроскопии. Математические модели и программные средства вейвлет-интроскопии позволяют извлекать дополнительную информацию из биосигналов о состоянии биосистем.

Список литературы

1. Aldonin G. M. Autonomous Monitoring of the Main Set of Parameners of the Cardiovascular Sistem // Biomedical Engeneering. 2013. Vol. 46. Iss. 6. P. 232–236.
2. Soldatov A. V., Aldonin G. M., Cherepanov V. V. Hardware-Program Complex on the Basis of Recorder MCM-11 // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. No. 11 (6). P. 671–678.
3. Wiener N, Rosenblueth A. The mathematical formula tion of the problem of conduction of impulses in a network of connected excitable elements, specifically in cardiac muscle // Arch. Inst. Cardiologia de Mexico. 1946. No. 16. P. 205–265.
4. Клиническая аритмология / под ред. А. В. Ардашева. М. : ИД Медпрактика, 2009. 1220 с.
5. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике. М. : УРСС, 2001. 331 с.
6. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. М. : Мир, 1988. 240 с.
7. Колмогоров А. Н. О сохранении условно-периодических решений при малом изменении функции Гамильтона // ДАН СССР. 1954. Т. 98, № 4. С. 527—530.
8. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. М. : Наука, 1989. С. 320—335.
9. Мозер Ю. КАМ-теория и проблемы устойчивости. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 448 с.
10. Zhang H., Holden A. V., Boyett M. R. The pacemaking system of the heart : from coupled oscillanjr to nonlinear waves // Nonlinear Anal Theory Methods Appl. 1997. Vol. 30. P. 1019–1027.
11. Мазуров М. Е. Ритмогенез в синоатриальном узле сердца // Биофизика. 2006. Т. 51, № 6. С. 1092—1099.
12. Алдонин Г. М. Нелинейные динамические модели и структурный анализ проводящей системы сердца // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 46—50.
13. Алдонин Г. М., Черепанов В. В., Ярыгина О. Л. Самоорганизация в системе связанных нелинейных осцилляторов // Радиотехника. 2013. № 6. С. 50—54.
14. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 660 с.
15. Goldberger A. L., Rigney P. R., West B. J. Chaos and fractals in human physiology // Sci. Am. 1990. Vol. 262. P. 42–49.
16. Гельмгольц Г. Скорость распространения нервного возбуждения. М. : ГИЗ, 1923. 91 с.
17. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of “Solitons” in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States // Physical Review Letters. 1965. Vol. 15. P. 240–243.
18. Soldatov A. V., Aldonin G. M., Cherepanov V. V. Wavelet Analysis of Cardiac Electrical Activity Signals // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. Iss. 2. P. 120–124.
19. Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Пат. 2723763 (РФ). Способ вейвлет-интроскопии сосудистой сети кровеносного русла. Оpubл. в Б. И, 2020. № 17.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 19-37-90072.

Сведения об авторах

Алдонин Геннадий Михайлович, д. т. н., профессор Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Черепанов Василий Викторович, аспирант Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Information about the authors

Gennady M. Aldonin, Doctor of Technical Sciences, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Vasiliy V. Cherepanov, graduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.

УДК 621.385

Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М»¹

Мирющенко Н. И., Духина Н. Г., Плешанов С. А.,
Ревенко К. В., Чугунов В. В., Агапов А. Н.

АО «НПП “Исток” им. Шокина»

*ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация
miruha007@mail.ru*

Получено: 13 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 14 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 15 декабря 2020 г.

Аннотация: Проведено численное моделирование системы магнитного экранирования для атомно-лучевой трубки «Успех-4М», состоящей из 4 тонкостенных коаксиальных цилиндров, изготовленных из сплавов марки 79НМ и 81 НМА, с целью уменьшения погрешности при расчете эффективности экранирования используемой магнитной защиты с учетом всех конструктивных особенностей атомно-лучевой трубки. Изучен спектр зеемановского резонанса атомно-лучевой трубки «Успех-4М», помещенной во внешнее постоянное магнитное поле. Оценен коэффициент магнитного экранирования атомно-лучевой трубки «Успех-4М» и магнитного сдвига частоты нулевого перехода при помощи анализа сдвига частоты зеемановских резонансов.

Ключевые слова: атомно-лучевая трубка, экранирование, коэффициент экранирования, магнитное поле, магнитная защита, многослойный экран, магнитный сдвиг частоты, компьютерное моделирование.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мирющенко Н. И., Духина Н. Г., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В., Агапов А. Н. Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М» // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 308—324.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Мирющенко, Н. И. Эффективность магнитной защиты бортовой цезиевой атомно-лучевой трубки «Успех-4М» / Н. И. Мирющенко, Н. Г. Духина, С. А. Плешанов, К. В. Ревенко, В. В. Чугунов, А. Н. Агапов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 308—324.

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.).

Effectiveness of a magnetic protection on-board cesium atomic beam tube “Uspeh-4M”

N. I. Miryushchenko, N. G. Dukhina, S. A. Pleshanov,
K. V. Revenko, V. V. Chugunov, and A. N. Agapov

JSC RPC “Istok” n. a. Shokin
2a, Vokzalnaya str, Fryazino, Moscow Region, 141190, Russian Federation
miruha007@mail.ru

Received: December 13, 2020
Peer-reviewed: December 14, 2020
Accepted: December 15, 2020

Abstract: A numerical simulation of a magnetic shielding system for an atomic beam tube “Uspeh-4M”, consisting of 4 thin-walled coaxial cylinders made of 79NM and 81NMA alloys, was carried out in order to reduce the error in calculating the shielding efficiency of the used magnetic shielding, taking into account all the design features of atomic beam tube “Uspeh-4M”. The spectra of Zeeman resonance of atomic beam tube “Uspeh-4M”, placed in external constant magnetic field were studied. The analysis of the frequency shift of the Zeeman resonances made it possible to estimate the coefficient of atomic beam tube “Uspeh-4M” magnetic screening and magnetic shift of the zero transition frequency.

Keywords: atomic beam tube, screening, screening coefficient, magnetic field, magnetic screen, multilayer screen, magnetic frequency shift, computer modeling.

For citation (IEEE): N. I. Miryushchenko et al. “The effectiveness of a magnetic protection on-board cesium atomic-beam tube Uspeh-4M”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 308–324, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Атомно-лучевые трубки (АЛТ) служат в качестве квантовых дискриминаторов частоты, использование которых позволяет обеспечить генерацию чрезвычайно точных сигналов частоты бортовых синхронизирующих устройств [1].

Цезиевые АЛТ с магнитной селекцией являются ключевыми элементами Российской глобальной навигационной спутниковой системы (Глонасс), обеспечивающими непревзойденную точность определения координат. Глобальность системы обеспечивается функционированием на орбитах набора видимых из любой точки Земли спутников, непрерывно передающих высокоточные измерительные сигналы.

В России лидером по производству высококачественных атомно-лучевых трубок на пучке атомов цезия является НПП «Исток» им. Шокина, где начиная с 1965 года разрабатываются и исследуются цезиевые атомно-лучевые трубки [2]. Разработка АЛТ на пучке атомов цезия в НПП «Исток» им. Шокина была обусловлена острой необходимостью в квантовых стандартах частоты для применения в Государственной службе времени, координации работы систем противовоздушной и противоракетной обороны, радионавигации, радиоастрономии, геодезии, фундаментальных научных исследованиях и т. д. Значительных результатов удалось добиться в последние 10 лет.

Цезиевые атомно-лучевые трубки с магнитной селекцией атомных состояний, которые выпускаются на НПП «Исток» им. Шокина, получили широкое распространение как в наземной, так и в бортовой аппаратуре. На сегодняшний день цезиевые АЛТ являются ключевыми элементами, определяющими точностные характеристики российской системы ГЛОНАСС, и обеспечивают длительное поддержание частоты или времени с относительной точностью на уровне $5,0 \cdot 10^{-14}$ — $1,0 \cdot 10^{-14}$.

25 октября 2020 года ракетой-носителем «Союз-2.1Б» был успешно выведен на орбиту новейший навигационный спутник «Глонасс-К1 № 15Л», на борту которого размещена цезиевая АЛТ «Успех-4М». Запуск на орбиту аппарата данной серии состоялся впервые еще в 2014 году. Таким образом, он стал третьим по счету космическим аппаратом (КА) «Глонасс-К» в составе российской навигационной группировки; первый был запущен в 2011 году, второй — в 2014 г. Сейчас на орбите находятся уже 28 рабочих аппаратов: 25 спутников серии «Глонасс-М» и 3 спутника серии «Глонасс-К». Самый старый спутник серии «Глонасс-М», на борту которого размещена цезиевая АЛТ «Успех-3АМ», работает в навигационной группировке с 2006 года. Гарантия на АЛТ «Успех-3АМ» составляет 7 лет, т. е. она уже проработала в 2 раза дольше, чем в нее изначально закладывали разработчики.

Следующими на очереди являются навигационные аппараты «Глонасс-М» № 61 и «Глонасс-К» № 16Л, которые ориентировочно должны запущены с космодрома «Плесецк» в скором будущем. КА «Глонасс-М» № 61 является последним оставшимся в наличии аппаратом в серии «Глонасс-М». После его запуска выходящие из строя КА «Глонасс-М» будут плавно проведены на серию «Глонасс-К», на борту которых будет расположена АЛТ «Успех-4М».

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию эффективности магнитной защиты бортовых цезиевых

АЛТ «Успех-4М» от влияния внешних магнитных полей. Рассмотрено влияние остаточного внешнего магнитного поля на частотные параметры АЛТ, в частности, на смещение вершины зеемановского резонанса.

В данной работе для более точного расчета эффективности экранирования цезиевых АЛТ «Успех-4М» использованы численные методы решения уравнений, так как аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с тем, что функциональные узлы АЛТ «Успех-4М» имеют сложную асимметричную конфигурацию, и они практически не поддаются точному аналитическому расчету.

Построена 3d-модель с учетом конструктивных особенностей магнитомягких материалов АЛТ «Успех-4М» и исследовано влияние конструктивно-технологических особенностей изготовления системы многослойных магнитных экранов на величину напряженности остаточного магнитного поля в области дрейфа атомного потока в АЛТ «Успех-4М» с целью оценки эффективности экранирования применяемой магнитной защиты.

Получены спектры зеемановских резонансов прецизионных бортовых АЛТ «Успех-4М», которые были получены с помощью катушек Гельмгольца и радиоэлектронного блока для исследования выходных электрических характеристик цезиевых АЛТ. По полученным данным можно провести оценку эффективности экранирования АЛТ «Успех-4М» и магнитного сдвига частоты нулевого перехода.

2. Принцип работы цезиевой АЛТ с магнитной селекцией

Известно, что наиболее высокую долговременную стабильность при высокой точности номинального значения частоты генерируемых колебаний обеспечивают квантовые стандарты частоты на АЛТ. Цезиевые атомно-лучевые трубки занимают особое место, поскольку эталон времени базируется на микроволновом переходе в атоме Cs.

Атомно-лучевая трубка на пучке атомов Cs^{133} относится к классу пучковых квантовых устройств. Функциональные узлы классической цезиевой АЛТ «Успех-4М» показаны на рисунке 1. АЛТ «Успех-4М» является прибором с магнитной селекцией атомов цезия и разрабатывается с целью применения в аппаратуре бортового синхронизирующего устройства (БСУ) КА «Глонасс-К».

В отличие от движения атомов или молекул, образующих газ, в атомных или молекулярных пучках частицы движутся в одном направлении. Для получения атомных пучков необходим хороший вакуум: присутствие газа дает рассеяние пучка. Поэтому в цезиевых АЛТ используется магнит-

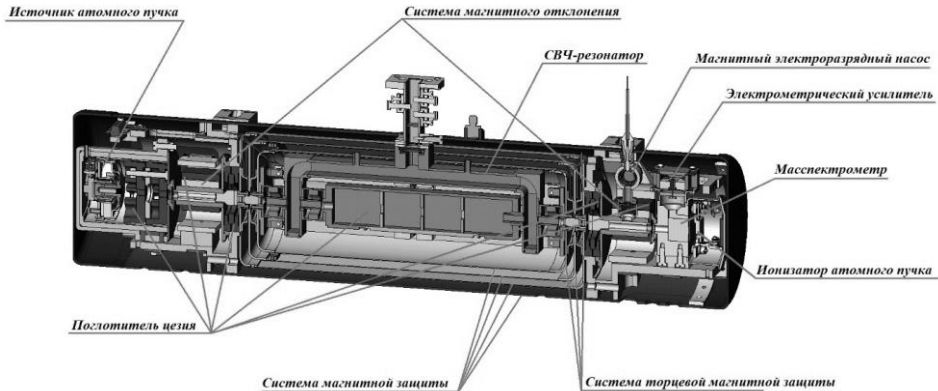


Рис. 1. Функциональные узлы цезиевой АЛТ.

Fig. 1. Functional units of cesium ABT

ный электроразрядный насос, который поддерживает в пролетном пространстве АЛТ высокий вакуум. Для поддержания высокого вакуума внутри АЛТ также применяются система газопоглотителей, которая размещается на всем протяжении пролетного пространства атомного пучка.

Принцип работы АЛТ «Успех-4М» заключается в следующем. Несколько грамм изотопа цезия размещаются в источнике АЛТ. При разогреве источника до температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нем образуются пары цезия, которые формируют поток атомов цезия с тепловым распределением скоростей, которые покидают источник через систему коллиматоров. В исходном состоянии атомы цезия равномерно распределены по всем магнитным состояниям ($F = 3$ и $F = 4$) нижнего энергетического уровня $6^2S_{1/2}$. Траектория движения пучка атомов цезия показана на рисунке 2 (а). Если исключить попадания пучка на стенки трубки, приводящие к отражению или рассеянию пучка, частицы в пучке движутся прямолинейно и равномерно. Благодаря значительной скорости атомов влиянием поля земного тяготения можно пренебречь, считая движение частиц тепловым движением.

Пучок попадает в первый магнит, производящий сильное неоднородное магнитное поле ($\approx 50000\text{ Э/см}$). Атомы цезия обладают магнитным дипольным моментом, поэтому испытывают действие поперечной силы, направление которой зависит от того, на каком энергетическом уровне ($F = 3$ или $F = 4$) находится атом. Под действием этой силы атомы отклоняются в направлении СВЧ-резонатора (эффект Штерна — Герлаха). Отклонение составляет примерно 1° . Остальные атомы направляются в систему газопоглотителей. Благодаря изменению угла наклона источника атомного пучка φ можно выбирать нужный энергетический уровень атомов для работы и их скорость.

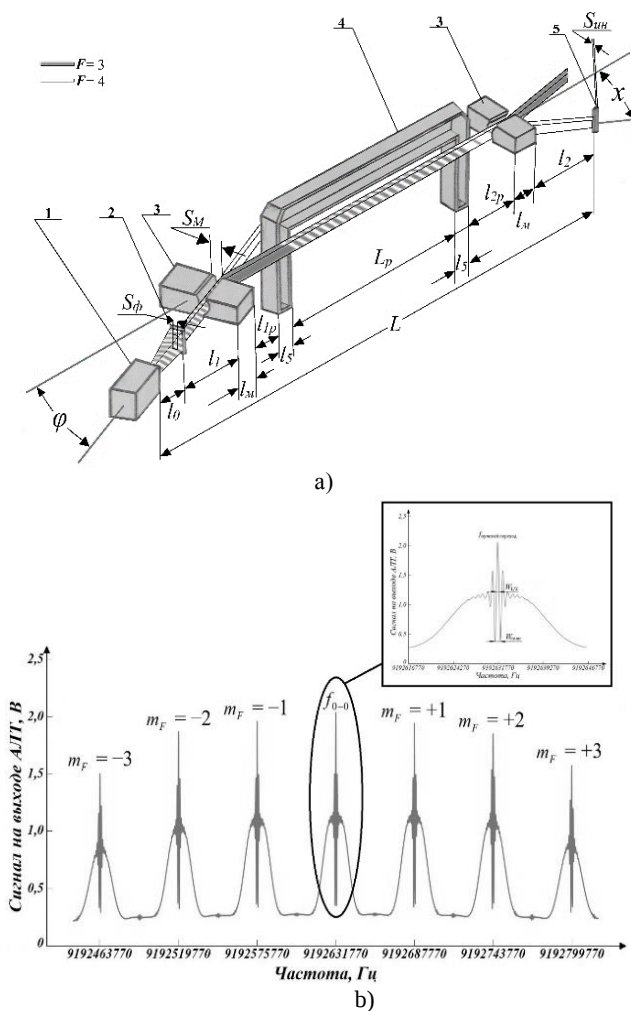


Рис. 2. Принцип работы АЛТ с магнитной селекцией.

а) 1 — источник атомного пучка; 2 — диафрагма; 3 — система магнитной селекции; 4 — резонатор; 5 — ионизатор. L — 410; l_0 — 4; l_1 — 4; l_M — 30; l_{1p} — 55,2; l_5 — 13; L_p — 174,6; l_{2p} — 55,2; l_2 — 31; S_ϕ — 1,6; S_M — 12; $S_{ин}$ — 1,1; ϕ и χ — подбираются индивидуально для каждой АЛТ при настройке. Все размеры указаны в мм;
б) Зеемановские резонансы.

Fig. 2. The principle of operation of ABT with magnetic selection. а — 1 — atomic beam source; 2 — diaphragm; 3 — magnetic selection system; 4 — resonator; 5 — ionizer. L — 410; l_0 — 4; l_1 — 4; l_M — 30; l_{1p} — 55,2; l_5 — 13; L_p — 174,6; l_{2p} — 55,2; l_2 — 31; S_ϕ — 1,6; S_M — 12; $S_{ин}$ — 1,1; ϕ and χ — is selected individually for each ABT when setting up. All dimensions are in mm;
б) Zeeman resonances

Пучок атомов затем пересекает сверхвысокочастотную область взаимодействия, которая включает в себя СВЧ-резонатор Рамзея. Атомы последовательно подвергаются действию двух магнитных полей на сверхвысоких частотах (СВЧ), осциллирующих на частоте 9 192 631 770 Гц, и разделенных областью с отсутствующей осцилляцией. Данный способ соответствует возбуждению по схеме Рамзея. В результате атомы цезия меняют сверхтонкий подуровень и переходят с одного энергетического подуровня на противоположный ($F = 3 \leftrightarrow F = 4$).

Вся область взаимодействия атома цезия с СВЧ полем имеет магнитные экраны для того, чтобы защитить ее от внешних магнитных полей и их изменений. Внутри системы магнитных экранов создается однородное и стабильное магнитное поле порядка 80 мЭ.

Под воздействием на атомы цезия магнитного поля происходит расщепление его энергетических уровней (эффект Зеемана). Расщепление уровней приводит к расщеплению спектральных линий на $2F+1$ равноотстоящих подуровней, причем величина расщепления зависит от множителя Ланде. До наложения поля состояния, отличающиеся значениями квантового числа m_F , обладали одинаковой энергией, т. е. наблюдалось вырождение по квантовому числу m_F . Магнитное поле снимает вырождение по m_F . Спектр семи зеемановских резонансов показан на рисунке 2(b). Расщепление необходимо во избежание искажений из-за расщепления переменным полем.

По оси атомного пучка на концах каждого плеча U-образного резонатора установлены запредельные волноводы для предотвращения проникновения электромагнитного излучения через отверстия в резонаторе, чтобы не создавалась бегущая волна, параллельная атомному пучку.

После прохождения СВЧ-резонатора атомы попадают в область второго магнита, который отклоняет атомы, совершившие сверхтонкий переход в направлении детектора на поверхностной ионизации. Благодаря изменению угла наклона индикатора χ можно выбирать нужный энергетический уровень атомов для работы и их скорость.

Вольфрамовая лента ионизатора нагревается до высоких температур, чтобы предотвратить образование поверхностных слоев из-за поглощенных газов. Поскольку работы выхода у атома цезия 1,7 эВ, а у вольфрама 4,5 эВ, то атом цезия легко ионизируется на раскаленной ленте, отдавая внешний электрон.

Ионный поток с ленты ионизатора притягивается в область масс-спектрометра при помощи фокусирующего электрода, где ионный поток фильтруется для того, чтобы исключить нежелательные ионы, которые

образуются вблизи ионизатора. Отфильтрованные ионы цезия далее попадают в область электрометрического усилителя, где усиливается сигнал.

Полученное таким образом напряжение составляет выходной сигнал цезиевой АЛТ. Он пропорционален вероятности того, что атомы совершили переход $F = 3, m_F = 0 \leftrightarrow F = 4, m_F = 0$.

3. Влияние нестабильности магнитного поля на частотные параметры АЛТ

Одним из важнейших требований, предъявляемых к цезиевым АЛТ, является снижение магнитного сдвига частоты рабочего перехода атома цезия, возникающего под воздействием внешних магнитных полей [3]. Для этого необходимо, чтобы в области взаимодействия атомного пучка с СВЧ полем в резонаторе, установленном внутри системы магнитных экранов, обеспечивалась глубокая степень экранировки с коэффициентом экранирования не менее 10^5 . Как правило, источниками возмущающих внешних магнитных полей являются постоянно действующее магнитное поле Земли (около 0,5 Э) и поля рассеяния других приборов, работающих в одном блоке с АЛТ.

В АЛТ «Успех-4М» в качестве материалов экранов используются магнитомягкие сплавы с большой магнитной проницаемостью, такие как: сплав 79НМ и сплав 81НМА. Данные сплавы требуют предварительного высокотемпературного отжига. Необходимость в таком отжиге, а также конструктивные ограничения приводят к необходимости использования разборных конструкций, в которых цилиндрическая часть магнитного экрана не сварена с торцевыми частями, а соединена с ними винтами, стяжными хомутами и т. д. В таких экранах неизбежно наличие воздушных зазоров между цилиндрической и торцевыми частями, уменьшающими коэффициент экранирования, при этом наиболее существенно зазоры влияют на коэффициент экранирования.

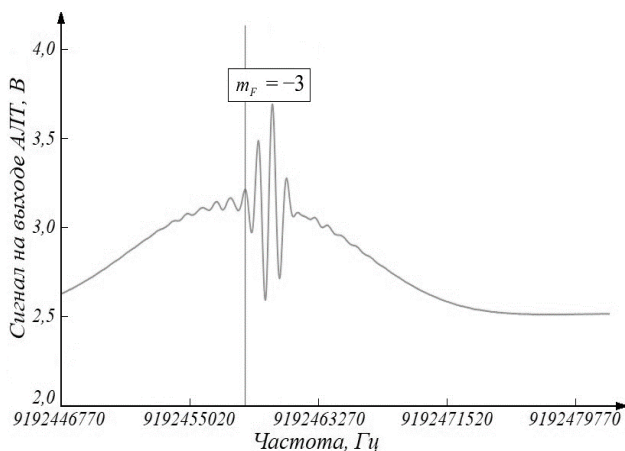
Коэффициент экранирования системы магнитных экранов рассчитывается по формуле:

$$K_э = \frac{\Delta H_{\text{внеш}}}{\Delta H_{\text{внутр}}}, \quad (1)$$

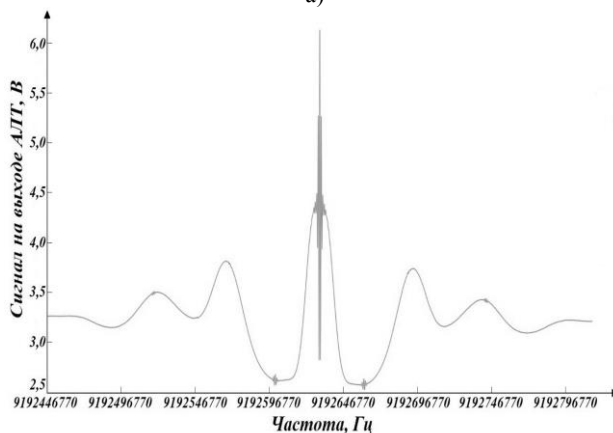
где $\Delta H_{\text{внеш}}$ — напряженность внешнего магнитного поля, $\Delta H_{\text{внутр}}$ — напряженность магнитного поля внутри системы магнитных экранов.

Принцип действия магнитного экрана состоит в том, что отражая и направляя поток магнитной энергии, создаваемый источниками поля, экран отводит его от защищаемой области пространства, не допуская в эту область.

Нарушение однородности постоянного магнитного поля, имеющие место в реальных АЛТ, приводят к разнообразным искажениям резонансной линии, как показано на рис. 3 (а). При этом нередко наблюдается существенное уменьшение интенсивности резонанса, вплоть до полного исчезновения интерференционной картины Рамзея.



а)



б)

Рис. 3. Интерференционная картина Рамзея при недостаточной магнитной защите АЛТ.
а) Смещение центрального пика 3-го зеемановского резонанса из-за недостаточной магнитной защиты; б) Искращения резонансной частоты из-за недостаточной магнитной защиты.

Fig. 3. Ramsey interference pattern with insufficient magnetic protection APT.
a – Displacement of the central peak of the third Zeeman resonance due to insufficient magnetic shielding; b – Distortion of the resonant frequency due to insufficient magnetic protection

Наличие неоднородности магнитного поля в пролетном пространстве эквивалентно в «атомной» системе отсчета действию на атом возмущения, зависящего от времени. Это возмущение может индуцировать дополнительные переходы между энергетическими уровнями атома, искажающие резонансную линию наблюдаемого перехода, как это показано на рис. 3 (б).

На рисунке 3 (а) показана резонансная линия 3-го зеемановского уровня, полученная при исследовании магнитной защиты АЛТ «Успех-3БМ». Вертикальной линией показана частота, в которой должна находиться верхний пик резонанса Рамзея, но из-за недостаточной магнитной защиты она была смещена вправо.

На рисунке 3 (б) показана интерференционная картина Рамзея, полученная при исследовании эффективности торцевой магнитной защиты АЛТ «Успех-4М». В данном случае рассматривалась АЛТ «Успех-4М» с одной парой магнитной торцевой защитой. Две другие пары были заменены на алюминиевые торцевые крышки. На полученном графике видно сильное искажение резонансной линии Рамзея из-за плохой магнитной защиты в области СВЧ-резонатора.

В случае цезиевой АЛТ рабочим переходом является переход между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния ($F = 4, m_F = 0 \leftrightarrow F = 3, m_F = 0$), который принято считать нулевым (часовым) переходом. Поскольку многоквантовые переходы маловероятны, то резонансная линия подвергается искажениям главным образом за счет переходов (рис. 2 (б)):

$$\begin{aligned}(F = 4, m_F = 0) &\leftrightarrow (F = 4, m_F = \pm 1) \\ (F = 3, m_F = 0) &\leftrightarrow (F = 3, m_F = \pm 1)\end{aligned}$$

Действительная частота нулевого («часового») перехода f в цезиевых АЛТ зависит от напряженности внешнего магнитного поля [4]:

$$f = f_{0-0} + 427,45 \cdot H_c^2, \text{ Гц} [H_c] \Leftrightarrow [\text{Э}], \quad (2)$$

где $f_{0-0} = 9\,192\,631\,770$ Гц — частота нулевого перехода для цезия, H_c — напряженность внешнего магнитного поля.

Для оценки качества систем магнитного экранирования удобнее использовать разрешенные правилами отбора зеемановские резонансы $m_F = \pm 1; \pm 2; \pm 3$ (рис. 2 (б)), которые описываются следующей формулой:

$$f = f_{0-0} + 7,00 \cdot 10^5 \cdot m_F \cdot H_c, \text{ Гц} \quad (3)$$

С помощью зеемановских резонансов можно точно вычислить коэффициент экранирования системы магнитных экранов по величине магнитного сдвига частоты.

Из формул (2) и (3) можно увидеть, что частота часового и зеemannовских переходов сильно зависят от величины магнитного поля внутри системы магнитных экранов. Поэтому при разработке бортовых АЛТ «Успех-4М» особое внимание было уделено магнитной защите для улучшения стабильности частоты.

4. Результаты компьютерного моделирования магнитной защиты АЛТ «Успех-4М»

В работе [1] установлено, что аналитический расчет коэффициента магнитного экранирования цезиевых АЛТ, состоящих из 4 тонкостенных цилиндрических экранов, дает завышенный результат, поскольку в общем случае аналитически решить задачу определения магнитного поля во внутреннем пространстве АЛТ с высокой точностью не представляется возможным. Это происходит по причине того, что функциональные узлы АЛТ имеют сложную асимметричную конфигурацию, и практически не поддаются точному аналитическому расчету. Для более точного расчета также следует учитывать все конструктивные особенности АЛТ «Успех-4М», такие как: отверстия для пролета атомного пучка, отверстия для ввода СВЧ в резонатор, катушки для создания поля подмагничивания в области резонатора, отверстия в магнитных экранах для симметрирования плеч резонатора и т. д., поэтому следует использовать численные методы решения уравнений.

При разработке промышленных АЛТ на пучке атомов цезия используются приближенные методы расчетов узлов, однако при этом решающую роль играет интуиция разработчика и экспериментальные исследования на лабораторных макетах приборов. Возможность совершенствования методики расчетов функциональных узлов цезиевых АЛТ существует благодаря развитию методов компьютерного моделирования магнитных систем и систем формирования потоков заряженных частиц на основе трехмерных математических моделей, хорошо апробированных в области проектирования магнитных и электронно-оптических систем ЭВП СВЧ.

На рисунке 4а показан общий вид моделируемой магнитной системы АЛТ «Успех-4М» с многослойным экраном, отклоняющими постоянными магнитами и соленоидами в виде круглых катушек и прямоугольных рамок с постоянным током. Данная 3d модель использовалась для расчетов магнитного поля внутри системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М» с помощью численных методов. Наружный экран (не показан на рисунке 4а) является одновременно корпусом АЛТ. Внутри корпуса установлены три экрана 1-3 в виде отрезков цилиндрических труб с закрытыми торцами

6-8 (торцевой магнитной защитой). Все экраны разделены между собой узкими коаксиальными и торцевыми зазорами. Цилиндрические экраны 1-3 с торцами 6-8 выполнены из сплава марки 81НМА, наружный экран АЛТ – из сплава марки 79НМ.

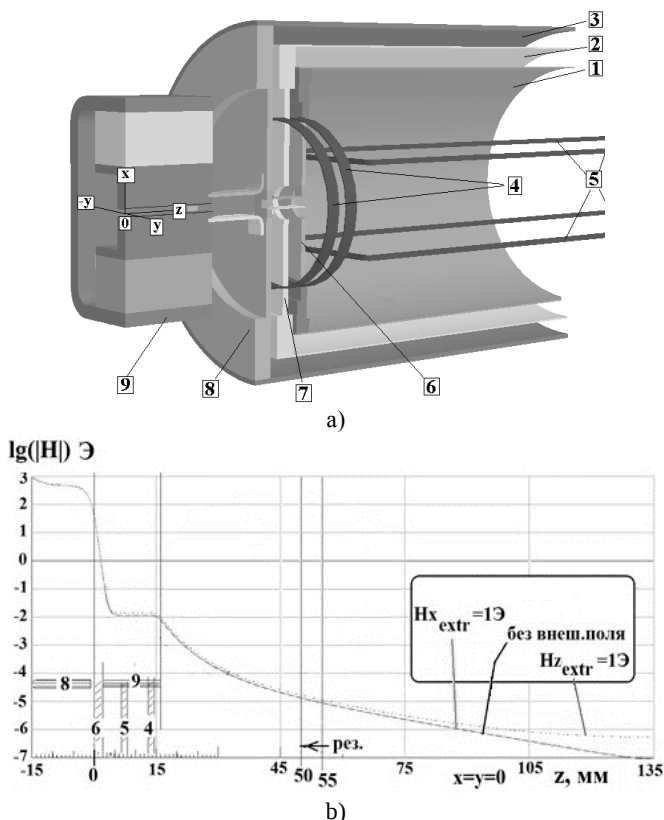


Рис. 4. Компьютерное моделирование системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М».

- а) Общий вид 3d модели системы магнитной защиты АЛТ «Успех-4М»;
б) Влияние внешних полей $H_{z\text{extr}} = 1$ Э и $H_{x\text{extr}} = 1$ Э в системе многослойных магнитных экранов с наружным экраном и без него.

Fig. 4. Computer simulation of the magnetic protection system ABT "Uspeh-4M".

- а – General view of the 3d model of the magnetic protection system ABT "Uspeh-4M";
б – Influence of external fields $H_{z\text{extr}} = 1$ Oe and $H_{x\text{extr}} = 1$ Oe in a system of multiplayer magnetic shields with and without an external shield

Для прохождения ленточного атомного пучка в центре дисков экранов имеются отверстия: круглые диаметром 10 мм — в 6-м и 7-м дисках, щелевидное размером 2,5 на 7 мм — в 8-м диске.

С внешней стороны торцевой магнитной защиты установлены магнитные системы на постоянных магнитах 9, предназначенная для селекции атомов цезия по их энергетическим состояниям. Между торцами находятся соленоиды 4. Внутри первого экрана установлены рамки 5 в виде прямоугольных каркасов с натянутыми на них проводами.

Ярмо магнита и внешние пластины выполнены из стали «армко», экраны с торцами и внутренние пластины — из сплава марки 81НМА, наружный экран — из сплава марки 79НМ. В расчетах использовались справочные характеристики магнитомягких материалов: стали «армко» и пермаллоя. Постоянные магниты — сплав SmCo25.

Расчет эффективности системы магнитных экранов проводился с учетом воздействия внешнего однородного магнитного поля напряженностью 1 Э, ориентированного в двух направлениях — вдоль оси X и Z системы магнитных экранов. Для снижения трудоемкости и повышения точности расчетов на всех плоскостях симметрии, присущих проектируемого варианту конструкции экранов, задавались соответствующие или тангенциальные граничные условия для решения полевых задач.

Результаты сравнительного анализа экранирующих свойств системы экранов АЛТ «Успех-4М» показаны на рисунке 4б.

Анализируя полученный график, можно увидеть, что напряженность поля внутри системы магнитных экранов цезиевой АЛТ при воздействии внешнего однородного поля $H_{x_{\text{extr}}} = 1$ Э соответствует коэффициенту экранирования, равному 11 000 000. При воздействии поля $H_{z_{\text{extr}}} = 1$ Э коэффициент экранирования равен 2 000 000.

По результатам моделирования установлено, что воздействие внешнего однородного поля $H_{x_{\text{extr}}} = 1$ Э незначительно влияет на изменение магнитного поля внутри системы магнитных экранов и приблизительно равно значению экранирования при нулевом значении внешнего магнитного поля.

Установлено, что в системе магнитных экранов АЛТ «Успех-4М» имеет место сложное распределение магнитного поля вдоль оси пролета атомного пучка (ось Z).

В связи с этим можно сделать вывод, что коэффициент экранирования системы магнитных экранов АЛТ «Успех-4М» составляет 1 000 000 — 10 000 000 в зависимости от направления внешнего однородного магнитного поля.

Следует отметить, что справочные значения начальной и максимальной проницаемости материалов, которые применялись при данном методе расчета, получаются путем обработки кривых намагничивания, когда каждая точка кривой намагничивания достигается многократным переключением направления намагничивающего поля заданной напря-

женности. В реальных условиях эксплуатации магнитного экрана изменение намагниченности его стенок происходит, в общем случае, хаотичным образом. По этой причине реальные значения начальной и максимальной проницаемости материала экрана могут оказаться заметно ниже справочных данных.

Не следует также забывать, что намагниченность в стенке экрана изменяется от нулевого значения на полюсах Земли к максимальной на экваторе, что существенно сказывается на эффективности экранирования системы магнитной защиты.

5. Исследование сдвига частоты центральных пиков зеemanовских резонансов магнитных АЛТ «Успех-4М»

Одной из важнейших характеристик цезиевых АЛТ является магнитный сдвиг частоты (МСЧ) и коэффициент экранирования под воздействием внешних магнитных полей заданной величины и ориентации.

Величина МСЧ зависит от экранирующих свойств системы магнитной защиты АЛТ, от величины внешнего магнитного поля, а также от топографии магнитного поля, проникающего в переходную область между селектором атомных состояний и СВЧ-резонатором, в котором происходит взаимодействие атомного пучка с СВЧ полем.

Получены экспериментальные данные по сдвигу частоты центральных пиков зеemanовских резонансов прецизионных бортовых АЛТ «Успех-4М», которые были получены с использованием катушек Гельмгольца, при заданных величинах внешнего магнитного поля. Напряженность внешнего магнитного поля контролировалось по величине тока в обмотках катушек. Напряженность слабого магнитного поля внутри системы магнитных экранов исследовалось методом высокочастотных зеemanовских переходов. В исследовании применен новый высокостабильный СВЧ измерительный блок с автоматической перестройкой частоты в составе стендовой контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенной для исследования выходных параметров АЛТ [5]. Недостатком выбранного метода исследования является то, что он дает возможность определить лишь изменение средней величины напряженности внутри АЛТ, но не позволяет получать информацию о возможном изменении топографии этого поля при воздействии внешних полей.

Исследование АЛТ «Успех-4М» проводилось в положении, когда направление внешнего магнитного поля было параллельно оси прибора и перпендикулярно направлению внутреннего магнитного поля. Результаты испытания представлены на рисунке 5.

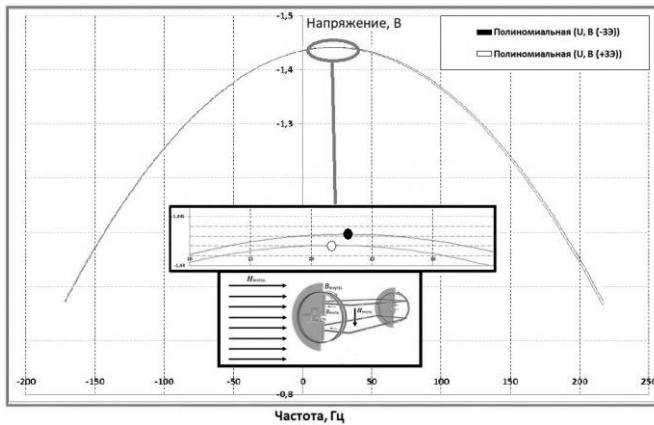


Рис. 5. Влияние внешнего магнитного поля на сдвиг частоты вершины зеемановского резонанса в АЛТ «Успех-4М».

Fig. 5. Influence of an external magnetic field on the frequency shift of the Zeeman resonance peak ABT “Uspeh-4M”

Магнитный сдвиг частоты вершины первого зеемановского резонанса $m_F = \pm 1$ составил 0,2 Гц/Э, что соответствует коэффициенту экранирования 3 500 000.

Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования очень высокие, что подтверждают обоснованность выбранной конструкции системы магнитного экранирования АЛТ «Успех-4М».

6. Заключение

Произведены численные расчеты коэффициента экранирования АЛТ «Успех-4М», которые позволили оценить максимальную эффективность экранирования в диапазоне от 11 000 000 при воздействии внешнего однородного поля $H_{x_{\text{ext}}} = 1$ Э до 2 000 000 при воздействии внешнего однородного поля $H_{z_{\text{ext}}} = 1$ Э. Полученные результаты показывают эффективность экранирования, достижимую при идеальных условиях, т. е. магнитная проницаемость экранов всегда однородна и максимальна, а также при армировании приборов не происходит деформации экранов. В производственном процессе добиться данных условий крайне сложно и поэтому в промышленных АЛТ «Успех-4М» эффективность экранирования ниже расчетных значений.

Результаты компьютерного моделирования показали, что в АЛТ «Успех-4М» необходимо усиление торцевой магнитной защиты из-за сложного распределения магнитного поля вдоль оси пролета атомного пучка.

Проведено исследование МСЧ АЛТ «Успех-4М» для выявления влияния эффективности экранирования используемой магнитной защиты на смещение частоты вершины зеемановского резонанса. Полученные данные позволяют оценить коэффициент магнитного экранирования на уровне 3 000 000 для бортовых АЛТ «Успех-4М». Полученные значения коэффициентов магнитного экранирования достаточно высокие, что говорит о правильном конструировании и технологическом исполнении систем магнитной защиты цезиевых АЛТ «Успех-4М».

Разумеется, для получения высоких значений коэффициентов экранирования всей системы необходимо использовать высококачественные материалы и добиваться тщательного соблюдения технологических режимов обработки.

Список литературы

1. Духина Н. Г., Мирющенко Н. И., Орехов А. А., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В. Системы магнитного экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 2 (545). С. 48—61.
2. Калябина И. А., Лагузов В. П., Рукман Г. И., Юхвидин Я. А. Физические принципы работы атомно-лучевого цезиевого стандарта частоты // Электроника (научно-технический сборник). 1959. № 6. С. 3—8.
3. Голеницкий И. И., Духина Н. Г., Мешков В. А., Плешанов С. А., Чугунов В. В. Анализ и оптимизация функциональных узлов цезиевых атомно-лучевых трубок методом компьютерного моделирования // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2012. Вып. 1 (512). С. 4—20.
4. Мясников Л. Л. Квантовая электроника на судах. Л. : Судостроение, 1966. 428 с.
5. Хромов А. В., Котов А. С., Ештокин В. Н., Левашов Н. И., Дюльгер В. Б., Кулачек Е. А., Захаров С. М., Плешанов С. А., Чугунов В. В. Результаты разработки радиоэлектронного блока для измерения частотных параметров атомно-лучевых трубок // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4 (519). С. 107—114.

Информация об авторах

Мирющенко Николай Игоревич, инженер-технолог 3 категории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Духина Наталья Германовна, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Плешанов Сергей Анатольевич, начальник отдела АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Ревенко Константин Викторович, начальник лаборатории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Чугунов Владимир Владимирович, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Агапов Антон Николаевич, инженер-технолог 3 категории АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Information about the authors

Nikolay I. Miryushchenko, process engineer 3 category, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Natalia G. Dukhina, lead engineer, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Sergey A. Pleshanov, head of department, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Konstantin V. Revenko, head of laboratory, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Vladimir V. Chugunov, lead engineer, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Anton N. Agapov, process engineer 3 category, JSC «RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 325–359.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 325—359.

ISSN: 2587-9936

УДК 621.37-621.39(091)

Открытие природы 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: 2 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 5 ноября 2020 г.

Принято к публикации: 9 ноября 2020 г.

Аннотация: *Исследована парадоксальная научная дискуссия о природе катодных лучей между сторонниками волнового эфира и материальных частиц. Рассмотрены эксперименты Перрена. Проанализированы оценки отношения заряда к массе частиц катодных лучей в работах Шустера, Дж. Дж. Томсона и других ученых. Представлена гипотеза Дж. Дж. Томсона о корпускулах, а также результаты его работ, которые привели к открытию электрона. Уделено внимание исследованиям Ридчардсона по электропроводности пространства, окружающего горячую поверхность металлических проволок и вывод им формулы, носящей его имя.*

Ключевые слова: *катодные лучи, эксперименты Перрена, исследования Шустера, корпускулы Дж. Дж. Томсона, термоэмиссия, формула Ридчардсона.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Открытие природы катодных лучей // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 325—359.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Открытие природы катодных лучей / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 325—359.

Discovery of the origin 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: November 2, 2020

Peer-reviewed: November 5, 2020

Accepted: November 9, 2020

Abstract: *A paradoxical scientific discussion about the origin of cathode rays between external wave ether and material particles is investigated. Perrin's experiments are considered. The estimates of the ratio of charge to mass of particles of cathode rays in the works of Schuster, J. J. Thomson and other scientists. The hypothesis of J. J. Thomson about corpuscles is presented, as well as the results of his work, which lead to the discovery of the electron. Attention is paid to Richardson's research on the electrical conductivity of the surrounding space surrounding the surface of metal wires and the derivation of the formula of his name.*

Keywords: *cathode rays, Perrin's experiments, Schuster's research, J. J. Thomson corpuscles, thermionic emission, Richardson's formula.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov "Discovery of the origin of cathode rays," *Informations and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 325–359, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Катодные лучи были открыты еще в 1859 г., но в 1897 г. их природа все еще оставалась предметом острой дискуссии. Некоторые физики предполагали, что катодные лучи являются своего рода волновым движением в «эфире». Концепция воображаемого эфира как среды, в которой передаются колебания, была модной до того момента, пока А. Эйнштейн не разработал теорию относительности. Другие ученые считали, что катодные лучи состоят из частиц.

Давно было известно, что катодные лучи отклоняются даже слабым магнитным полем, так же, как и быстро движущаяся отрицательно заряженная частица, что свидетельствовало в пользу частиц. Однако немецкий физик Генрих Герц ошибочно пришел к выводу, что катодные лучи не отклоняются электрическим полем, как должно быть в случае движущихся заряженных частиц. После этого физик Филипп Ленард показал, что катодные лучи, оставаясь неизменными, могут беспрепятственно проникать

через золотую фольгу, достаточно толстую, которая содержит множество слоев атомов золота. В тот период времени казалось маловероятным, что частица может пройти через атом, а тем более через многие из них. Таким образом, разные экспериментальные результаты подтверждали разные представления о природе катодных лучей. Более того, доказательная ценность некоторых из этих результатов была неоднозначной.

2. Эксперименты с катодными лучами Жана Перрена

Важную роль в споре между эфирной и материальной теориями катодных лучей сыграли эксперименты 25-летнего французского физика Жана Батисты Перрена (фр., *Jean Baptiste Perrin*, 30.09.1870—17.04.1942). Гипотеза о том, что катодные лучи состоят из частиц отрицательно заряженной материи и распространяются с большой скоростью, побудила его осуществить проверку этого утверждения. С 1894 по 1897 гг. Перррен был ассистентом физики в Высшей нормальной школе (фр. *École Normale Supérieure*) в городе Лилль (фр. *Lille*). В течение указанного времени Жан проводил экспериментальные исследования катодных лучей в лаборатории *École Normale* и лаборатории Пеллата (*H. Pellat*) в Сорбоне, рис. 1. Это направление исследований стало предметом его докторской диссертации. Перрену в проведении фундаментального эксперимента по определению заряда катодных лучей, помогал его друг по Нормальной школе Поль Ланжевен¹.

Лабораторией в *École Normale* заведовал физик Жюль Виоль² (фр. *Jules Louis Gabriel Violle*, 16.11.1841—12.09.1923). Он же являлся научным руководителем по диссертации Перрена.

В 1895 г. Перрен для экспериментов сконструировал газоразрядную трубку оригинальной конструкции, которая содержала цилиндр Фарадея³ для определения знака заряда катодных лучей. Внутри разрядной трубки были коаксиально установлены два металлических цилиндра: цилиндр Фарадея *ABCD* и *EFGH* с двумя соосными отверстиями β и γ , направленными в сторону катода, рис. 2. Цилиндр *EFGH* служил анодом и его основание *FG* находилось на расстоянии примерно 0,1 м от поверхности катода *N*. Этот цилиндр был заземлен и защищал цилиндр Фарадея от внешних наводок.

¹ Поль Ланжевен (фр. *Paul Langevin*; 23.01.1872—19.12.1946) — французский физик. Автор парадокса близнецов — мысленный эксперимент, при помощи которого пытаются доказать противоречивость специальной теории относительности. Создатель теории диамагнетизма и парамагнетизма.

² Исследования Жюль Виоля в основном касались радиометрии, в частности, разработки актинометра, фотометрии и калориметрии.

³ Цилиндр Фарадея — устройство для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц. Названо в честь английского физика Майкла Фарадея.

Излучения могли проникать во внутренний цилиндр $ABCD$ и зарядить его только через отверстие β во внешнем экране $EFGH$. Для оценки заряда использовался электроскоп, соединенный с внутренним цилиндром [1].

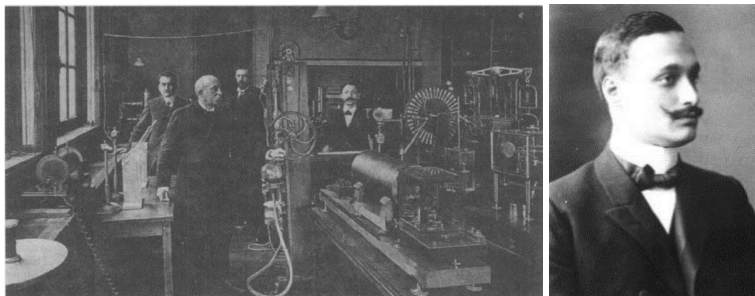


Рис. 1. Жан Батист Перрен (*Jean Baptiste Perrin*). Новая лаборатория физических исследований в Сорбонне, открытая в 1894 г. Слева катушка Румкорфа. Справа спереди — электродинамометр Пеллата, на заднем плане — электростатическая машина Вимшерста.

Fig. 1. Jean Baptiste Perrin. The new physics research laboratory at the Sorbonne, opened in 1894. On the left the Ruhmkorff coil. On the right, in front, Pellat's electro-dynamometer, in the background, the Wimshurst electrostatic machine

Во время работы трубки в отверстие α внутреннего цилиндра $ABCD$ попадал пучок катодных лучей, который его заряжал. Заряд стекал к электроскопу и фиксировался. В результате проведения опыта цилиндр оказывался заряжен отрицательно. Отсюда следовал вывод, что неизвестные частицы, бомбардировавшие его, также были заряжены отрицательно. Электроскоп вообще не реагировал на отклонения катодных лучей магнитом, когда они не попадали внутрь цилиндра $ABCD$. Исходя из проведенного эксперимента Перрен сделал вывод, что катодные лучи представляют собой поток частиц с отрицательным электрическим зарядом, которые движутся прямолинейно и могут отклоняться под воздействием магнитного поля в нужном направлении, в частности, при необходимости их можно направить в цилиндр Фарадея.

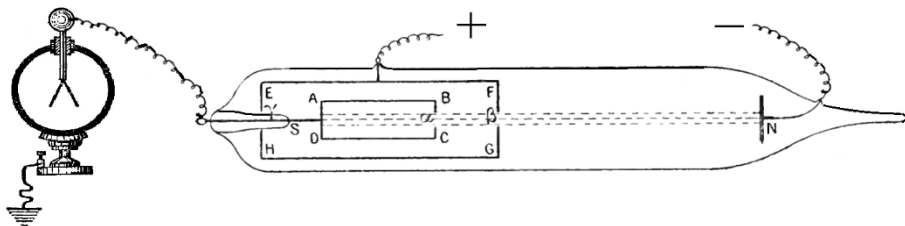


Рис. 2. Схема эксперимента Перрена по определению заряда катодных лучей. 1895 г.

Fig. 2. Scheme Perrin experiment to determine the charge of cathode rays. 1895

Эксперимент Перрена носил качественный характер. В статье [1] в связи с этим он отметил: «Можно измерить количественно поток электрического заряда, переносимый катодными лучами. Я не закончил это измерение, но могу оценить по порядку величины приобретенный заряд. Цилиндр Фарадея, помещенный в одну из моих трубок, находящуюся под давлением 20 микрон ртутного столба, приобретает при одном выключении электромагнита потенциал 300 вольт при емкости 600 ед. СГС».

Перрен помимо определения природы катодных лучей исследовал каналные лучи и установил их положительный заряд. В этом эксперименте использовалась газоразрядная трубка, подобная по конструкции трубке, изображенной на рис. 2.

В проведенном исследовании Перрена отметим эксперимент с модернизированной трубкой Крукса по разделению катодных лучей, рис. 3 [2]. Трубка Крукса содержала анод P из металлической сетки и дополнительный электрод A , который располагался перпендикулярно катодным лучам. Катодные лучи, то есть отрицательно наэлектризованные частицы, ускоренные разностью потенциалов между катодом N и анодом P , проходят через анод P и продолжают свое движение до тех пор, пока не достигнут стеклянной стенки трубки и не произойдет ее флуоресценция. Когда электрод A имеет отрицательный потенциал по отношению к аноду, то в этом случае катодные лучи разделяются на два расходящихся потока. При подаче на электрод A положительного потенциала относительно анода происходит пересечение двух катодных лучей, рис. 3.

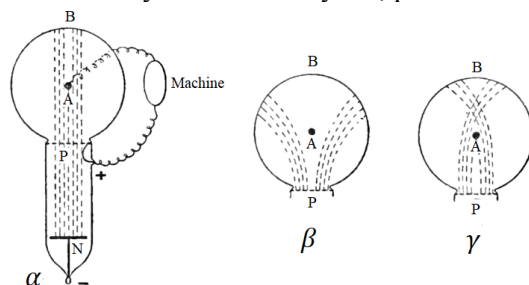


Рис. 3. Отображение траектории катодных лучей, когда электрод A : α — нейтрален, β — заряжен отрицательно и γ — положительно заряжен. Рисунок из диссертации Жана Перрена [2].

Fig. 3. Displays the trajectory of cathode rays when electrode A is: α – neutral, β – negatively charged and γ – positively charged. Drawing from Jean Perrin's dissertation [2]

Эксперименты Жана Перрена убедительно показали, что катодные лучи состоят из потока отрицательно заряженных частиц, которые выходят из катода во время разряда. К сожалению, эти наблюдения прояснили

только качественную сторону катодных лучей. Сам Перрен признает, что ему было трудно контролировать вакуум в своих трубках и электрический потенциал, приложенный к электродам.

Исследования Перрена указали на причину, по которой Генрих Герц не заметил никакого притяжения или отталкивания катодных лучей наэлектризованными пластинами. Дело в том, что частицы катодных лучей двигались так быстро, а электрические силы были настолько слабыми, что заметить слишком малое отклонение было почти невозможно. Герц не предполагал, что электрический заряд на его пластинах частично нейтрализуется воздействием молекул остаточного газа в трубке. Эти молекулы разбивались катодными лучами на заряженные частицы, которые затем притягивались к пластине с противоположным зарядом.

В июне 1897 г. Жан Перрен защитил на факультете естественных наук Парижского университета диссертацию под названием «Катодные лучи и лучи Рентгена. Экспериментальное исследование» (фр. *Rayons cathodiques et rayons de Röntgen. Étude expérimentale*) и получил докторскую степень по физическим наукам (фр. *docteur ès sciences physiques*, PhD).

Исследования Жана Перрена вместе с другими его работами о новых лучах Рентгена принесли ему после защиты диссертации в 1897 г. премию Джоуля Лондонского королевского общества (*Joule Prize of the Royal Society of London*) [3]. Потрясающее начало научной карьеры молодого ученого⁴, которому едва исполнилось 26 лет!

Работы Перрена по катодным лучам легли в основу более поздней работы физика Дж. Дж. Томсона, который использовал аппарат Перрена для характеристики отрицательно заряженных частиц, называемых электронами, которые, как позже выяснилось, являются частями атомов.

3. Оценка отношения заряда к массе компонентов катодных лучей

Заметным научным центром по изучению природы катодных лучей в конце XIX в. стала Кавендишская лаборатория Кембриджского университета. В 1875 г. в лабораторию в качестве исследователя был принят Артур Шустер (*Sir Franz Arthur Friedrich Schuster*, 12.09.1851—17.10.1934). В этой должности он оставался в течение пяти лет (до 1881 г.). Сначала он работал под руководством Джеймса Клерка Максвелла, а позднее с Джоном Уильямом Стреттом (Лорд Рэлей).

⁴ В 1926 г. Жан Перрен в возрасте 56 лет получил Нобелевскую премию по физике «за работу по дискретной природе материи и в особенности за открытие седиментационного равновесия».

В 1881 г. после окончания Owens колледжа (*Owens College*, позже стал *Victoria University* в Манчестере) он был назначен на должность профессора прикладной математики, рис. 4. В 1888 г. Шустер занял должность Лэнгуортиевского профессора физики (*Langworthy⁵ Professor of Physics*). К слову, в этом колледже с 1870 по 1876 гг. учился Дж. Дж. Томсон. Для почти двух последующих десятилетий Шустер был доминирующей фигурой в научной среде Манчестера.

Артур Шустер в 1907 г. подал прошение об отставке по возрасту с должности Лэнгуортиевского профессора физики и на свое место предложил Э. Резерфорда, поскольку незадолго до этого он был избран членом Королевского общества и награжден медалью Румфорда.

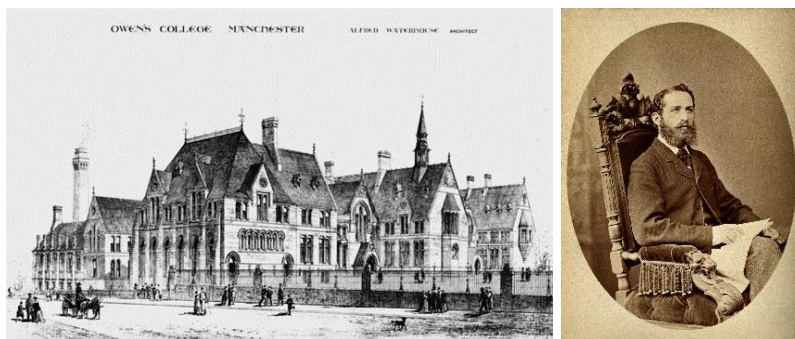


Рис. 4. Артур Шустер (1888 г.) и общий вид Owens колледжа в Манчестере (1874 г.).

Fig. 4. Arthur Schuster (1888) and a general view of Owens College, Manchester (1874)

Нужно заметить, что А. Шустер был один из немногих, кто должным образом оценил идеи Максвелла, изложенные в его «Трактате по электричеству и магнетизму» (1873). Уже на следующий год после выхода этой книги на ее основе Артур Шустер прочел первый лекционный курс. На его лекции записалось три студента. Одним из них был будущий преемник Максвелла на посту директора Кавендишской лаборатории Дж. Дж. Томсон, что явно стимулировало его интерес к занятиям физикой.

В 1880 А. Шустер провел важные исследования электрического разряда в газоразрядных трубках, которые показали, что проходящий через газовую среду под действием электрического поля электрический ток содержит ионы, и что ток, при наличии ионизация газа, можно поддержи-

⁵ В 1874 британский бизнесмен и политик Э. Р. Лэнгуорти (Edward Ryley (or Riley) Langworthy, 1797 - 07.04. 1874) завещал £10000 для одной должности профессора экспериментальной физики в Университете Манчестера, с условием, что получивший финансирование ученый должен сделать научное открытие.

вать с помощью небольшого потенциала. Это открытие он сделал в возрасте 29 лет, и оно стало предметом его лекций *Bakerian* в 1884 г. [4].

Замкнутый по характеру А. Шустер, активный велосипедист и скалолаз, меценат и страстный путешественник, предложил изящный метод определения отношения заряда к массе электрона $\frac{e}{m}$ по его отклонению в магнитном поле.

Шустер в основном принял гипотезу Крукса о том, что катодные лучи являются электрически заряженными частицами, а не волнами. Он расширил эксперименты Крукса, разместив в катодной трубке металлические пластины, параллельные катодным лучам и подав на них электрический потенциал. Отклонение полем лучей в сторону положительно заряженной пластины указывало на то, что лучи содержат отрицательный заряд. А. Шустер первый показал, что отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$ можно вычислить по отклонению катодных лучей в магнитном поле (1889) [5].

Рассуждения его были следующими. Если частица массой m и зарядом e движется со скоростью v перпендикулярно магнитному полю с индукцией B , то магнитное поле отклоняет эту частицу от прямолинейного движения. На нее действует сила $F = evB$, и частица начинает двигаться по круговой орбите радиуса r .

В этом случае

$$Bev = \frac{mv^2}{r} \text{ или } \frac{e}{m} = \frac{v}{Br}. \quad (1)$$

Для определения $\frac{e}{m}$ одного уравнения недостаточно, так как неизвестна скорость v . Для ее нахождения Шустер использует уравнение энергетического баланса в виде

$$Ue = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где U — разность потенциалов, приложенная к газоразрядной трубке.

Исключив из уравнений (1) и (2) скорость v , Шустер получил выражение для оценки верхнего предела $\frac{e}{m}$

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}. \quad (3)$$

Значения верхнего предела $\frac{e}{m}$ в формуле (3) оценивались по результатам реального эксперимента, при значениях $U = 225$ В, $B = 200$ Гс и $r = 1$ см.

Нижний предел $\frac{e}{m}$ оценивался из выражения (1), при значениях $B = 200$ Гс и $r = 0,5$ см, а скорость частицы определялась на основании

кинетической теории газов. В эксперименте скорость молекул в воздухе при комнатной температуре составила $v = 1000$ м/с.

В результате исследования оказалось, что $\frac{e}{m}$ находится в следующем диапазоне значений

$$5 \cdot 10^2 \frac{SGCM}{g} < \frac{e}{m} < 10^6 \frac{SGCM}{g}.$$

Полученное значение $\frac{e}{m}$ для катодных лучей оказалось на два порядка выше, чем подобное значение для атома водорода при электролизе ($\frac{q_{H_2}}{m_{H_2}} = 10^4 \frac{SGCM}{g}$ или $10^8 \frac{Кл}{кг}$), что вызвало определенный скепсис у ученых к его расчетам. Ко всему прочему, он не сделал правильных выводов из своих экспериментов и продолжал считать катодные лучи потоком заряженных атомов или молекул газа.

Шустер не смог извлечь пользу из своих исследований по всей видимости из-за того, что его квалификация физика-экспериментатора была недостаточного уровня. Невзирая на это, исследования А. Шустера легли в основу экспериментов Дж. Дж. Томсона, которые в последующем привели к открытию электрона.

4. Исследования по катодным лучам в Кавендишской лаборатории

22 декабря 1884 г., после ухода второго профессора Кавендишской лаборатории лорда Дж. У. Рэля (англ. *John Strutt, 3rd Baron Rayleigh*, 12.12.1842—30.06.1919), был избран третьим ее профессором и одновременно директором 28-летний Джозеф Джон Томсон (*Sir Joseph John Thomson*, 18.12.1856—30.08.1940, рис. 2.17). Юность Джей-Джея была лишь одной из причин удивления его назначением. Его способности явно не соответствовали поставленной задаче [6]. Он был слишком неуклюж, чтобы безопасно обращаться со стеклянной посудой, и проявлял меньше интереса к экспериментам, чем к продвижению современных идей в математической физике: электромагнитной теории Максвелла и концепции Кельвина об атомах как вихрях в эфире. Тем не менее, он произвел сильное впечатление на избирателей, которые предпочли его более опытным кандидатам, и поздравительные письма, которые он получил, показывают, как высоко его ценили многие с превосходными соперничающими претензиями.

Томсон, став главой Кавендишской лаборатории, больше стал уделять внимания экспериментальным исследованиям электрической проводимости в газах. Этой проблемой он занимался вплоть до 1897 г. Трудно-

сти в понимании этой проблемы заключались в том, что газ при низком давлении был непроводящим, пока приложенное напряжение не было достаточно высоким, чтобы начать разряд. Тогда это был настолько быстро-текущий процесс, что воспроизводимые результаты были делом случая и настойчивости.

В 1894 г. Томсон решил провести эксперименты по определению скорости распространения катодных лучей, поскольку ему казалось, что знание этой скорости позволит определиться с одним из двух взглядов на природу катодных лучей: «Если принять точку зрения, что катодные лучи представляют собой эфирные волны, то можно ожидать, что они будут двигаться со скоростью, сравнимой со скоростью света; тогда как если лучи состоят из молекулярных потоков, то скорость этих лучей будет равна скорости молекул, которая, как мы можем ожидать, будет намного меньше скорости света» [7]. Используя эффект отклонения катодных лучей магнитом, Томсон определил, что скорость катодных лучей составляет $1,9 \times 10^7$ см/сек, что при 0°C примерно в сто раз больше скорости молекул водорода ($1,8 \times 10^5$ см/сек). Скорость катодных лучей, полученная в ходе экспериментов, очень близка к скорости, которую отрицательно наэлектризованный атом водорода приобретет под влиянием падения потенциала на катоде. В статье отмечается, что действие магнитной силы при отклонении этих лучей позволяет предположить, что отклонение вызвано действием магнита на движущееся наэлектризованное тело и в этом случае скорость атома должна быть по крайней мере того же порядка, который был определен автором. Скорость частиц катодных лучей оказалась в 1600 раз меньше скорости света, что явилось убедительным доводом в пользу корпускулярной гипотезы.

В первые десять лет, вплоть до 1895 г., результаты исследований лаборатории были достойными, но не очень впечатляющими.

Опубликованная в декабре 1895 г. статья Вильгельма Рентгена об открытии X-лучей стимулировала новый интерес к электронно-лучевым трубкам, которые генерировали эти лучи, а также к экспериментам с ними. Статья привлекла внимание Томсона, особенно в той ее части, где касалось влияния рентгеновских лучей: «Легкость, с которой газ, путем применения и удаления рентгеновских лучей, может быть превращен из проводника в изолятор, делает использование этих лучей ценным средством изучения проводимости электричества через газы» [8].

Для Кембриджского университета 1895 год стал примечательным еще тем, что впервые начали принимать выпускников других университетов в качестве «студентов-исследователей». Среди них были Эрнест Резер-

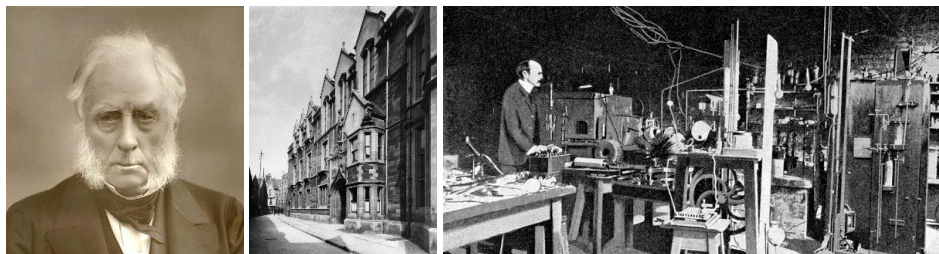


Рис. 5. Уильям Кавендиш, 7-й герцог Девонширский (27.04.1808—21.12.1891), при финансовой поддержке которого была создана лаборатория его имени. Общий вид Кавендишской лаборатории в 1911 г. Джозеф Джон Томсон проводит эксперимент в Кавендишской лаборатории.

Fig. 5. William Cavendish, 7th Duke of Devonshire (04.27.1898–12.21.1891), with the financial support of which a laboratory named after him was created. General view of the Cavendish Laboratory in 1911. Joseph John Thomson conducting an experiment at the Cavendish Laboratory

форд (*Ernest Rutherford*) из Новой Зеландии, Джон Таунсенд (*John Townsend*) и Дж. А. Макклелланд (*J. A. McClelland*) из Ирландии, а в конце 1895 г. к ним присоединился выпускник Кембриджа Чарлз Т. Р. Вильсон (*Charles Thomson Rees Wilson*). Томсон и Макклелланд провели серию исследований рентгеновских лучей и их эффектов в начале 1896 г., сразу после публикации Рентгена. Томсон и Резерфорд вместе работали над серией экспериментов с газами, наэлектризованными рентгеновскими лучами, в течение первой половины 1896 г. Резерфорд продолжил эти исследования до 1897 г.

Другим фактором, который, несомненно, имел значение для научной области интересов Томсона, явилась статья, опубликованная Жаном Перреном в конце 1895 г., где сообщалось об эксперименте, в котором, в отличие от Герца, отрицательный электрический заряд действительно сопровождает катодные лучи [1,2].

Томсон хорошо знал о взаимосвязи между m/e и скоростью при искривлении траектории катодных лучей в магнитном поле, поскольку он использовал это вместе с предположениями о величине m/e в своих оценках скорости в 1894 г., а также у него была информация о том, что Шустер аналогичным образом использовал это вместе с предположениями о скорости в своих оценках m/e в 1890 г. Проблема в обоих случаях заключалась в том, что изогнутая магнитным полем траектория обеспечивает единственную экспериментальную связь между двумя неизвестными. Возможно это и было главным, что подтолкнуло Томсона к экспериментам с катодными лучами в конце 1896 г., так как он увидел потенциальные возможности эксперимента Перрина по установлению второй связи между этими двумя неизвестными.

5. Доклад Дж. Дж. Томсона в Кембриджском философском обществе

Первое публичное выступление Томсона о приведенных экспериментах по магнитному отклонению катодных лучей и модернизированном варианте эксперимента Перрина (1895 г.), состоялось 8 февраля 1897 г. в Кембриджском философском обществе (Cambridge Philosophical Society).

В докладе, материалы которого были опубликованы [9], Томсон уделил внимание двум группам экспериментов: первая группа, связанная с электрическими зарядами, переносимыми лучами, а вторая — с отклонением этих лучей, когда они проходят через однородное магнитное поле.

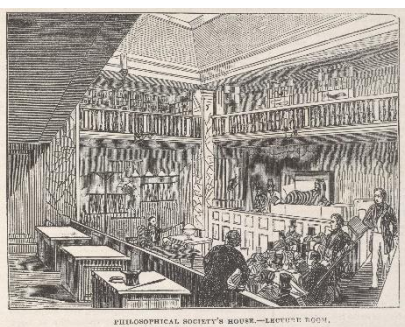


Рис. 6. Общий вид Кембриджского университета, 1890—1900 гг. Лекционный зал Кембриджского философского общества.⁶

Fig. 6. General view of the University of Cambridge, 1890–1900, Lecture hall of the Cambridge Philosophical Society.⁶

Томсон повторил эксперимент Перрена, однако в несколько измененном виде. Основания цилиндров в газоразрядной трубке, в отличие от трубки Перрена (рис. 2), содержали не отверстия, а прорезы в виде щелей. Внутренний цилиндр соединялся не с электроскопом, а с одной парой квадрантного электрометра⁷, рис. 7. Лучи не могли попасть во внутренний цилиндр, если на них не действовал магнит. Заряд в цилиндре фиксировался электрометром во время его возникновения при каждом замыкании и размыкании индукционной катушки.

⁶ Illustrated London News, June 28, 1845, CUL NPR.C.313) [10].

⁷ Квадрантный электрометр разработан в 1867 году британским физиком Уильямом Томсоном (позже лорд Кельвин). Электрометр используется для точного измерения электрического заряда или потенциала тела. Эта чрезвычайно чувствительная конструкция имеет алюминиевый диск (подвешенный в центре на торсионном волокне), разрезанный на четыре сегмента. Изолированные сегменты соединены по диагонали попарно. При зарядке один алюминиевый сегмент притягивается к одной паре сегментов и отталкивается от другого сегмента. Это отклонение (мера величины электрического заряда) измеряется лучом света, отраженным от зеркала, прикрепленного к заряженному сегменту.

В эксперименте Томсон обнаружил, что небольшой заряд проходит в цилиндр, даже когда он не находится на прямой траектории лучей. По всей видимости, это было связано с рассеянием заряда, выходящего из трубки через прорезь в цилиндре при каждом разряде катушки. Этот заряд был небольшим и отрицательным, а при сильном истощении вакуума часто имел положительный заряд. Когда лучи отклонялись магнитом для прохождения внутрь цилиндра, то он получал отрицательный заряд большой величины. Величина заряда сохранялась до тех пор, пока небольшой фосфоресцирующий участок возле цилиндра движением магнита перемещался в ту или иную сторону цилиндра.

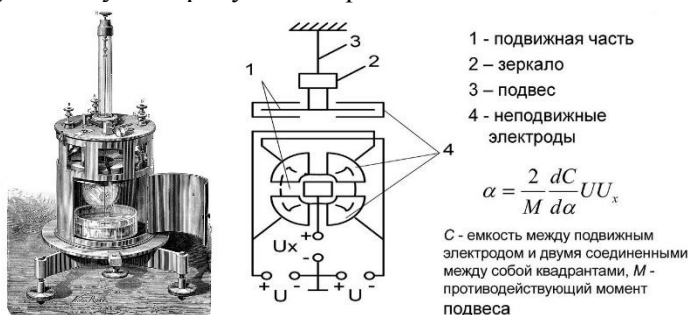


Рис. 7. Квадрантный электрометр конструкции Уильяма Томсона. Иллюстрация взята из книги «Physique Populaire» (Emile Desbeaux, 1891).

Справа — устройство квадрантного электрометра.

Fig. 7. Quadrant electrometer designed by William Thomson. Illustration taken from the book “Physique Populaire” (Emile Desbeaux, 1891). On the right is a quadrant electrometer device

Этот эксперимент убедительно показал, что вдоль катодных лучей идет поток отрицательного электричества. Однако следующие эксперименты обратили на себя внимание тем, что должно быть что-то помимо потока отрицательно наэлектризованных частиц вдоль катодных лучей. Если катушка продолжала работать, то отрицательный заряд в цилиндре не увеличивался до бесконечности, а достигал определенного предела и после этого оставался неизменным, хотя катодные лучи продолжали вливаться в цилиндр. Помимо этого, внутренний цилиндр, изначально заряженный отрицательно до определенной величины, сохранял этот заряд, до тех пор, пока на него не воздействовали лучи. Но как только лучи падали на него, то часть отрицательного заряда исчезала, невзирая на идеальную изоляцию.

Катодные лучи в экспериментах для магнитного отклонения создавались в боковой трубке и направлялись в большой колпак через щель в металлической пластине, рис. 8. Колпак помещался между двумя катушками, расположенными как в гальванометре Гельмгольца для создания однородного

магнитного поля. Лучи в колпаке проходили перед стеклянной пластиной, разделенной на квадраты. Благодаря этому было сделано большое количество фотографий лучей в разных газах и при разной степени истощения.

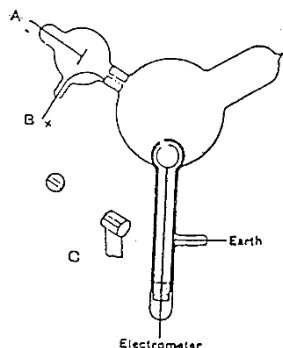


Рис. 8. Устройство установки в эксперименте Томсона по магнитному отклонению катодных лучей [9].

Fig. 8. Installation design in Thomson's experiment on the magnetic deflection of cathode rays [9]

Томсон в представленной серии экспериментов установил, что магнитное отклонение катодных лучей в воздухе, водороде, углекислом газе и метилиодиде (йодистый метил) имеет одно и тоже значение, если средняя разность потенциалов между катодом и анодом постоянна, рис. 9. Он отметил, что через щель внутреннего цилиндра газоразрядной трубки проходят определенные «лучи», которые не отклоняются магнитом, и они почти не способны производить фосфоресценцию. Траектория лучей в первой части их пути была близка к окружности.

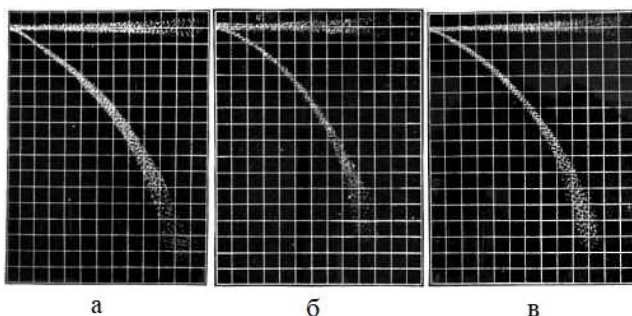


Рис. 9. Фотографии траекторий отклонения в магнитном поле катодных лучей в средах: а — водород (12 А, 1600 В), б — воздух, в — углекислый газ (12 А, 1600 В) [9].

Fig. 9. Photos of the trajectories of deflection in a magnetic field of cathode rays in media: а – hydrogen (12 A, 1600 V), б – air, в – carbon dioxide (12 A, 1600 V) [9]

Краткое содержание доклада Томсона в Кембриджском философском обществе было опубликовано в журнале «Nature» [11]. Следует отметить, что в выступлении Томсон не затронул вопрос о субатомной частице.

6. Корпускулы Дж. Дж. Томсона

Через три месяца, Дж. Дж. Томсон, в пятницу 30 апреля 1897 г., на еженедельной вечерней встрече в Королевском институте Великобритании (*Royal Institution of Great Britain*) выступил с лекцией «Катодные лучи» (*Cathode rays*), рис. 10. Лекция содержала результаты автора о трех ключевых экспериментах по проводимости электричества в газах, которые четко отличали «катодные лучи» от различных явлений, которые привлекали внимание ученых и затрудняли изучение газовых разрядов в XIX в. Полученные результаты основывались на серии экспериментов с газовыми разрядами, которые он начал в 1893 г. для сравнения и сопоставления проводимости газов с аналогичным поведением в электролитах, причем последнее явление хорошо описывалось в то время работами Майкла Фарадея, немецкого физика Рудольфа Клаузиуса (нем. *Rudolf Julius Emanuel Clausius*, 02.01.1822—24.08.1888) и шведского физикохимика Сванте Аррениуса (швед. *Svante August Arrhenius*, 19.02.1859—02.10.1927). Томсон после доклада в Кембриджском философском обществе продолжал эксперименты в течение 4 месяцев. В лекции из последних исследований были представлены эксперименты по влиянию некоторых внешних факторов на заряды, переносимые катодными лучами как внутри, так за пределами газоразрядной трубки [12].

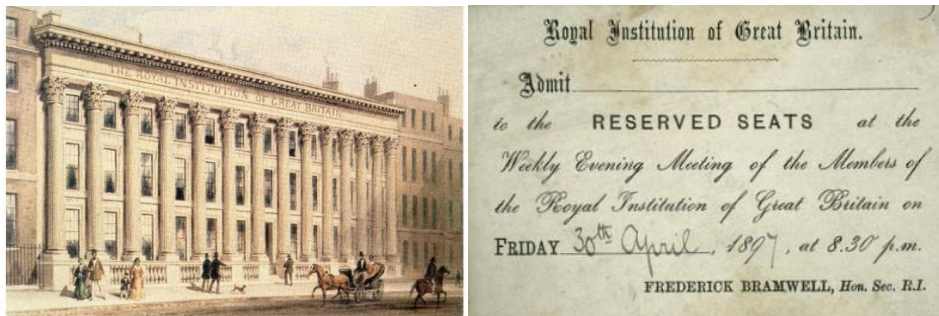


Рис. 10. Общий вид здания Королевского института Великобритании (1838 г.), в котором 30 апреля 1897 г. состоялась лекция Дж. Дж. Томсона и билет на эту лекцию.

Fig. 10. General view of the building of the Royal Institute of Great Britain (1838), in which April 30, 1897, a lecture by J. J. Thomson and a ticket to this lecture

Первая половина лекции была посвящена анализу экспериментальных исследований Плюккера, Гитторфа, Гольдштейна, Крукса, Э. Видеманна, Эльстера и Гейтел. Дж. Дж. Томсон остановился на особенностях экспериментов Перрена и отклонении катодных лучей под воздействием магнитного поля в различных средах, то есть по существу был изложен материал из его доклада в Кембриджском философском обществе. После

этого он остановился на неудавшемся эксперименте Герца по отклонению катодных лучей в электростатическом поле: «Например, мы можем заставить, как это сделал Герц, пройти лучи между пластинами, соединенными с батареей, так, что между этими пластинами действует электростатическая сила, и катодный луч сможет пересекать это пространство, не отклоняясь в ту или иную сторону. Однако мы должны помнить, что катодные лучи, когда они проходят через газ, делают его проводником, так что газ, действуя как проводник, экранирует электрическую силу от заряженной частицы. Когда пластины погружаются в газ и между пластинами установлена определенная разность потенциалов, то проводимость газа вблизи катодных лучей, вероятно, намного больше, чем средняя проводимость газа между пластинами, и поэтому градиент потенциала на катодных лучах очень мал по сравнению со средним градиентом потенциала».

Во второй половине лекции Томсон рассмотрел поведение катодных лучей вне газоразрядной трубки, опираясь на эксперименты Ленарда. Из экспериментов Ленарда по поглощению лучей за пределами трубки Томсон выдвигает гипотезу о том, что катодные лучи являются заряженными частицами, движущимися с большими скоростями, размер носителей должен быть мал по сравнению с размерами обычных атомов или молекул. Томсон отмечает, что предположение о том, что материя подразделяется на более тонкие части, чем атом элемента, является несколько поразительным. Однако гипотеза, которая имела бы несколько схожие последствия, а именно, что так называемые элементы являются соединениями какого-то изначального элемента, время от времени выдвигалась различными химиками. Так, Праут полагал, что атомы всех элементов состоят из атомов водорода, а Норман Локьер выдвинул весомые аргументы, основанные на спектроскопических соображениях, в пользу составной природы элементов.

Далее Томсон размышляет и выдвигает гипотезу⁸ [12]: «Проследим последствия предположения, что атомы элементов представляют собой скопления очень маленьких частиц, все похожие друг на друга. Мы будем называть такие частицы корпускулами, так что атомы обычных элементов состоят из корпускул и дырок, причем дырки преобладают». Он предположил, что на катоде некоторые молекулы газа расщепляются на эти частицы, и что они, заряженные отрицательным электричеством и движущиеся с высокой скоростью, и образуют катодные лучи. Расстояние, которое пройдут эти лучи, прежде чем потерять определенную часть своего импульса,

⁸ Математическая гипотеза в физике — форма научной гипотезы, один из методов познания, широко используемый в теоретической физике, заключающийся в распространении на новую, неисследованную область известных математически выраженных законов из какой-либо из смежных областей в видоизмененной форме.

будет пропорционально средней длине свободного пробега *корпускул*. Эти частицы сталкиваются с другими частицами, а не с молекулами в целом и можно предполагать, что они могут проникать между пустотами в молекуле. Таким образом, длина свободного пробега будет пропорциональна количеству этих корпускул. Так как каждая корпускула имеет одинаковую массу относительно массы единицы объема (плотность вещества), то независимо от его химической природы или физического состояния, длина свободного пробега, а, следовательно, и коэффициент поглощения будут зависеть только от плотности. Это в точности результат Ленарда.

На основе этой гипотезы видно, почему магнитное отклонение одинаково внутри трубки, независимо от природы газа, поскольку носителями заряда являются *корпускулы*, которые одинаковы независимо от состава газа. Все носители не могут быть уменьшены до минимальных размеров, некоторые могут быть агрегатами двух или более частиц. Они по-разному отклонялись бы от единственной корпускулы. Таким образом мы должны получить магнитный спектр.

Томсон попытался с помощью следующего метода измерить m/e , отношение массы этих корпускул к заряду, который они переносят. Для этого двойной цилиндр с прорезями, который использовался в эксперименте, был помещен перед вогнутым катодом для фокусировки катодных лучей на прорезь. Прорезь во внутреннем цилиндре закрывалась термопреградой. Термопреграда нагревалась, когда катодные лучи попадали в прорезь и ударялись об нее. Зная теплоемкость преграды, можно было определить механический эквивалент переданного ей тепла. Отклонение электрометра показывало величину заряда, попавшего в цилиндр.

Для определения отношения m/e Дж. Дж. Томсон получил соответствующую формулу. В это выражение вошли экспериментально определяемые величины. При их наличии можно вычислить отношение m/e .

Остановимся на подходе Дж. Дж. Томсона. В нем он руководствовался следующими соображениями. Если пучок катодных лучей однородный и состоит из N частиц с зарядом e и массой m , то тогда частицы несут определенное количество электричества $Ne = Q$. Величину Q можно измерить с помощью электрометра.

С другой стороны, катодные лучи, падая на твердое тело, повышают его температуру. Кинетическая энергия движущихся частиц со скоростью v превращается в тепло, и если предположить, что вся эта энергия полностью переходит в тепло, то можно измерить увеличение температуры тела и вычислить его теплоемкость. В этом случае кинетическая энергия W частиц определится из формулы $W = \frac{Nmv^2}{2}$.

На любой электрический заряд, движущийся в магнитном поле, как известно, действует сила Лоренца. Если магнитное поле однородно, а вектор скорости частицы $\vec{v}$ и напряженности магнитного поля $\vec{H}$ перпендикулярны, то траектория движения заряженной частицы представляет собой окружность радиуса ρ . Этот радиус можно определить из второго закона Ньютона: $F = ma$, где $a = \frac{v^2}{\rho}$ — центростремительное (нормальное) ускорение. Таким образом, имеем:

$$evH = m \frac{v^2}{\rho} \quad \text{или} \quad \frac{mv}{e} = I, \quad \text{где} \quad I = \mu_0 H \rho, \quad \mu_0 = \text{const.}$$

Исходя, из выше записанных выражений для Q , W и I , можно получить следующее соотношение для W/Q , а уже из него вычислить m/e :

$$\frac{m}{e} = \frac{I^2 Q}{2W}. \quad (4)$$

Таким образом, если определить из эксперимента значения величин Q , W и I , то тогда из полученной формулы (4) можно сделать вывод о скорости неизвестной частицы и ее массе.

В эксперименте Томсона, проведенном при очень низком давлении, когда лучи существовали около одной секунды, а заряда было достаточно, чтобы поднять потенциал внутреннего цилиндра до 16 В при емкости 1,5 мкФ, значение Q было следующим:

$$Q = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ CGSS.}$$

В эксперименте теплоемкость термопреграды составляла 0,005, а ее температура под воздействием лучей поднялась на 3,3 °С. В этом случае механический эквивалент тепла равен

$$W = 3,3 \cdot 0,005 \cdot 4,2 \cdot 10^7 = 6,3 \cdot 10^5 \text{ erg.}$$

В эксперименте значение $I = 280 \text{ G} \cdot \text{cm}$. Тогда после подстановки значений величин Q , W и I в формулу (4) получим

$$\frac{m}{e} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ g/CGSS.} \quad (5)$$

Полученное значение m/e значительно меньше по сравнению со значением 10^{-4} для отношения массы атома водорода к заряду, который он несет. Другими словами, для неизвестных частиц оказалось, что их отношение m/e примерно в 1000 раз меньше, чем у самого маленького известного носителя заряда — атома водорода.

В конце доклада Томсон, комментируя полученный результат (5), сказал: «Интересно отметить, что значение e/m , которое мы нашли на основе катодных лучей, имеет тот же порядок, что и значение 10^{-7} , выведенное Зеemanом из его экспериментов по влиянию магнитного поля на период натриевого света».

Полученные результаты подтвердили ранее сделанные предположения по данной проблеме о том, что катодные лучи состоят из пучка отрицательно заряженных частиц.

Несмотря на жесткое противодействие своим представлениям о том, что катодные лучи представляют собой частицы, особенно со стороны Герца и Ленарда, которые придерживались волнового объяснения, Томсон придерживался своей гипотезы и в конечном итоге представил решающие доказательства для ее подтверждения [12]: «Атомы элементов представляют собой скопления очень маленьких частиц, которые похожие друг на друга и называются корпускулами. Атомы обычных элементов состоят из корпускул и дырок, причем дырки преобладают».

Теория Томсона встретила общий скептицизм. Даже последователь Максвелла ирландский физик Джордж Фицджеральд (англ. *George Francis Fitzgerald*, 03.08.1851—22.02.1901), самый отзывчивый слушатель, считал, что он пошел намного дальше, чем того требовали его экспериментальные данные. Фицджеральд сделал альтернативное предположение, что частицы катодных лучей были свободными электронами, как это предусмотрено теорией Джозефа Лармора⁹ [13]. Такие электроны должны были быть центрами напряжения в эфире. Они объяснили дискретные электрические заряды, но не зависели от материи. Таким образом, Фицджеральд признал природу катодных лучей в виде частиц, но он не согласился с гипотезой, что эти же частицы могут составлять атомы. С точки зрения Томсона, Фицджеральд вводил ненужную дополнительную гипотезу.

Текст лекции Томсона 30 апреля 1897 г. в Королевском институте появился под заголовком «*Cathode Rays*» три недели спустя 21 мая в журнале «*Electrician*» [14]. Через два месяца в том же журнале появилась реакция на лекцию Томсона: «Объяснение проф. Дж. Дж. Томсоном некоторых явлений электронно-лучевого излучения с помощью предположения о делимости химического атома приводит к такому количеству априори важных и интересных выводов, что нельзя не желать, чтобы эта гипотеза была подтверждена на ранней стадии каким-нибудь решающим экспериментом» [15].

⁹ Сэр Джозеф Лармор (англ. *Sir Joseph Larmor*, 11.08.1857—1905.1942), ирландский физик, первый, кто вычислил скорость, с которой излучается энергия ускоренным электроном, и первый, кто объяснил расщепление линий спектра магнитным полем. Его теории были основаны на убеждении, что материя полностью состоит из электрических частиц, движущихся в эфире.

7. Решающие эксперименты Дж. Дж. Томсона

В октябре 1897 г. Томсон опубликовал развернутую статью «Катодные лучи» (*Cathode Rays*) в журнале *Philosophical Magazine* [16]. В нее вошли исследования по катодным лучам, которые были представлены в виде доклада в Кембриджском философском обществе и лекции в Королевском институте, а также новые научные результаты в этой области.

В начале статьи автор отмечает: «Обсуждаемые в этой статье эксперименты были предприняты в надежде получить некоторую информацию о природе катодных лучей. Относительно этих лучей существуют самые разные мнения...». Чтобы прояснить ситуацию и получить необходимую информацию о природе катодных лучей, он решил провести серию экспериментов с акцентами на их количественные оценки.

Ключевые эксперименты, описанные в статье, основывались на рабочей гипотезе о том, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц. В частности, в работе Томсона по определению величины заряда, переносимого корпускулами, использовался экспериментальный метод и оборудование, разработанные сотрудником Кавендишской лаборатории Чарлзом Вильсоном (англ. *Charles Thomson Rees Wilson*, 14.02.1869—15.11.1959), который использовал открытие Таунсенда (*Townsend's discovery*) о том, что заряженные частицы могут образовывать ядра, вокруг которых может конденсироваться пересыщенный водяной пар. Этот эмпирический метод привел к разработке устройства, которое позже будет называться «туманная камера» (камера Вильсона).

Томсон в последних в своих опытах сумел сделать то, что не удалось сделать Герцу. При проведении экспериментов он неожиданно столкнулся с проблемой при достижении очень низкого давления. Оказалось, что ниже определенного критического давления потенциал, необходимый для разряда, быстро возрастал, и вскоре разряд становился критическим из-за выхода из строя разрядных трубок. Путь к разрешению проблемы ему указало исследование его соотечественников химиков Де ла Рю (англ. *Warren De la Rue*, 15.01.1815—19.04.1889) и Мюллера (*Hugo W. Müller*), которые в 1883 г. обнаружили, что увеличение диаметра разрядной трубки снижает критическое давление [17]. Томсон в 1897 г., опираясь на этот вывод, сконструировал свою разрядную трубку с почти идеальным вакуумом, рис. 11. Стеклоанная колба трубки вокруг катода имела диаметр около 10 см перед сужением к цилиндрическому каналу, внутри которого распространялись лучи. Герц, проводивший исследования катодных лучей 13 лет назад, не знал о результатах Де ла Рю и Мюллера. Его разрядная трубка имела диаметр около 2,5 см по всей ее длине. Если бы Герц достиг

достаточно низкого давления, чтобы наблюдать электростатическое отклонение, то, возможно, он не смог бы получить разряд.

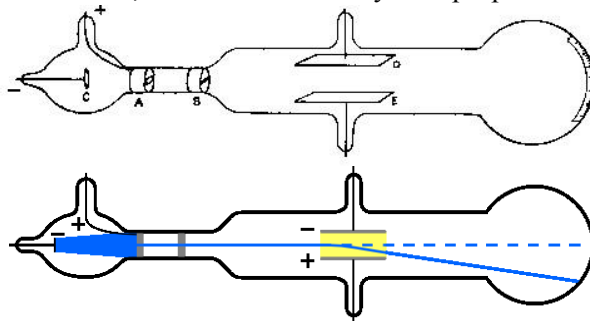


Рис. 11. Катодная трубка конструкции Дж. Дж. Томсона [16], с помощью которой он наблюдал отклонение катодных лучей электрическим полем. 1897 г.

Fig. 11. Cathode tube designed by J. J. Thomson [16], with the help of which he observed the deflection of cathode rays by an electric field. 1897

В мае—июне 1897 г. Томсон, используя трубку своей конструкции, обнаружил отклонение катодных лучей электростатическим полем. До этого исследователи, например, Генрих Герц, утверждали, что такое невозможно. В опытах Герца причиной была проводимость остаточного газа в трубке, возникавшая под действием катодных лучей. После этого Томсон установил, что отклонение катодных лучей зависит от степени разреженности вакуума в газоразрядной трубке. Это указывало на связь отрицательного результата Г. Герца с большим количеством остаточного газа в его газоразрядной трубке. Позднее он отметил, что «отклонение катодных лучей электрическими силами стало вполне различимым, а его направление указывало то, что составляющие катодные лучи частицы несли отрицательный заряд. Этот результат устраняет противоречие между воздействием электрических и магнитных сил на катодные частицы. Но он имеет гораздо большее значение. Здесь возникает способ измерения скорости этих частиц v , а также и m/e , где m — масса частицы, а e — ее электрический заряд».

Введенное в статье Дж. Дж. Томсона обозначение « e » для заряда электрона так и закрепилось за этой частицей в научно-технической литературе. Вверху « e » иногда как в степени, ставят знак минус « $-$ » - « e^- », чтобы подчеркнуть, что это электрон. Заметим, что в его работах определяется m/e (англ. *mass-to-charge ratio*), в то время как в научной литературе чаще используется величина e/m (отношение заряда электрона к его массе).

К этому моменту времени Томсону были доступны важные экспериментальные результаты Герца, Ленарда, Перрена, Вихерта и Кауфмана

по катодным лучам. Он обобщил эксперименты А. Шустера, добавив к нахождению параметров для вычисления e/m не только данные из отклонения катодных частиц в магнитном поле, но и из эффекта их отклонения в электрическом поле. После этого Дж. Дж. Томсону оставалось определить массу неизвестных отрицательно заряженных частиц, составляющих катодные лучи. С этой целью он модифицировал эксперимент Ж. Перрена. Для определения требуемой характеристики частиц m/e было изготовлено несколько типов катодных трубок оригинальной конструкции с высоким вакуумом. Конструкция одна из таких трубок приведена на рис. 11. Значение m/e Томсон вычислял по формуле (3.1), для определения величин Q , W и I были использованы катодные трубки трех различных типов. Некоторые результаты измерений величин Q , W и I , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента с одной из катодных трубок под № 1 при отклонении катодных лучей в магнитном поле, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения величин Q , W и I , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента с одной из катодных трубок под № 1 при отклонении катодных лучей в магнитном поле [16].

Tab. 1. Values of quantities Q , W and I obtained by J. J. Thomson from an experiment with one of the cathode tubes under No. 1 when the cathode rays are deflected in a magnetic field [16]

Gas	Value of W/Q	I	m/e , g/CGSS	v , cm/sec
Air (Воздух)	$4,6 \times 10^{11}$	230	$0,57 \times 10^{-7}$	4×10^9
Air	$1,8 \times 10^{12}$	350	$0,34 \times 10^{-7}$	1×10^{10}
Air	$6,1 \times 10^{11}$	230	$0,43 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^9$
Air	$2,5 \times 10^{12}$	400	$0,32 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{10}$
Air	$5,5 \times 10^{11}$	230	$0,48 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^9$
Air	1×10^{12}	285	$0,4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Air	1×10^{12}	285	$0,4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Hydrogen (Водород)	6×10^{12}	205	$0,35 \times 10^{-7}$	6×10^9
Hydrogen	$2,1 \times 10^{12}$	400	$0,5 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^9$
Carbonic acid (Углекислый газ)	$8,4 \times 10^{11}$	260	$0,4 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^9$
Carbonic acid	$1,47 \times 10^{12}$	340	$0,4 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^9$
Carbonic acid	$3,0 \times 10^{12}$	480	$0,39 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{10}$

Анализируя результаты экспериментов для катодных трубок трех различных типов, Дж. Дж. Томсон отмечает: «Значение m/e значительно больше для трубки 3, где отверстие меньше, чем у трубок 1 и 2, у которых отверстие представляет собой щель гораздо большей площади. Я считаю, что значения m/e , полученные для трубок 1 и 2, слишком малы из-за утечки газа из внутреннего цилиндра во внешний, который становится проводником при прохождении катодных лучей. Из этих таблиц видно, что значение m/e не зависит от природы газа». В статье приведены средние значения m/e , полученные при отклонении катодных лучей в магнитном поле

для трубок [16]: № 1 при наличии воздуха $-0,40 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$, водорода $-0,42 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$ и углекислого газа $-0,40 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$; № 2 при наличии воздуха $-0,52 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$, водорода $-0,50 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$ и углекислого газа $-0,54 \times 10^{-7} \text{ г/CGSS}$.

В июне—июле 1897 г. Томсон провел эксперимент по нахождению значений для вычисления m/e из эксперимента по электростатическому отклонению катодных лучей. Произошло это через два месяца после высказанной им гипотезы, что катодные лучи представляют собой корпускулы. В эксперименте использовалась катодная трубка конструкции Дж. Дж. Томсона, рис. 11.

Электростатическое отклонение катодных лучей определялось выражением

$$\Theta = \frac{Fel}{mv^2}, \quad (6)$$

где Θ — электрическое угловое отклонение, F — приложенная электрическая напряженность, l — длина электрических пластин, v — скорость частицы). Если была приложена магнитная сила, распространяющаяся на ту же площадь, что и на электрические пластины, то

$$\Phi = \frac{HEl}{mv}, \quad (7)$$

где Φ — магнитная девиация или магнитное отклонение), H — напряженность приложенного магнитного поля).

Если магнитное поле изменяли до тех пор, пока магнитное отклонение не стало таким же, как и электрическое отклонение, то уравнения (6) и (7) можно упростить:

$$\frac{Fel}{mv^2} = \frac{HEl}{mv} \quad \text{или} \quad v = \frac{F}{H},$$

тогда

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{F\Phi}, \quad (8)$$

где значение Θ найдено путем измерения только электрического прогиба.

Томсон провел измерения в воздухе, водороде и углекислом газе, а также испробовал как алюминиевые, так и платиновые электроды. В таблице 2 приведены значения величин Θ , H и F , полученные Дж. Дж. Томсоном из эксперимента при отклонении катодных лучей в электрическом поле. Как видно из табл. 2, полученные результаты для m/e по формуле (8) лежат в интервале от $1,3 \times 10^{-7}$ до $1,5 \times 10^{-7}$ г/Кл и в целом совпадают с его более ранними результатами.

Табл. 2. Значения величин θ , H и F , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента при отклонении катодных лучей в электрическом поле [16].

Tab. 2. Values of the quantities θ , H and F obtained by J. J. Thomson from the experiment with the deflection of cathode rays in an electric field [16]

Gas	θ	H	F	l	m/e , g/C	v , cm/sec
Air	8/110	5,5	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$
Air	9,5/110	5,4	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$
Air	13/110	6,6	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^9$
Hydrogen	9/110	6,3	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,5 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^9$
Carbonic Acid	11/110	6,9	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,5 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^9$
Air	6/110	5	$1,8 \times 10^{10}$	5	$1,3 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^9$
Air	7/110	3,6	$1,0 \times 10^{10}$	5	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$

В статье [16] не приводится среднее значение m/e , полученное для одной трубки при отклонении катодных лучей в электрическом поле, но его можно определить из данных табл. 2, которое после вычислений составляет $m/e = 1,286 \times 10^{-7} \text{ g/CGSS}$. Полученное значение m/e в несколько раз больше, чем при отклонении катодных лучей в магнитном поле. Дж. Дж. Томсон не приводит также общее среднее значение m/e , исходя из четырех экспериментов при отклонении катодных лучей в магнитном и электрическом полях. Если воспользоваться данными статьи, то среднее значение $m/e = 0,773 \times 10^{-7} \text{ g/CGSS}$.

По поводу представления результатов экспериментов Дж. Дж. Томсон высказался спустя четыре десятилетия: «Эти эксперименты носили исследовательский характер; прибор имел простую конструкцию и не предназначался для получения наиболее точных результатов... Эти результаты были настолько удивительными, что казалось более важным провести общий обзор предмета, чем пытаться улучшить определение точного значения отношения массы частицы к массе атома водорода» [18, с. 337].

Из анализа данных эксперимента Томсон пришел к выводу, что для определения значений m/e метод, основанный на отклонении катодных лучей в электрическом поле гораздо менее трудоемок и, вероятно, более точен, чем предыдущий метод, однако его нельзя использовать в столь широком диапазоне давлений, рис. 12 [16, с. 310]. Тем не менее его эксперимент был далек от точности. Нужно отметить, что в статье Томсона не приводится статистическая обработка данных экспериментов и все значения определяющих величин записаны без единиц измерения. Приведенные единицы измерения у некоторых величин в табл. 1 и 2 сделаны автором данной статьи. В литературе XIX в. в качестве единицы измерения массы использовался грамм g , а заряда — электростатическая единица $e.s.u$, которая называлась статкулоном (*statcoulomb* или *statC*). В совре-

менной системе измерений (СИ) $1 \text{ C (кулон)} = 2,997925 \times 10^9 \text{ statC}$ или $e.s.u.$, а $1 \text{ statC} \approx 3.33564 \times 10^{-10} \text{ C}$. В литературе того периода времени использовалась электромагнитная единица измерения $e.m.u.$, которая называлась абкулон (*abcoulomb* или abC или aC). В современной системе СИ $1 \text{ coulomb} = 1 \times 10^{-1} \text{ abC}$ или $e.m.u.$ [19].

Томсон рассмотрел только два источника ошибок в своем эксперименте [20]. Во-первых, предполагалось, что магнитная сила ограничена пространством между электрическими пластинами, что верно лишь приблизительно. Это была систематическая ошибка, которая увеличивала измерение m/e , и он не пытался оценить увеличение. Во-вторых, при любом отклонении катодные лучи распределяются по спектру. Вместо яркого флуоресцентного пятна на конце трубки Томсон наблюдал пятно длиной в несколько миллиметров, что привело к ошибке до 20 %. Это значение зависит от того, измерял ли он электростатическое и магнитное отклонения последовательно, или же он противопоставлял их, чтобы получить нулевое отклонение, что по своей сути является более точным методом.

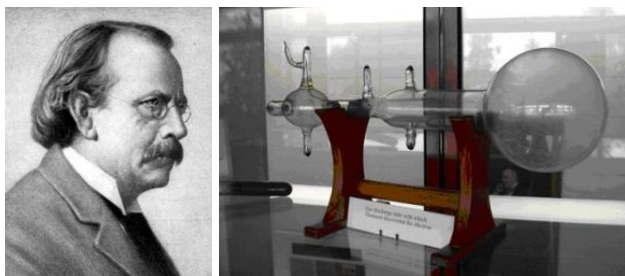


Рис. 12. Джозеф Джон Томсон (Sir Joseph John Thomson) и его катодная трубка (экспонат Музея науки в Лондоне).

Fig. 12. Sir Joseph John Thomson and his cathode tube (exhibit at the Science Museum in London)

Анализируя полученные результаты экспериментов на основе двух методов, Дж. Дж. Томсон сделал вывод о том, что значение m/e для исследуемой неизвестной частицы зависит от индукции магнитного поля и от напряженности электрического поля (т. е. от разности потенциалов между пластинами). При этом было установлено, что значение m/e не зависит не только от химических свойств остаточного газа в трубке и ее геометрической формы, материала электродов, но и от скорости катодных лучей (в опытах Томсона 1897 г. эта скорость составляла $0,1c$, где c — скорость света в вакууме), а также иных физических параметров. Катодные лучи оказались все же потоком отрицательных частиц, а не ионами остаточного газа, испускаемых катодом, как полагал Крукс.

В статье Томсон величину m/e неизвестной частицы сравнил с аналогичной величиной, полученной для водородного иона в электролизе, в результате оказалось, что она в 1000 раз меньше. Таким образом, для носителей электричества в катодных лучах величина m/e очень мала по сравнению со значением этой величины для носителей заряда в электролизе. Малость величины m/e может быть объяснена малым значением массы m или большим значением заряда e . Как установил Дж. Дж. Томсон, масса неизвестной частицы оказалась примерно в 2000 раз меньше массы атома водорода ($m_{H_2} = 1,67 \times 10^{-24} g$), легчайшего среди всех атомов. В статье Томсон не указал окончательное значение m/e .

В предположении того, что неизвестные частицы имеют удельный заряд постоянной величины, Дж. Дж. Томсон позже получил величину отношения массы частицы к ее заряду, равную $m/e = 0,588 \times 10^{-7} g/CGSS$ [21]. О высокой точности его эксперимента говорит то факт, что современное значение этого отношения равно $m/e = (0,588 \pm 0,002) \times 10^{-7} g/CGSS$.

8. От абстрактной математической гипотезы к эмпирической реальности

Томсон был уверен в своих результатах значения m/e с точностью до последнего знака или около этого, что он считал достаточно хорошим значением. Экспериментальная работа Томсона и его идеи об корпускулах были подтверждены многими другими учеными. Самым известным из них был немецкий физик Вальтер Кауфман (нем. *Walter Kaufmann*, 05.06.1871—01.01.1947). Кауфман в 1896—1898 гг., будучи ассистентом Физического института в Берлине, начал исследования магнитного отклонения катодных лучей, пытаясь определить первое приближение отношения заряда микрочастицы (электрона) к массе (e/m). В 1897 г. Кауфман одновременно с Дж. Дж. Томсоном вычислил отношение e/m для катодных лучей. Его наиболее точное значение этого отношения было $e/m = 1,865 \times 10^7 \text{ cgs/gm}$ ($m/e = 0,53619 \times 10^{-7} \text{ gm/cgs}$). Результаты у обоих экспериментаторов были близкими, однако Кауфман, в отличие от Томсона, был осторожен в своих выводах, и слава первооткрывателя электрона досталась Томсону. Несколько ученых, включая Кюри, вместе с Томсоном номинировали Кауфмана на Нобелевскую премию, мотивируя это тем, что теория Томсона не была бы принята без подтверждающих доказательств Кауфмана.

Нужно отметить, что Томсон и Кауфман не были первыми в нахождении отношения заряда микрочастицы (электрона) к массе (e/m). Первым

ученым, сообщившим об открытии микрочастицы (электрона), был Эмиль Вихерт из Кёнигсбергского университета (нем. *Johann Emil Wiechert*, 26.12.1861—12.03.1928 of Königsberg). В конце обстоятельной лекции, прочитанной 7 января 1897 г. перед *Physikalisch-ökonomische Gesellschaft* и озаглавленной «О природе электричества» (нем. *Ueber das Wesen der Elektrizität*), он обратился к «экспериментальным фактам о природе катодных лучей» [22]. Из собственных исследований отклонения катодных лучей в магнитном поле он пришел к следующему выводу: «Если предположить, что катодные лучи состоят из материальных частиц (масса m), несущих отрицательный электрический заряд e (полученный из деления электролитических констант F на примерно известное число Авогадро N), то отношение m/e находится между $1/4000$ и $1/400$ отношения, наблюдаемого для легчайшего иона, или: «Верхний предел без сомнения показывает, что катодные лучи не могут представлять обычные химические атомы» [23]. Нужно заметить, что исследования Вихерта по катодным лучам занимали небольшую область в его научных интересах, в основном он занимался сейсмологией и наиболее известен как разработчик сейсмографов.

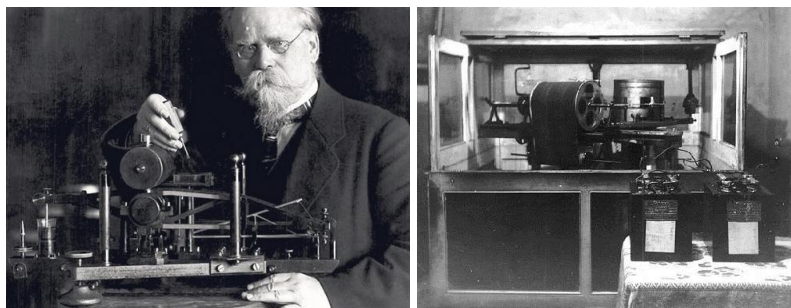


Рис. 13. Эмиль Вихерт и сейсмограф его конструкции.

Fig. 13. Emil Wiechert and the seismograph of his design

Ряд физиков с утверждениями Томсона не соглашались. Предположение, что атомы могут состоять из корпускул, воспринималось с трудом, так как эксперименты Томсона не были достаточно убедительными. Томсон позже писал об этих событиях: «Сначала было очень мало тех, кто верил в существование этих тел, меньших, чем атомы. Много лет спустя один выдающийся физик, присутствовавший на моей лекции, даже сказал мне, что, по его мнению, я “дурачил их”. Я не удивился этому, так как сам пришел к такому объяснению своих экспериментов с большой неохотой, и только после того, как убедился, что эксперимент не оставляет сомнений, я опубликовал свою веру в существование тел меньших, чем атомы» [18, с. 325].

Постепенно ученые приняли первые две гипотезы: 1. Катодные лучи — это заряженные частицы (корпускулы). 2. Корпускулы — это составные части атома. Более поздние эксперименты показали, что третья гипотеза (Корпускулы — единственные составляющие атома) неверна, благодаря усилиям Эрнеста Резерфорда и последующих исследователей.

Основная причина, по которой результаты эксперимента с m/e быстро стали весомыми, заключалась в том, что эти ученые также поддерживали альтернативное предложение Фицджеральда об электронах¹⁰. В его представлении катодные лучи были «электронами», независимыми от вещества. Работа Томсона быстро получила широкое признание, особенно после его экспериментов 1899 г., которые показали, что заряд равен единице электролитического заряда [24]. Лоренц, чья теория электронов была похожа на теорию Лармора и оказала гораздо большее влияние на сторонников волновой теории, ухватился за электронную интерпретацию и включил ее в свою теорию. Более того, «свободный электрон» был своего рода структурой в эфире. Следовательно, это предположение было приемлемо даже для сторонников эфирного взгляда на катодные лучи.

Фундаментальные экспериментальные исследования по газовому разряду Томсон изложил в трех статьях, когда ему было около 40 лет. Его первая статья была опубликована журнале *Philosophical Magazine* в 1897 г. [16], вторая — «О заряде, переносимом ионами, образующимися рентгеновскими лучами» (англ. *On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays*) [25], появилась в декабре 1898 г. и третья — «О массах ионов в газах при низких давлениях» (англ. *On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures*) вышла в декабре 1899 г. [26]. На последних пяти страницах этой статьи 1899 г. был представлен новый взгляд на ионизацию и электропроводность в газах. Эти пять страниц стали кульминацией усилий Томсона по обоснованию существования электрона.

Последующие два года, 1897—1899 гг., Дж. Дж. Томсон исследовал фотоэффект по экспериментальной методике, подобной той, что он пользовался при исследовании свойств катодных лучей. В результате он показал, что ток между двумя противоположно заряженными пластинами при освещении катода ультрафиолетовыми лучами есть поток отрицательно заряженных частиц. В работе по проведенным исследованиям, опубликованной в 1899 г., он отмечает, что электрический ток от угольной нити накала в вакуумной лампе тоже переносится отрицательно заряженными

¹⁰ Ирландский физик Джордж Стоней (George Johnstone Stoney, (15.02.1826—05.07. 1911) в 1891 г. в одной из своих теоретических работ предложил термин «электрон» для обозначения электрического заряда одновалентного иона при электролизе [25].

частицами (электронами) [27]. Исходя из этого, эффект Эдисона представляет собой движение электронов от отрицательно заряженной нити накала к положительно заряженному дополнительному холодному электроду. А это и есть не что иное, как электрический ток в вакууме.

Томсон указал на экспериментальное явление, в котором с неизвестной отрицательной частицей катодных лучей можно проводить ее идентификацию, влиять на нее и экспериментировать. Это наглядно было показано в его эксперименте по отклонению катодных лучей в магнитном и электрических полях при определении m/e , что позволило с пониманием сущности явления провести измерения. Дж. Дж. Томсон определил только соотношение массы и заряда m/e неизвестной отрицательной частицы катодных лучей. По полученным экспериментальным данным она была намного меньше любого атома. Только через 12 лет, в 1911 г. эта частица под названием электрон была исследована более точно (был измерена минимальный электрический заряд, который может нести эта частица). Благодаря эксперименту m/e электронная теория превратилась из абстрактной математической гипотезы в эмпирическую реальность.

В 1906 г. Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию по физике «в знак признания его выдающихся заслуг в области теоретических и экспериментальных исследований проводимости электричества в газах». На церемонии презентации лауреата Дж. П. Класон, член Шведской королевской академии наук, поздравил Томсона с тем, что он «дал миру несколько главных трудов, позволяющих натурфилософу нашего времени предпринять новые исследования в новых направлениях».

9. Экспериментальные исследования О. У. Ричардсона

В 1900 г. выпускник Тринити-колледжа (*Trinity College*) при Кембриджском университете Оуэн Уилланс Ричардсон (*Sir Owen Willans Richardson*, 26.04.1879—15.02.1959, рис. 14) стал сотрудником Кавендишской лаборатории. Во время учебы в университете он занимался в этой лаборатории под руководством Дж. Дж. Томсона вместе с другими студентами, в числе которых были Эрнест Резерфорд, Чарлз Т. Р. Вильсон (*Charles Thomson Rees Wilson*), Гарольд А. Вильсон (*Harold A. Wilson*) и Поль Ланжевен.

Первая научная работа Ричардсона [28] в качестве студента-исследователя была посвящена поиску физических эффектов в рамках новой гипотезы Томсона об излучении металлической проволокой, нагреваемой переменным током. Эта гипотеза Томсона об электрических токах, переносимых корпускулами, заключалась в том, что, поскольку в проводе,

несущем переменный ток высокой частоты, движущиеся частицы будут ограничены лишь очень тонким слоем у поверхности, было бы разумно ожидать, что проволока испускает какое-то излучение, либо в форме ионов или частиц, либо в виде рентгеновского излучения, возникающего, когда быстро колеблющиеся частицы сталкиваются с атомами в проводе. В начале Ричардсон попытался обнаружить такое излучение с помощью фотографической пластинки, которая показывала темную линию при приближении к проводу, однако, это оказался световой разряд вокруг провода. После этого он применил чувствительный электрометр для поиска ионизации в газе возле провода в диапазоне давлений от одной атмосферы до 0,01 мм рт. ст. Все результаты экспериментов с более тонкими проволоками из разных металлов оказались отрицательными.

Сделав соответствующие выводы, Ричардсон в следующей своей экспериментальной работе в качестве отправной точки взял исследования температурной зависимости тока насыщения от температуры нагретой металлической проволоки немецких физиков Ю. Эльстера и Г. Гейтеля, а также его знакомого по лаборатории Джона Миклелленда (*John Alexander McClelland*, 01.12.1870—13.04.1920). Миклелленд показал, что при высоких температурах платиновая проволока испускает отрицательное электричество, и что объем выбросов увеличивается с повышением температуры [29].

Ричардсон решил сосредоточиться на эффекте при очень низких давлениях, когда влияние окружающего газа можно было считать незначительным, и исследовать температурную зависимость тока насыщения от нагретой проволоки, т. е. количества электронов, испускаемых в единицу времени. Устройство, которое он сконструировал для этого исследования (рис. 14б [30]), было модифицированной версией того, что он использовал в своей более ранней работе (рис. 14а [28]). Вторая экспериментальная работа Ричардсона в отношении оборудования и экспериментальной техники для исследования теплового излучения корпускул была тесно связана с его неудачной попыткой обнаружить излучение переменного тока.

В экспериментах Ричардсон исследовал электропроводность пространства, окружающего горячую поверхность платиновых проволок. При обработке экспериментальных данных оказалось, что ток эмиссии от нагретой платиновой проволоки экспоненциально зависит от ее температуры. При этом вид аппроксимирующей функции очень похож на уравнение Аррениуса, описывающее зависимость скорости реакции v от температуры T :

$$v = v_0 e^{-E_a/RT}, \quad (9)$$

где T — температура реакции в градусах Кельвина ($^{\circ}K$), E_a — энергия активации, v_0 — скорость, которую имела бы реакция при нулевой энергии активации, R — универсальная газовая постоянная.

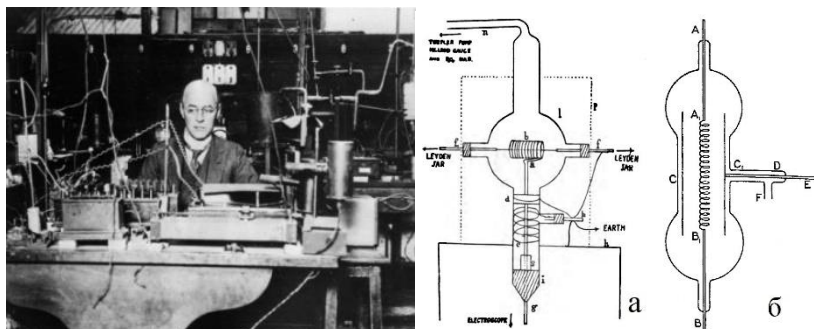


Рис. 14. Сэр Оуэн Уилланс Ричардсон в Кавендишской лаборатории.
 Устройства в экспериментах Ричардсона: а — для поиска излучения от проволоки при переменном токе (1901 г.) [28], б — для определения плотности тока при термоэлектронной эмиссии (1903 г.) [30].

Fig. 14. Sir Owen Willans Richardson at the Cavendish Laboratory. Devices in Richardson's experiments: a — to search for radiation from a wire at alternating current (1901) [28], b — to determine the current density during thermionic emission (1903) [30]

Опираясь на проведенные исследования, Ричардсон высказал гипотезу о том, что корпускулы внутри нагретого проводника, достигнув поверхности, могут покинуть его, если их кинетическая энергия достаточно велика, чтобы преодолеть силы, удерживающие их в материале. Иначе говоря, электронный газ может испаряться с горячей поверхности. Ричардсон сформулировал эмпирический закон¹¹, исходя из распределения скорости электронов Максвелла — Больцмана для плотности эмиссионного тока насыщения j_s , который можно измерить при достаточно высоком потенциале анода относительно горячего катода (в его экспериментах это 120 В) [30]:

$$j_s = AT^{1/2}e^{-b/T}, \quad (10)$$

где j_s — плотность тока эмиссии в амперах на единицу поверхности катода (A/cm^2), T — температура катода в $^{\circ}K$, A и b — постоянные, зависящие от материала катода.

Формула (10) стала известна как закон Ричардсона: «Если отрицательное излучение возникает из-за корпускул, выходящих из металла, то ток насыщения s должен подчиняться закону». Закон Ричардсона связыва-

¹¹ В 1928 году Ричардсону была присуждена Нобелевская премия по физике «за работы по термийонным исследованиям, и особенно за открытие закона, носящего его имя».

ет скорость испускания электронов с химическим составом нити и температурой ее поверхности. По этой формуле можно определить величину плотности тока j_s термоэлектронной эмиссии (тока насыщения).

Предварительный отчет о некоторых экспериментах с платиной был представлен Ричардсоном в Кембриджском философском обществе 25 ноября 1901 г., после чего последовала публикация в трудах этого общества [30]. Ричардсон провел исследования [28] и [30] в возрасте 22 лет, будучи студентом Тринити-колледжа.

Эксперименты, проведенные в последующие 12 лет, а также полученные позже с пластичной формой вольфрама, полностью подтвердили закон Ричардсона [31]. Этот закон утверждает, что скорость испускания электронов быстро возрастает с увеличением температуры поверхности. В 1928 г. Ричардсону была присуждена Нобелевская премия по физике «за работы по термионным¹² исследованиям, и особенно за открытие закона, носящего его имя».

Нужно отметить, что в 1923 г. американский ученый С. Дэшмен (*Saul Dushman*, 07.12.1883—07.07.1954) опубликовал новую формулу для термоэлектронной эмиссии на основе квантовой теории, в то время как Ричардсон получил формулу (10) на основе классической электронной теории металлов. Формула была получена Дэшменом из рассмотрения электронного испарения из металла как термодинамически эквивалентного испарению одноатомного газа [32].

$$j_s = A_1 T^2 e^{-b/T}, \quad (11)$$

где $A_1 = 60,2$.

Формула Дашмена, как видно из (11), отличается от (10) только значением коэффициента A и степенью температуры.

Проведенные эксперименты показали, что значения плотности тока эмиссии, получаемые на основании формул *Ричардсона* и *Дэшмена*, значительно расходятся для низких температур, давая более совпадающие результаты в рабочем интервале температур катода. Для практических подсчетов русским ученым радиотехником В. И. Волынкиным была предложена упрощенная формула [33]:

$$j_s = A_0 10^{-a/T}, \quad (12)$$

где коэффициенты A_0 и a определяются из эксперимента.

¹² В 1909 году Ричардсон предложил новый термин термионика (учение о термоэлектронных процессах) для обозначения эффекта испускания электрических зарядов раскаленными телами.

В рабочем интервале температур формула Воынкина (12) дает весьма удовлетворительные совпадения с результатами, полученными по формулам (10) и (11). Эти формулы могут быть использованы в некоторых случаях для расчета термоэмиссии у торированных и оксидированных катодов. В этом случае константы, входящие в эти формулы, должны быть найдены из экспериментов с соответствующими катодами.

В литературе формулу (11), обычно, называют формулой Ричардсона — Дэшмена. Ричардсон доказал, что электронная эмиссия при повышенной температуре свойственна всем проводникам и не связана с наличием газа внутри лампы [34]. Это окончательно опровергло утверждения, что термоэлектронная эмиссия есть результат особой реакции между газом в баллоне и материалом катода.

10. Заключение

Эксперименты с катодными лучами привели Томсона к мысли, что эти лучи состоят из легких частиц с отрицательным электрическим зарядом, так называемых корпускул. Это, пожалуй, один из главных результатов его экспериментов по выяснению природы катодных лучей.

К 1900 г. спор о катодных лучах практически прекратился. К этому времени стало ясно, что Дж. Дж. Томсон был прав и что частицы катодных лучей являются неотъемлемой частью атомной структуры, а слово «электрон» неразрывно связано с этими частицами. Термин «корпускула» Томсона был забыт, но он придал «электрону» важную значимость, поскольку он был элементарной частицей, первой из обнаруженных и фундаментальным составным элементом атомов.

Из результатов научных исследований, проведенных Дж. Дж. Томсоном, наиболее важными для радиоэлектроники явились следующие. Пояснение природы эффекта Эдисона и установление зависимости стабильности электрического тока в катодной трубке от степени разреженности в ней вакуума. Если бы на этот последний результат обратили внимание разработчики электронных ламп, то возможно «жесткие» радиолампы появились бы гораздо раньше, а не через 15 лет после работ Дж. Дж. Томсона.

Термоэлектронная эмиссия изучалась различными исследователями в последнее десятилетие XIX в., но Ричардсон впервые опубликовал в 1901 г. количественную интерпретацию этого явления как выделения газа свободных частиц, присутствующих в любом проводящем материале. Исследования О. У. Ричардсона позволили отойти от прямого копирования нитей накала обычных электрических ламп и использования их в радиолампах. Английский физик показал, что нити накаливания радиоламп требуют несколько иного подхода при их конструировании, нежели обычные осветительные.

Список литературы

1. Perrin J. Nouvelles propriétés des rayons cathodiques // Notes aux comptes-rendus de l'Académie des Sciences. 1895. V. 121. P. 1130–1134.
2. Jean Perrin (ab). URL: https://www.wikiwand.com/fr/Jean_Perrin (11.10.2020).
3. Perrin Jean. New experiments on the kathode rays // Nature. January 30, 1896. Vol. 53. P. 298–299.
4. Schuster A. The Bakerian Lecture : Experiments on the Discharge of Electricity through Gases. Sketch of a Theory // Proceedings of the Royal Society of London. 1884. Vol. 37. P. 317–339.
5. Schuster A. Bakerian Lecture: The Discharge of Electricity through Gases. (Preliminary Communication) // Proceedings of the Royal Society of London. 1889. Vol. 47. P. 526–561.
6. Pippard Brian, J. J. Thomson and the Discovery of the Electron // Europhysics News. 1997. Vol. 28, no. 2. P. 42–43.
7. Thomson J. J. On the Velocity of the Cathode-Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1894. Vol. 38, no. 233. P. 358–365.
8. Thomson J. J. and Rutherford E. On the Passage of Electricity through Gases exposed to Röntgen Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. November 1896. Vol. 42. P. 392–407.
9. Thomson J. J. On the Cathode Rays // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1897. Vol. 9. P. 243–244.
10. Dean K. Discovery : 200 Years of the Cambridge Philosophical Society. URL: <https://specialcollections-blog.lib.cam.ac.uk/?p=17330> (30.10.2020).
11. Thomson J. J. On the kathode rays // Nature. March 11, 1897. Vol. 55. No. 1428. P. 453.
12. Thomson J. J. Cathode Rays // Proceedings of the Royal Institution of Great Britain. April 30, 1897. Vol. 15. P. 419–432.
13. Larmor J. A. Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1894. Vol. 185. P. 719–822.
14. Thomson J. J. Cathode Rays // The Electrician. May 21, 1897. Vol. 39. P. 104–109.
15. Editorial. The Electrician July 2, 1897. Vol. 39. P. 299.
16. Thomson J. J. Cathode Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1897. Vol. 44. P. 293–316.
17. De la Rue W., Muller H. W. Experimental Researches on the Electric Discharge with the Chloride of Silver Battery. Part IV Tube-potential // Proceedings of the Royal Society of London. 1883. Vol. 35. P. 477–517.
18. Thomson J. J. Recollections and Reflections. London : G. Bell and Sons, Ltd., 1936. 595 p.
19. Kennelly A. E. Magnetic units and other subjects that might occupy attention at the next international electrical congress. In : 20th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Niagara Falls, N. Y., July 2, 1903. P. 529–536.
20. Falconer I. J. J. Thomson and the discovery of the electron // Physics Education. 1999. Vol. 32. P. 226–231.
21. Smith G. E. J. J. Thomson and The Electron : 1897–1899. An Introduction // The chemical educator. 1997. Vol. 2, no. 6. P. 1–42.
22. Wiechert E. Ueber das Wesen der Elektrizität // Schriften der Physikalisch-Ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg. 1897. Vol. 38. P. 3–12.
23. Wiechert E. Experimentelles über die Kathodenstrahlen // Schriften der Physikalisch-Ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg. 1897. Vol. 38. P. 12–16.
24. Ray T. P. Stoney's Fundamental Units Show affiliations // Irish Astronomical Journal. 1891. Vol. 15. P. 152.

25. Thomson J. J. On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1898. Vol. 46. P. 528–545.
26. Thomson J. J. On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. December 1899. Vol. 48. No. 295. P. 547–567.
27. Kamble V. B. Thomson J. J. The Discovery of the Electron.
URL: <https://vigyanprasar.gov.in/thomson-j-j/> (24.10.2020).
28. Richardson O. W. On an Attempt to Detect Radiation from the Surface of Wires Carrying Alternating Currents of High Frequency // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. October 29, 1900 – May 19, 1902. 1901. Vol. 11. Part 3. P. 168–178.
29. McClelland J. A. On the Conductivity of Gases from an Arc and from Incandescent Metals // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. October 31, 1898 – May 21, 1900. Vol. 10. P. 241–257.
30. Richardson O. W. On the Negative Radiation from Hot Platinum // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. October 29, 1900 – May 19, 1902. 1901. Vol. 11. Part 4. P. 286–295.
31. Richardson O. W. The Electrical Conductivity imparted to a Vacuum by Hot Conductors // Proceedings of the Royal Society of London. January 1, 1902. Vol. 71. P. 415–418.
32. Dushman S. Electron Emission from Metals as a Function of Temperature // Physical Review. June 1923. Vol. 21. P. 623–636.
33. Волинкин В. И. Эмпирическая зависимость электронной эмиссии от температуры // Телеграфия и телефония без проводов. 1927. № 44. С. 495—508.
34. Richardson O. W. The Emission of Electrons from Tungsten at High Temperatures : An Experimental Proof That the Electric Current In Metals Is Carried By Electrons // Science. July 11, 1913. Vol. 38 (967). P. 57–61.

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.

УДК 621.37-621.39(091)

Применение катодно-лучевых технологий для усиления электрических сигналов

Пестриков В. М.

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

Получено: 20 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 25 ноября 2020 г.

Принято к публикации: 27 ноября 2020 г.

Аннотация: Усилительная электронная лампа австрийского физика Роберта фон Либена занимает важное место в истории усилительной техники электрических сигналов. Первоначально это устройство не было разработано для беспроводной телеграфии, а предназначалось для усиления телефонных токов. Электронные лампы были созданы после многих попыток в лаборатории Либена, в которой работали выдающиеся физики, такие как Е. Рейс и С. Штраус. Вопросы применения катодно-лучевых технологий для усиления телефонных сигналов занимались в основном в Австро-Венгерской империи. Помимо Либена, в этом направлении работал Юлиус Нардин в Словении.

Ключевые слова: телефонная трансляция, катодное реле, усилительная электронная лампа, Роберт фон Либен, Евгений Рейс, Зигмунд Штраус, Юлиус Нардин.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Применение катодно-лучевых технологий для усиления электрических сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 360—383.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Применение катодно-лучевых технологий для усиления электрических сигналов / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 360—383.

Application of cathode-ray technologies for amplification of electrical signals

V. M. Pestrikov

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

Received: November 20, 2020

Peer-reviewed: November 25, 2020

Accepted: November 27, 2020

Abstract: *The amplifying vacuum tube of the Austrian physicist Robert von Lieben occupies an important place in the history of the amplifying technology of electrical signals. This device was not originally designed for wireless telegraphy but was intended to amplify telephone currents. Vacuum tubes were created after many attempts in the laboratory of Lieben, in which eminent physicists such as E. Reis and S. Strauss worked. The use of cathode ray technologies to amplify telephone signals was mainly dealt with in the Austro-Hungarian Empire. Besides Lieben, Julius Nardin worked in this direction in Slovenia.*

Keywords: *telephone repeater, cathode relay, amplifying vacuum tube, Robert von Lieben, Eugen Reis, Siegmund Strauss, Julius Nardin.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Application of cathode-ray technologies for amplification of electrical signals,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 360–383, 2020. (In Russ.).

1. Введение

К началу XX века в Европе и США уже существовала разветвленная телефонная сеть, которая продолжала покорять все новые пространства. Однако ее продвижение начало тормозиться, телефонному сигналу стало трудно преодолевать большие расстояния. Для решения этой проблемы необходимо было усилить телефонный сигнал. Срочно понадобился усилитель для подобного типа сигналов. О ценности и полезности такого телефонного усилителя говорит тот факт, что в 1899 г. президент компании *The Erie Telegraph and Telephone Co. Charles J. Glidden*¹ объявил о премии \$1 млн тому, кто его сконструирует.

¹ Charles Jasper Glidden (29.08.1857—11.09.1927) основал телефонную компанию в Лоуэлле (Lowell, Mass.), штат Массачусетс, в 1878 г. после того, как за год до этого увидел выставку Александра Грэма Белла на Столетней выставке в Филадельфии. В 1901 г. продал свою компанию Беллу. Он стал частным лицом, увлекся автомобилями и кругосветными путешествиями на них.

Телефонной технологии требовалось «реле», как это было ранее в телеграфной технике, то есть устройство, которое усиливало передачу входящих слабых токов за счет взаимодействия со специальным источником электроэнергии. Поскольку телефонные токи, в отличие от телеграфных, представляют собой чрезвычайно сложные переменные токи, создание телефонного реле представляло гораздо большие трудности, чем известное телеграфное реле. Было испробовано несколько более или менее остроумных решений, но ни одно из них не принесло удовлетворительных результатов.

Данная статья совместно с [1—3] завершает цикл из 4-х статей, которые посвящены открытию катодных лучей, формированию катодно-лучевых технологий и их применению к усилению электрических сигналов. В этих статьях автор отобразил в основном научные исследования, которые носили фундаментальный характер и повлияли на развитие различных направлений науки и техники. Характерной чертой этих статей является то, что в них показаны научные будни ученых и их подходы к решению научных проблем. Во многих случаях рассмотрены оригиналы работ ученых, которые принесли им известность. Многие оригиналы статей и патентов ученых ранее были недоступны отечественным научным работникам. Автор надеется, что прочтение его статей молодыми учеными, поможет им в выборе научного направления и подвигнет их на новые научные открытия, которые принесут славу России.

2. Усиление телефонных сигналов на рубеже XIX и XX вв.

Первый телефонный передатчик (микрофон) Александра Белла был электромагнитного типа и не мог усиливать звук. Требовалась только сила самого голоса, чтобы преодолеть потери в линии и издать слышимый звук на другом конце телефонной линии. С таким устройством вести разговор можно было только на небольшом расстоянии. Ближайшая перспектива междугородной связи не казалась слишком радужной. Прогресс в появлении работоспособных телефонных реле для усиления звука наметился только в 1877 г., когда американский картограф Фрэнсис Блейк (англ. *Francis Blake, Jr.*, 25.12.1850—20.01.1913) изобрел микрофон с угольными гранулами и запатентовал (CA10021, US250126) его до того, как Томас Эдисон изобрел аналогичный микрофон, в котором также использовались мелкодисперсный уголь. Компания Александра Белла выкупила у Блейка его патент с условием, что у каждого микрофона, на каждом аппарате должна быть надпись «Передатчик Блейка» (англ. *Blake Transmitter*). Этим

он шокировал и Томаса Ватсона, помощника Белла, который считал, что вклад каждого изобретателя заслуживает внимания.

Угольный микрофон (*carbon microphone*) представляет собой устройство с переменным сопротивлением, состоящим из мелких углеродных гранул, которое управляет протеканием тока от источника постоянного тока, а не просто преобразует акустическую энергию в электричество. Эта технология усиления мощности стала основой первых практических телефонных систем.

Конструкции первых телефонных усилителей, или как их тогда называли телефонных ретрансляторов (англ. *Telephone Repeater*), представляли собой комбинацию электромагнитного телефона (приемника) и угольного микрофона. В 1878 г. Дэвид Юз (англ. *David Edward Hughes*), а в 1898 г. Оливер Лодж (англ. *Oliver Lodge*) [4] сконструировали телефонное реле, которое было подобно телеграфному реле [5]. В этом реле колебания мембраны электромагнитного приемника (телефона) приводили к разрыву микроконтакта в первичной цепи повышающего трансформатора. Процесс размыкания-замыкания контакта приводил к появлению переменного низкочастотного тока. В результате действия электромагнитной индукции во вторичной обмотке трансформатора возникал переменный ток большей величины. Принцип действия микрофонного реле показан на рис. 1 [6]. Эта конструкция из-за несовершенства микрофонов и телефонных диафрагм не нашла применения на практике, так как вторичный ток не совпадал по форме с первичным током, что приводило к искажениям речи.

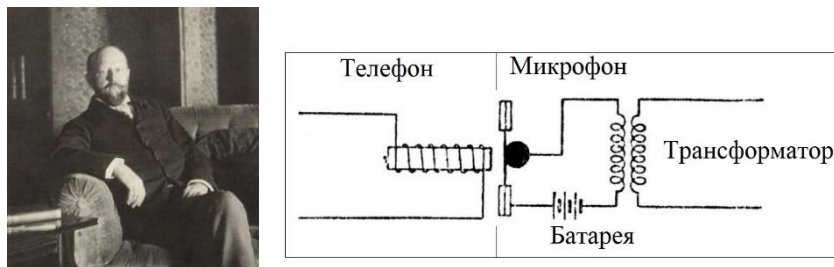


Рис. 1. Изобретатель угольного микрофона Фрэнсис Блейк Младший (фото сделано Вильямом Вэбстером в 1901 г.) и принципиальная схема телефонного ретранслятора с использованием угольного микрофона.

Fig. 1. The inventor of the carbon microphone, Francis Blake the Younger (photo taken by William Webster in 1901) and the circuit diagram of a telephone repeater, using the carbon microphone

Долгое время не удавалось сконструировать устройство с приемлемым качеством усиления звука. В 1903 г. инженеру компании Bell Гербер-

ту Шриве (англ. *Herbert E. Shreeve*, 01.08.1873—25.04.1942) было поручено разработать практический механический усилитель. До него изобретатели в устройстве усиления соединяли диафрагмы телефонов и микрофонов для выполнения функций приема или излучения звука. Шриве же отказался вообще от этих диафрагм и заменил их простым плунжером, который приводился в движение приемной катушкой телефона и прижимался к углеродным гранулам микрофона (передатчика), рис. 2а [7]. Этот механический ретранслятор был усовершенствован Шриве до такой степени, что он получил на него патент и устройство стало использоваться в коммерческих целях, рис. 2б [8]. Ретранслятор Шриве был одним из первых механических усилителей, который использовался в течение более 10 лет, прежде чем они были заменены ретрансляторами на вакуумных электронных радиолампах.

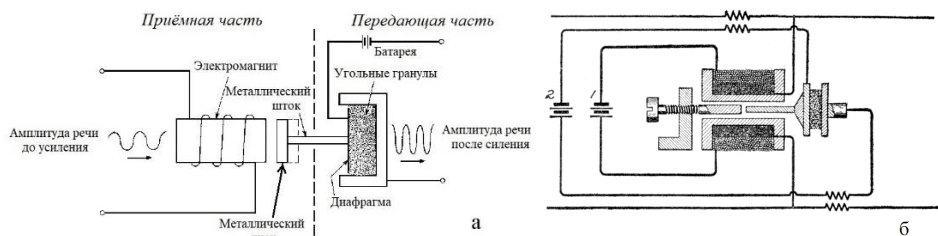


Рис. 2. Принцип работы (а) [7] и типовая схема (б) [8] включения усилителя Шриве в телефонную линию (1903 г.).

Fig. 2. The principle of operation (a) [7] and a typical circuit (b) [8] for connecting the Schreeve amplifier to a telephone line (1903)

Одной из проблем ранних конструкций ретрансляторов была «упаковка» гранул углерода в корпусе микрофона. Шриве обнаружил, что из-за выделения тепла в углеродной камере происходит расширение угольного порошка. В его первой удачной лабораторной модели в качестве соединительного звена между приемником и микрофоном использовалась натянутая стальная полоса, причем микрофон был сконструирован таким образом, чтобы при расширении его частей под действием тепла гранулированный углерод между электродами не подвергался повышенному давлению. Первый успешный тест работы ретранслятора (рис. 3) был проведен в 1904 г. на телефонной линии протяженностью в 65 км между городами Эймсбери (*Amesbury, Massachusetts*) и Бостоном (*Boston*). Тест показал большую разборчивость при передаче длинных предложений несвязанных слов, в сравнении с тем, что можно было получить в схеме без повторителя. Механический усилитель хотя и был далек от совершенства, но это

был единственный вариант усиления телефонных сигналов на то время, который решал практические задачи.

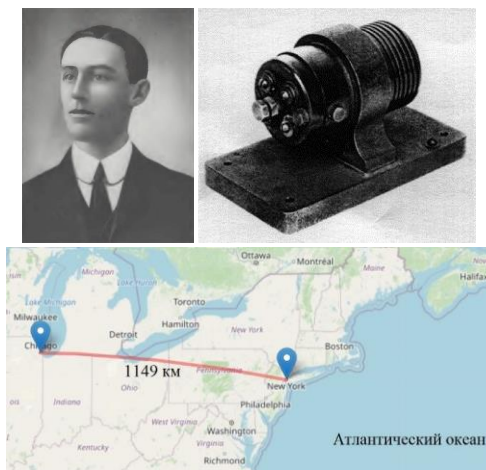


Рис. 3. Герберт Шриве и его первая конструкция механического усилителя (1904 г.), который использовался в коммерческих целях на линии Нью-Йорк — Чикаго с августа 1904 по февраль 1905 гг.

Fig. 3. Herbert Schreeve and his first mechanical amplifier design (1904), which was used commercially on the New York-Chicago line from August 1904 to February 1905

В механических усилителях искажения при воспроизведении голоса были связаны с инерцией подвижных частей. Это и стало причиной к созданию конструкции реле на базе управляемых газоразрядных трубок. В 1904 г. американский инженер-электрик Питер Хьюитт (англ. *Peter Cooper Hewitt*, 05.05.1861—25.08.1921) описал такое устройство в полученном им патенте «Методы воздействия электрическими колебаниями» (англ. *Means for reproducing electrical variations*) [9]. В патенте приведено две схемы газоразрядных устройств и показаны методы управления в них электрическим током с помощью магнитного поля соленоида, рис. 4. Нужно заметить, что газоразрядные лампы Хьюитта были разновидностью вакуумной трубки Гейслера, в которых анод был металлическим, а в качестве катода использовалась ртуть. При приложении к аноду высокого положительного напряжения или при наклоне лампы до кратковременного касания ртути анода, происходила ионизация паров ртути и зажигалась электрическая дуга².

² Электрическая дуга или дуга Петрова представляет собой один из видов электрического разряда в газе. Присутствие свободных электрических зарядов обеспечивает проводимость электрической дуги. При увеличении напряжения между двумя электродами до определенного уровня в воздухе происходит электрический пробой и возникает искровой разряд, который импульсно замыкает электрическую цепь.

В тексте патента Хьюитт отмечает: «Я обнаружил, что сопротивление этих ламп может контролироваться другими средствами, кроме тех, которые изложены в упомянутых мною патентах, а лампы могут использоваться как очень чувствительные устройства для изменения сопротивления электрической цепи. Например, на сопротивление этих ламп легко влияет магнитное поле в непосредственной близости от них, и изменение поля может восприниматься как изменение электрического сопротивления лампы» [9]. Из рис. 4а видно, что первичные токи подводятся к катушке 5 и ее магнитное поле вызывает изменение высоковольтного тока, протекающего через ртутную лампу. На рис. 4б в первичную цепь с электромагнитом включен микрофон. При воздействии звуковых волн на его мембрану происходит изменение магнитного поля электромагнита, которое, воздействуя на ток в газоразрядной лампе, вызывает его изменение. Другими словами, небольшие воздействия внешнего магнитного поля приводят к изменениям высоковольтного тока в газоразрядной лампе, которые могут быть зафиксированы визуально по изгибу электрической дуги. Схемы устройств Хьюитта (рис. 4) имели принципиальное значение для дальнейшего развития телефонных усилителей.

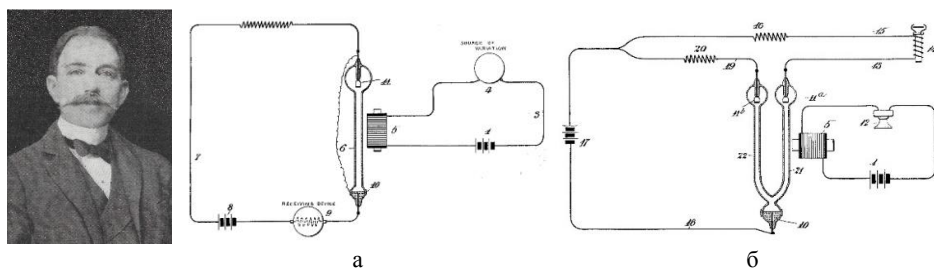


Рис. 4. Питер Купер Хьюитт (1904 г.) и его схемы управления током катодной трубки из патента US749791 с приоритетом от 16 мая 1902 г.

Fig. 4. Peter Cooper Hewitt (1904) and his cathode tube current control circuits from US749791 with priority of May 16, 1902

Попытки использовать электрические токи дуги в разряженных газах для релейного эффекта в тот период времени не имели успеха, поскольку для разряда требовались относительно высокие напряжения и большое количество электрической энергии. Газоразрядные трубки типа Хьюитта получили практическую реализацию в качестве релейных устройств только в начале второго десятилетия XX в., когда на их базе были разработаны работоспособные телефонные ретрансляторы. Невзирая на это, в дальнейшем отказались от использования электрических лучей с высокими скоростями носителей заряда из-за сложности управления ими.

3. Изобретение катодного реле

Разработать практический телефонный ретранслятор с использованием катодно-лучевых технологий было суждено 28-летнему австрийскому физику Роберту фон Либену (*Robert von Lieben*, 05.09.1878—20.02.1913). Роберт фон Либен родился в состоятельной семье в Вене, в доме, расположенном недалеко от Венской оперы, рис. 5. Его отец, Леопольд фон Либен, был банкиром и являлся президентом Венской биржи.

Роберт, будучи материально обеспеченным человеком, учился без особого желания в строго регламентированной школьной системе. Он досрочно покинул Венскую академическую гимназию и довольствовался аттестатом об окончании средней школы. Однако он рано сформировался как самоучка, проводя в основном физико-химические эксперименты, и в подростковом возрасте установил электрическое освещение на родительской вилле в Хинтербрюле у Медлинга (нем. *Hinterbrühl bei Mödling*) с подводом энергии от близлежащей мельницы Хельдриха (нем. *Höldrichsmühle*). В этот период времени он настолько увлекся электричеством, которое тогда вызывало всеобщий интерес, что на короткое время устроился стажером, сотрудником без оплаты, в компанию *Siemens-Schuckert* в г. Нюрнберг. Здесь он приобрел практический опыт в области электротехники.



Рис. 5. Роберт фон Либен (1910 г.) и здание Венской государственной оперы.
Художник *Friedrich Frank*. Начало XX в.

Fig. 5. Robert von Lieben (1910) and the Vienna State Opera.
Artist *Friedrich Frank*. Early 20th century

Роберт фон Либен не получил полного университетского образования, так как посещал лекции в университете Вены по выбору на правах вольного слушателя. Стремление заниматься наукой привело его в Геттингенский университет, где он проработал целый учебный год (1899/1900 гг.) помощником у известного немецкого физика и химика Вальтера Нернста (*Walther Hermann Nernst*, 25.06.1864—18.11.1941). Благодаря своему при-

лежанию и научному кругозору он обратил на себя внимание профессора В. Нернста, и у них сложились дружеские отношения. В последующем отзыве о своем ученике В. Нернст называл его не просто своим любимым учеником, но также и верным другом.

За время пребывания в университете Либен изучил особенности электрохимических фонографов, над усовершенствованием которых работал В. Нернст, рис. 6. Во время этих экспериментов он и заинтересовался проблемой усиления звуковых сигналов. Накопленный во время экспериментов опыт пригодился ему в дальнейшем, когда он занялся вплотную созданием приборов для усиления звуковых телефонных сигналов.

В 1900 г. Р. Либен возвратился в Вену и в доме родителей создал свою собственную лабораторию, в которой проводил различные физико-технические эксперименты, в частности, изучал электрические явления в разряженных газах, рис. 6.

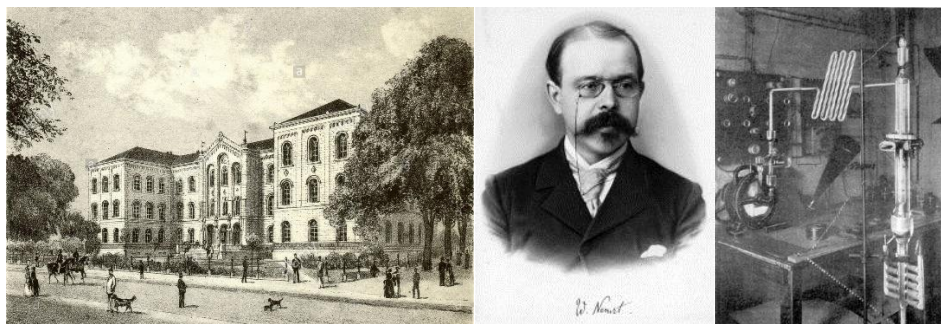


Рис. 6. Старая большая аудитория Геттингёнского университета имени Георга Августа. Литография. После 1872 г. Роберт Гайсслер (1819—1893), Вальтер Герман Нернст и лаборатория Роберта фон Либена в Вене. 1900 г.

Fig. 6. Old Auditorium Maximum of the Georg-August-Universität Göttingen. Lithograph. After 1872. Robert Geissler (1819—1893), Walther Hermann Nernst and laboratory of Robert von Lieben in Vienna. 1900

Отец Роберта фон Либена всячески поддерживал увлечение сына техникой, и в 1904 г. купил ему телефонную фабрику в городе Махрен³ (немецкое название города Mähren времен Австро-Венгерской монархии). Предприятие получило название: «Телефонная фабрика Роберта фон Либена» (нем. *Telephon Fabrik Robert von Lieben*).

Продукция телефонной фабрики использовалась в междугородней телефонной связи Австро-Венгрии. Во время ее наладки Р. Либен обратил внимание на тот факт, что качество телефонного разговора ухудшается с

³ Сейчас этот город называется Оломоуц (нем. Olmütz) и входит в область Моравия (Чехия).

увеличением расстояния между городами, так как уменьшается сила тока в телефонной линии. При длине телефонной линии около 400 км, электрический ток уже не может привести в движение мембрану телефона⁴ [10]. При увеличении телефонного трафика на большие расстояния необходимо было решить две основные задачи: явление искажения речи и ослабление передаваемых телефонных сигналов. Если первая задача могла быть решена чисто теоретическими подходами в борьбе с источниками ошибок искажения речи, то вторая задача все еще ждала своего решения. Поэтому, чтобы добиться качественной работы телефона, необходимо было усилить электрический сигнал в телефонной линии.

Р. Либен после анализа работы телефонных релейных усилителей, пришел к выводу, о необходимости замены механических реле, другими более совершенными приборами. Это было связано с тем, что релейный усилитель, хотя и мог дать очень большой «коэффициент усиления» мощности, обеспечивая гальваническую развязку входа и выхода, у него было ограниченное быстродействие. Вдобавок релейный усилитель не мог усиливать аналоговые, плавно изменяющиеся сигналы, каковыми являются звуковые телефонные сигналы. Главный недостаток всех конструкций телефонных реле заключался в инерции движущихся масс, которые, какими бы чувствительными они ни были, имеют малую скорость переключения. Для усиления телефонных сигналов были необходимы другие устройства.

Роберт Либен понял, что механические конструкции не могут привести к цели. Он, будучи физиком, был в курсе последних достижений в области катодно-лучевых технологий. Это позволило ему прийти к мысли, что в газоразрядной трубке катодные лучи являются своеобразным мостом между катодом и анодом, соединяющим электрическую цепь. Воздействуя слабым входным током на такую цепь, можно управлять ее выходным электрическим током. Он понял, что практическая реализация телефонного усилителя с использованием катодных технологий возможна только с помощью более медленных, легко регулируемых катодных лучей, которые производятся тлеющим разрядом. Исходя из этого, Либен выбрал в качестве базового элемента своего электронного усилительного устройства трубку Перрена, которую он модернизировал. Холодный катод был заменен нагреваемым оксидным катодом в виде вогнутого зеркала для фокусировки электронного потока. Такая форма катода была, как известно, предложена в свое время Круксом. Покрытие катода смесью оксидов щелочно-

⁴ В 1909 г. русский ученый в области проводной связи В. И. Коваленков разработал телефонную проволочную безламповую трансляцию, которая позволила удлинить линию передач в несколько раз. Схема трансляции включала реле, гальваническую батарею и повышающий трансформатор.

земельных металлов указывает на знание им работ по оксидным катодам своего соотечественника Артура Венельта, который в этот период времени опубликовал свои результаты экспериментов с катодными трубками. Либен для отклонения катодных лучей использовал магнитное поле кольцевого электромагнита, состоящего из двух половинок, соединенных последовательно, как это было сделано в трубке Брауна.

Исследования и разработки катодного реле проходили в течение 1905 года в частной лаборатории Роберта фон Либена в Вене, на улице Оппольцегассе 6 (нем. *Oppolzergasse*), в доме его родителей, рис. 7. В исследованиях в качестве сотрудников принимали участие его соученики по учебе в университете физик Евгений Рейс⁵ (нем. *Eugen Reisz*, 1879—1957) и инженер-электрик Зигмунд Штраус (нем. *Siegmond Strauss*, 04.01.1875—29.03.1942). Рейс работал у Роберта фон Либена с 1902 года.

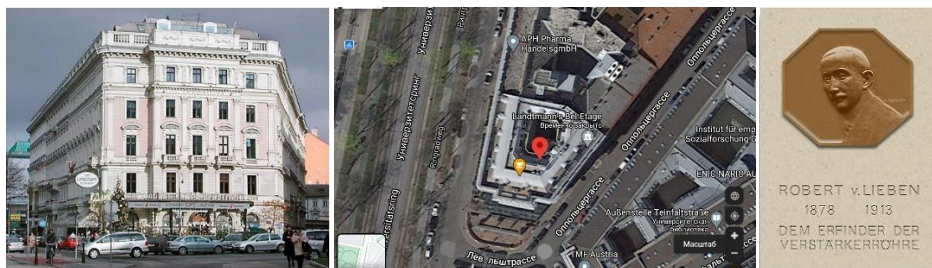


Рис. 7. Вена. Дом, в котором на первом этаже находилась лаборатория Роберта фон Либена. Карта с расположением дома по улице Оппольцегассе, 6. Справа мемориальная доска Либену, установленная 24 апреля 1927 г. на здании RAVAG по улице Johannesgasse, 4 (в 1938 г. снята из-за антисемитских настроений).

Fig. 7. Vienna. The house in which the laboratory of Robert von Lieben was located on the ground floor. Map showing the location of the house on Oppolzergasse 6. On the right is a memorial plaque to Lieben, installed on April 24, 1927 on the RAVAG building on Johannesgasse 4 (removed in 1938 due to anti-Semitic sentiments)

В январе 1906 года Либен привлек к работам химика доктора Ричарда Лейзера (*Richard Leiser*), ассистента из Института химии Венского университета, который должен был помочь в разработке оксидного катода с вогнутым зеркалом. Для этой цели Лейзер испробовал широкий спектр механических конструкций (слой платины на фарфоровом корпусе, платиновый лист с отдельным нагревательным элементом, сборка зеркала из отдельных частей платинового листа), пока наконец не была найдена удовлетвори-

⁵ Е. Рейс в 1923 г. изобрел микрофон для передачи высококачественного звука, в котором закрытая мембрана была сделана из угольной пыли и размещалась в мраморном блоке. Обладатель нескольких патентов в этой области. Разработчик и производитель микрофонов, электростатических динамиков и других электроакустических устройств.

тельная конструкция с соответствующим тонким листом платины. Было очень трудно изготовить зеркало с оксидом щелочного металла, чтобы оно выполняло функцию катода Венельта. Лейзер сначала попытался применить оксид кальция (CaO) в виде порошка, затем препарат с органическими солями кальция. Наконец успех пришел с нитратом кальция, и колебания тока можно было увеличить с 5 мА до 50 мА с помощью магнитного управления. Важный вклад доктора Ричарда Лейзера в исследование был признан Робертом фон Либеном в сентябре 1908 г. в контракте, согласно которому доктор Лейзер должен был получать 40 % прибыли от изобретения.

Во время экспериментов с катодно-лучевым реле возникли трудности из-за высокого потенциала, приложенного к внешнему цилиндру. Это вызывало ионизацию остаточного газа и появление «голубого свечения», которое снижало эффективность реле. В результате напряженных исследований 1905/1906 гг. была сконструирована усилительная электронная лампа с магнитным управлением. Р. Либен на свою конструкцию электронной лампы получил немецкий патент DE179807 от 4 марта 1906 г. (рис. 8) [11]. Согласно патенту лампа называлась «Катодно-лучевое реле» (нем. *Kathodenstrahlrelais*). Отсюда и пошло последующее название электронных ламп «катодное реле», которое долгое время использовалось в радиотехнике. В дальнейшем «катодными реле» стали называть и появившиеся позже трехэлектродные лампы Ли де Фореста.

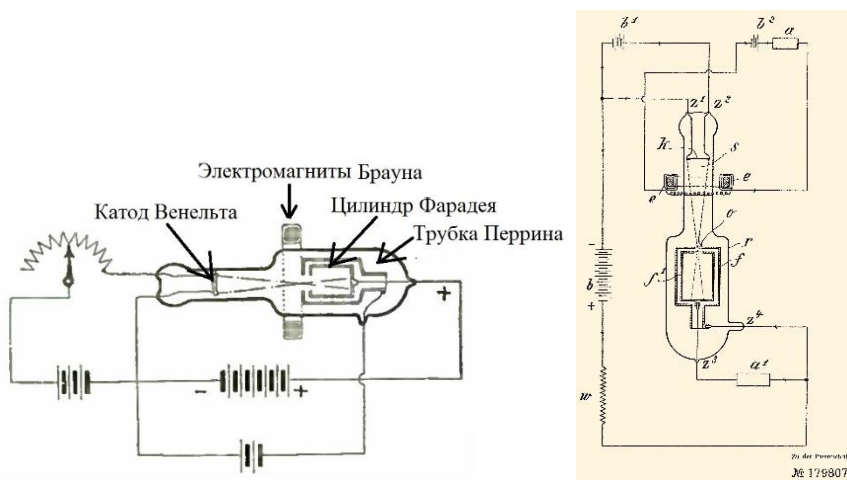


Рис. 8. Модернизированная трубка Перрина (слева) и конструкция катодно-лучевого реле Роберта фон Либена (справа) в соответствии с патентом DE179807 от 4 марта 1906 г.

Fig. 8. The modernized Perrin tube (left) and the design of a cathode ray relay by Robert von Lieben (right) in accordance with patent DE179807 dated March 4, 1906

Формула изобретения Р. Либена была следующей: «Катодно-лучевое реле электрических волн для больших частот, отличающееся тем, что медленные катодные лучи, исходящие в известной степени из катода с вогнутым отражателем, покрытого нагреваемым металлическим оксидом, находятся под влиянием усиливаемых электрических волн таким образом, что они вызывают в электрической цепи (контуре) волны одинаковой частоты, но более высокой амплитуды».

Входной электрический сигнал, который необходимо усилить, поступает на кольцевой электромагнит из двух половинок, и его магнитное поле через силу Лоренца изменяет направление электронного пучка при его движении от катода к аноду. В зависимости от степени отклонения электронов происходит необходимое усиление сигнала. В патенте подчеркивается тот факт, что катодные лучи практически не имеют момента инерции, так что должно быть возможно усиление до самых высоких частот. Кроме того, за счет использования «медленных катодных лучей» (поскольку катод Венельта позволял снизить анодное напряжение примерно до 200 вольт) относительно небольшие магнитные или электрические силы позволяли реализовать желаемый эффект усиления сигнала.

В патенте Р. Либена впервые сформулирован принцип усиления электрического сигнала в вакуумной электронной лампе. Заметим, что эта первая усилительная электронная вакуумная лампа, которая, кроме катода прямого накала, анода, управляющего электрода, имела еще и катушки индуктивности, что не позволяло ее назвать трехэлектродной лампой, которая потом стала доминирующей в радиотехнике. Лампу трехэлектродного типа немецкий ученый изобрел позже, после того как стало известно о работах американца Ли де Фореста.

Нужно отметить одно важное отличие в предназначении изобретенных усилительных ламп австрийцем Робертом фон Либеном и американцем Ли де Форестом. Изначально усилительная электронная лампа Роберта фон Либена предназначалась для усиления низкочастотных электрических колебаний в телефонных линиях, в то время как трехэлектродная электронная лампа Ли де Фореста изобреталась специально для усиления радиочастот принимаемых антенной радиоприемника. При этом изобретения имеют различные прототипы: у фона Либена — катодная трубка, у де Фореста — пустотный клапан.

Если судить по датам полученных патентов двумя учеными, Р. Либена (патент выдан 04 марта 1906) и Ли де Фореста (патент заявлен 27 августа 1906), то первенство в изобретении вакуумной электронной лампы для усиления электрического сигнала принадлежит Роберту фон Либену.

Появившаяся усилительная лампа получила название «трубка Либена» (нем. Lieben-Röhre), но иногда ее называли и «лампа Либена». При практическом внедрении лампы Либена встретились некоторые трудности, но, невзирая на это, лампа была опробована в качестве усилителя звукового сигнала в телефонии [12] вместо телефонного электромагнитного реле и, что важно, показала свою работоспособность, рис. 9а. В патенте DE179807 указывается, что катодное реле предназначено для решения некоторых проблем в телефонии, в частности, передача голоса на большие расстояния, кабельная телефония, беспроводная телефония, усиление передачи голоса и музыки и т. д. Это реле может быть полезным также для некоторых проблем дистанционной фотографии, фонографии и др.

Что касается беспроводной телефонии, о которой упоминается в патенте, то в нем не приводятся схемы, относящиеся к этой области связи. Возможная схема приемника беспроводной телеграфии на лампе Либена с прослушиванием информации на наушники приведена на рис.9б [13].

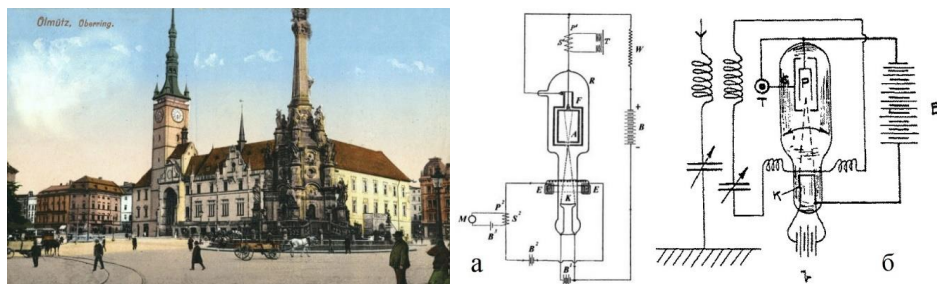


Рис. 9. Город Оломоуц (нем. Olmütz, 1900 г.), в котором Роберт фон Либен в 1904—1906 гг. проводил эксперименты с телефонным усилителем и принципиальная схема (а) усилителя звукового сигнала на катодно-лучевом реле (рис. В. М. Пестрикова) [12]. Справа (б) возможная схема приемника беспроводной телеграфии на лампе Либена [13].

Fig. 9. The city of Olomouc (German Olmütz, 1900), in which Robert von Lieben 1904–1906 conducted experiments with a telephone amplifier and a schematic diagram (a) of an audio signal amplifier on a cathode-ray relay (drawing by V. M. Pestrikov) [12]. On the right (б) is a possible diagram of a wireless telegraphy receiver on a Liben tube [13]

Сконструированное Р. Либеном устройство для усиления звукового тока позволило увеличить дальность ведения телефонных разговоров. Другими словами, впервые была введена в практику так называемая «телефонная трансляция» [14]. До ее появления основным средством борьбы с ослаблением тока в телефонной линии было применение проводов большого сечения (т. е. толще) и изготовленных из материала, отличающегося большой электропроводностью, например, из красной меди. Этот путь, однако, имеет разумные пределы, так как провода большого диамет-

ра стоят очень дорого, и могут настолько удорожить проведение телефонной линии, что она окажется нерентабельной. Все это говорит о важности и своевременности изобретения катодно-лучевого реле Р. Либеном.

В 1907 г. Либен продемонстрировал Нернсту работу катодного реле в своей частной лаборатории в Вене. Демонстрация проходила в режиме телефонного разговора с необычайно повышенной громкостью и в то же время при совершенно четко различимой речи [15]. Аппаратура с лампой Либена была громоздкой, высотой в человеческий рост. К лампе постоянно был подключен вакуумный насос для поддержания в ней требуемого разрежения.

4. Реле переменного тока с ионизационным управлением

Первая усилительная электронная лампа конструкции Либена была далека от совершенства. В связи с этим Либен поручил Рейсу и Штраусу продолжить работу над катодным реле и довести его до практического использования. Доктор Лейзер на этом этапе работ не принимал участие, так как в сентябре 1907 г. поменял место жительства и переехал в город Карлсруэ (*Karlsruhe*, город в Германии в 680 км от Вены). В этот период времени Либен плохого себя чувствовал и разработками занимался в основном Рейс. По словам Рейса, важные детали более поздних разработок были связаны с именем Либена, который все еще был очень активен, несмотря на свою болезнь [16]. Была кардинально пересмотрена первоначальная конструкция катодного реле (рис. 8) с целью ее упрощения, неизменным осталось только магнитное управление катодными лучами.

Изобретатели отказались от «высокого вакуума», упомянутого в предыдущем патенте DE179807, и вместо этого использовали ионизацию разряженного газа. «Трудность изготовления полого зеркального катода, неоднородное излучение катодных лучей из нагретого оксида и, в частности, сложность поддержания постоянного вакуума в газоразрядной трубке были основными причинами», которые мотивировали дальнейшее развитие устройства 1906 года [17].

В начале 1910 г. Рейс и Штраус для предотвращения вредного влияния тлеющего разряда на работу катодно-лучевого реле установили металлическую диафрагму в виде диска с отверстием на пути катодных лучей между катодом и анодом и подключили ее к положительному полюсу источника постоянного тока питания анода. Во время экспериментальной работы с реле они обнаружили контролирующее влияние этого электрода на поток носителей электрического заряда между катодом и анодом. Это открытие привело к новой конструкции катодного реле, которая была разработана после окончания текущих работ.

30 марта 1910 г. фон Либен вместе с Е. Рейсом и З. Штраусом, запатентовали новую конструкцию катодного реле — *Relais fur undulierende Strome* (реле переменного тока) и получили на нее австрийский патент [18], а потом и немецкий патент [19], рис.10а, б. Немецкий патент имел более длинное название: *Relais fur undulierende Strome, bei welchem durch die zu verstärkenden Stromschwankungen ein Ionisator beeinflusst wird* (реле переменного тока с ионизационным управлением).

В новой электронной усилительной лампе вместо коаксиального анода был использован небольшой толщины металлический диск К. Для образования катодных лучей горячий катод был заменен на холодный в форме полусферы. Это позволило сформировать параллельный не рассеивающийся электронный пучок, который падал перпендикулярно плоскости анода. Заметим, что в катодно-лучевом реле Либена (рис. 8) катод был выгнут таким образом, что его фокус находился в зоне отверстия цилиндра Фарадея. Это было сделано для того, чтобы сфокусированные частицы катодных лучей с большей долей вероятности попали в цилиндрический анод.

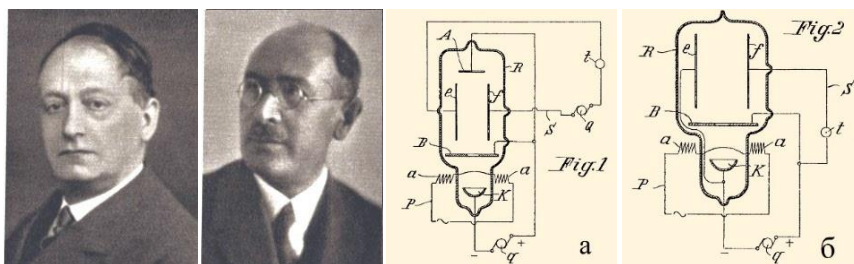


Рис. 10. Евгений Рейс (слева) и Зигмунд Штраус. В центре (а) и справа (б) схемы катодных реле конструкции Р. фон Либена, Е. Рейса и З. Штраусса из патента АТ47172 от 30.03.1910 г. [18].

Fig. 10. Eugen Reisz (left) and Siegmund Strauss. In the center (a) and on the right (b) diagrams of cathode relays designed by R. von Lieben, E. Reisz and Z. Strauss from patent AT47172 dated 03.30.1910 [18]

Устройство новой катодной лампы состоит из двух цепей, рис. 10. В первичную цепь входит контур P , содержащий электромагнитные катушки a , на которые подается первичный сигнал для усиления. Колебания магнитного поля катушек a оказывают воздействие на катодные лучи, которые генерируются в газоразрядной трубке R , и действуют как ионизатор. Другая цепь, вторичная, состоит из анода A в цепи источника постоянного тока q . Внутри газоразрядной трубки R имеется два пластинчатых электрода e и f , которые располагаются таким образом, что в пространстве между ними проходит траектория движения катодных лучей. Пластинчатые электроды

относятся также ко вторичной цепи S , содержащей свой источник постоянного тока Q . Металлическая диафрагма B перед катодом разделяет рассмотренные две цепи, а также формирует катодные лучи в пучок меньшего диаметра, чем диаметр при выходе от катода K , и ускоряет их движение.

Катодные лучи, исходящие от катода K , попадают в газовое пространство между электродами e и f и вызывают его ионизацию, что приводит к изменению электропроводности газа и возникновению тока во вторичной цепи S . Проводимость (ионизация) газового пространства между e и f изменяется в соответствии с изменениями переменных токов, которые протекают в отклоняющих катушках a , или вызываемыми ими магнитным отклонением катодных лучей. Эти изменения происходят с той же частотой и формой волны, что и колебания тока в первичной цепи P , но с большей амплитудой. В второй цепи происходят усиление колебаний тока, которые приводят в действие мембрану телефона t . В лампе, по существу, электроды e и f представляют собой второй анод, но из двух пластин. Первый анод A служит только для генерирования катодных лучей. Проблемы, связанные с высоким вакуумом, были преодолены за счет использования ионизации разреженного газа вместо зависимости от чистой термоэлектронной эмиссии.

Р. фон Либен, Е. Рейс и С. Штраус на свое устройство получили австрийский патент АТ48172 от 30 марта 1910 г. под названием «Реле для переменных токов», а 7 декабря 1910 г. им был выдан дополнительный патент АТ54011 с тем же названием, который часто называют «патентом на сетку».

В патенте АТ47172 указывается, что материал и температуру катода K , а также газ в газоразрядных трубках целесообразно выбирать так, чтобы катодные лучи испускались даже при относительно низком напряжении источника питания q . Лучи, излучаемые при таком низком напряжении, более чувствительны к воздействию отклоняющего магнитного поля, что увеличивает чувствительность реле.

В полученном группой Либена патенте еще приводится упрощенная схема устройства реле переменного тока с ионизационным управлением, рис. 96. Упрощение достигнуто удалением анода A и одного источника постоянного тока. В этом устройстве пластина f выполняет роль анода, а пластина e подключена к минусу источника питания и отталкивает катодные лучи к аноду A . Диафрагма B и один контакт телефона подсоединены к плюсу источника питания. Описанное реле для переменных токов может использоваться для различных целей, например, в качестве усилителя звука, в качестве реле в проводной и кабельной телеграфии при местном и междугороднем трафике, а также в радиотелеграфии и телефонии и в ка-

честве вспомогательного устройства для телеграфа и для передачи электрического изображения.

Работы Роберта фон Либена, проведенные совместно с Евгением Рейсом (Eugen Reisz) и Зигмундом Штраусом (Siegmund Strauss), позволили значительно улучшить усилитель на катодном реле. Все патенты, полученные в результате работ группой Либена, содержали три фамилии: Р. Либен, Е. Рейс и С. Штраус.

Австрийский поэт Гуго фон Гофмансталь (нем. *Hugo von Hofmannsthal*, 01.02.1874—15.07.1929), который был частым гостем светских мероприятий в доме фон Либена, однажды написал о нем: «Он был одним из очень редких людей на Земле, которым их профессия доставляла полное счастье: он знал, что в самые высокие мгновения ему представится неизмеримо долгое время, чтобы обдумать бесконечные мысли»⁶ [20].

5. Катодное реле дистанционного электрического действия

Вопросы усиления телефонных сигналов волновали не только столичных ученых Австро-Венгрии, но и исследователей на ее окраинах, в частности, словенском городе Любляна (словен. *Ljubljana*, итал. *Lubiana*, до 1918 г. — *Лайбах*, нем. *Laibach*).

В 1911 г. известный учитель физики Люблянской классической гимназии Юлиус Нардин (рис. 11) со своим другом юристом Рене Зеи (Rene Zei) решили заняться улучшением телефонной передачи, так как шум, который присутствовал во время разговора, их очень раздражал [21].



Рис. 11. Юлиус Нардин. Вид города Люблин в 1911 г. и карта, показывающая удаленность Люблина от Вены.

Fig. 11. Julij Nardin. View of the city of Lublin in 1911 and a map showing the distance between Lublin and Vienna

Для решения поставленной задачи они сконструировали телефонное реле на базе катодной трубки Венельта на медленных электронах с напря-

⁶ Перевод с немецкого М. В. Пестриковой.

жением 400 В и несколькими (двумя и более) эквивалентными, взаимно изолированными анодами [22]. Нардин и Зеи получили на это устройство патенты в нескольких странах (Австро-Венгрии [23], Франции [24] и Великобритании [25]). В полученных патентах изобретенное устройство называется по-разному: австрийском — «Реле для электрических токов», французском — «Реле дистанционного электрического действия». При оформлении патента Нардин отвечал за его техническую часть, Зеи — за организационную часть [26].

В патенте [23] авторы отмечают: «Настоящее изобретение относится к реле для электрических токов, в частности, для телепечатных и телефонных целей на больших расстояниях, посредством изменения электромагнитного воздействия лучей, таких как катодные лучи и т. д. Эти лучи отклоняются, и их интенсивность изменяется из-за колебаний электромагнита, через который протекает постоянный ток. Изменение интенсивности и отклонение лучей приводят к изменению силы тока в ветвях местного высоковольтного тока». Конструкция анода реле такая, что он может состоять из двух, трех или более частей, и согласно изобретению все ветви анодной линии находятся в единой локальной цепи. Отклонение лучей заставляет их падать поочередно на одну или другую ветвь этого электрода, в результате чего ток в ветвях разделенного электрода колеблется и, таким образом, возбуждает приемное устройство, аналогичное передатчику.

Применительно к телефонному трафику это устройство позволяет увеличить расстояние разговора и повысить безопасность трафика в качестве конечного ретранслятора, или в качестве промежуточного ретранслятора, для увеличения расстояния, на котором возможен трафик, и в то же время обеспечивает лучшую безопасность трафика. Использование постоянных токов значительно снижает вредное воздействие кабельной арматуры. Возможность применения прибора для переменных токов очевидна. Устройство катодного реле Нардина представлено в виде чертежа на рис. 12.

На рис.12а показано устройство катодного реле Нардина, которое в значительной степени отличается от катодного реле Либена:

1. Используется катод косвенного нагрева. Пластина P является своеобразной нитью накала и питается постоянным током (провода S). Эта пластина нагревает зеркальный вогнутый оксидный катод K конструкции Венельта. Происходит термоэмиссия электронов, которые устремляются к анодам $A1$, $A2$, $A3$ при наличии анодного напряжения.

2. Непосредственно внутри стеклянного баллона R , недалеко от катода K , прямо в потоке электронов находится катушка Sp небольшого электромагнита E (рис.12б), на которую подается сигнал.

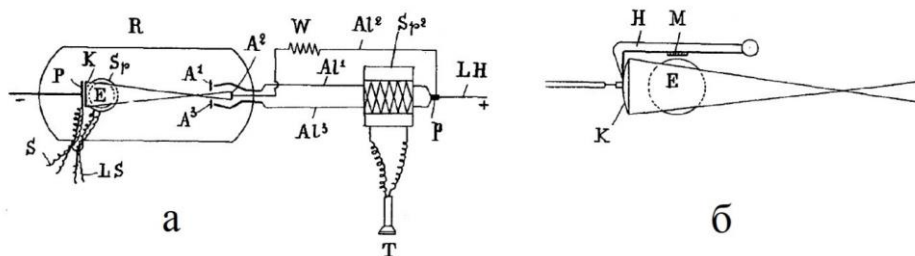


Рис. 12. Устройство (а) катодного реле для усиления телефонных сигналов Юлия Нардина и Рене Зеи согласно патенту AT66604 с приоритетом от 13 августа 1912 г.

Справа (б) показана конструкция катода этого реле.

Fig. 12. Device (a) of a cathode relay for amplifying telephone signals of Julij Nardin and Rene Zei according to patent AT66604 with a priority of August 13, 1912. The design of the cathode (b) of this relay is shown on the right

3. Анод состоит из трех частей $A1$, $A2$, $A3$. Части анода изолированы друг от друга, средняя часть короче двух других внешних частей. В среднюю ветвь анода $A2$ включен обычный резистор W для настройки цепи. Такая конструкция анода позволяет не изменять силу всего локального тока, а только распределять его по трем ветвям.

4. Ветви внешней анодной линии $AL1$ и $AL2$ намотаны изолированным проводом вокруг железного сердечника (одна по часовой стрелке, другая — в противоположном направлении), которые соединяются в точке p вместе с LH . Таким образом, они образуют первичную обмотку трансформатора. Он окружен вторичной обмоткой $Sp2$, которая последовательно соединена с приемным устройством типа телефонного наушника.

Устройство (рис. 12) работает следующим образом [23]. Сгенерированные катодные лучи (поток электронов) падают симметрично на анодные части $A1$ и $A2$, которые имеют одинаковый потенциал, и, если сопротивления двух внешних ветвей одинаковы, то токи одинаковой величины протекают через обе ветви $AL1$ и $AL3$. Эти токи вращаются вокруг железного сердечника в первичной катушке в противоположном направлении, поэтому их эффекты полностью нейтрализуют друг друга. Из этого очевидно, что во вторичной обмотке $Sp2$ не могут возникнуть индукционные токи, даже если местный ток колеблется. Индукционные токи генерируются в $Sp2$ только тогда, когда катодные лучи отклоняются в сторону $A1$ и $A3$, что и происходит с постоянным током LS , окружающим электромагнит E . В этом случае две противоположные обмотки первичной обмотки также удваивают влияние на вторичную обмотку $Sp2$. Когда катодные лучи отклоняются в сторону $A1$, ток в $AL1$ увеличивается, а в $AL3$ ослабляет-

ся на ту же величину, и поскольку оба тока протекают вокруг первичной катушки в противоположных направлениях, и их эффекты складываются. Средняя анодная часть *A2* и ответвление *AL3* с резистором *W* служат, с одной стороны, для направления катодных лучей, но, с другой стороны, регулирование силы тока в *AL1* и *AL3* не является абсолютно необходимым, как указано выше.

В патенте авторы отмечают, что многократное разделение анода в связи с описанной обмоткой первичной катушки имеет первостепенное значение для чистоты передачи вызовов.

В патенте [25] формула изобретения представлена следующим образом: «Реле для электрических дистанционных эффектов, в частности, для записи на большие расстояния телефонных разговоров, в котором вариации тока, которые должны быть увеличены, действуют путем отклонения пучка катодных лучей, расположенных в локальной цепи, содержащей множество ветвей — вариации ветвей указанной цепи, которые используются для увеличения или лучшего воспроизведения первичных колебаний тока, отличающиеся тем, что полюса электрода, состоящего из множества участков, расположены близко друг к другу и на большем расстоянии от односекционного противоположного электрода, чтобы пучок лучей сходился к первому электроду и ударял по нему напрямую, и что отклонение пучка лучей достигается за счет электромагнита, возбуждаемого током, который должен быть передан, и расположен в самой лучевой трубке и как можно ближе к одному электроду».

Нужно заметить, что во всех полученных патентах Нардином и Зеи формулы изобретения не совпадают, они разные, в то время как чертежи устройства одни и те же. Выше приведена формула из патента Великобритании [25], которая, по мнению автора настоящей статьи, наилучше отражает суть изобретения. В патенте Нардин упоминает «другие лучи» в дополнение к катодным лучам, что связано с «открытием» в то время целого ряда новых лучей.

Работая над оформлением патента, Нардин обнаружил, что его усилитель в четыре раза мощнее усилителя Либена образца 1906 года. Однако он не смог протестировать свое устройство, так как Нардину и Зею не удалось купить достаточно эффективный вакуумный насос. Поэтому они на безвозмездной основе согласились сотрудничать с телефонным заводом *Zwietusch* в Берлине, который проявил интерес к их изобретению. Во время первой мировой войны завод *Zwietusch* присоединился к *Siemens & Halske* [22].

Нардин и Зеи, разрабатывая катодное реле для усиления телефонного сигнала, не подозревали, что их изобретение уже давно морально уста-

рело, а технический прогресс в области разработки усилительных электронных ламп за шесть лет после изобретения катодного реле Либеном ушел далеко вперед. Доминирующее положение в радиотехнике почти на 40 лет заняла трехэлектродная лампа Ли де Фореста.

6. Заключение

Роберт фон Либен первый применил катодно-лучевые технологии для усиления телефонных сигналов. В патенте DE179807 четко и впервые заявлено об использовании медленных катодных лучей в качестве управляемого органа реле, а в качестве их источника указан горячий оксидный катод конструкции Венельта. Важно подчеркнуть, что Либен оставил выбор типа управления открытым и не ограничился исходным магнитным управлением. Хотя это было разумное и удачное решение задачи, однако позже он отказался от него, когда обнаружил, что электрическое управление проще и эффективнее.

Что касается катодного реле Юлия Нардина и Рене Зеи, то их устройство имеет черты оригинальности и отличается от усилителя Либена. Невзирая на это, оно оказалось не актуальным для того периода времени, так как прогресс в начале второго десятилетия XX века в области усилительных электронных ламп уже был связан с трехэлектродной лампой Ли де Фореста. Катодное реле Нардина и Зеи не оказало заметного влияния на развитие радиотехнологий, так как устройство являлось лабораторным образцом и не было адаптировано для практического применения. Это катодное реле представляет интерес только с позиций возможности применения катодно-лучевых технологий для усиления телефонных токов.

Радиотехнологии обязаны своим подъемом, прежде всего, изобретению усилительной электронной лампы Либена с ее замечательными свойствами и широкими возможностями применения. Работы Роберта фон Либена заложили основу в конструировании усилительных электронных ламп и долгое время способствовал их дальнейшему развитию.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 190—226.
2. Пестриков В. М. Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 227—260.
3. Пестриков В. М. Открытие природы катодных лучей // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 325—359.

4. Blake G. G. History of Radio Telegraphy and Telephony. London : Chapman & Hall Ltd., 1926. 207 s.
5. Banneitz F. Taschenbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie. Berlin : Springer, 1927. 522 s.
6. Skowronnek K. Zur Entwicklung der Elektronenverstärker-Röhre (Lieben-Röhre) // Archiv für Geschichte der Mathematik, der Naturwissenschaften und der Technik. 1931. Bd 13. Heft 3/4. Neue Folge IV. S. 226.
7. The Gallery of Electro-Mechanical Amplifiers. URL: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/COMMS/mechamp/mechamp.htm> (10.11.2020).
8. Shreeve H. E. Telephone current reinforcer or relay. Patent US791665. Patented June 6, 1905. Application filed July 8, 1904.
9. Hewitt P. C. Means for reproducing electrical variations. Patent US749791. Patented Jan. 19, 1904. Application piled Mat. 16, 1902.
10. Медведев П. Е. Беседы о важнейших научных открытиях. Минск : ГОИ БССР РНТЛ. 1961. 183 с.
11. Robert von Lieben. Kathodenstrahlenrelais. Patent DE179807 vom 4. März.1906.3S.
12. Пестриков В. М. Катодное реле — первая усилительная электронная лампа. Материалы 22-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 10—14 сентября 2012 г. В 2 т. Севастополь : Вебер. 2012. Том 1. С. 32—34.
13. Leggett B. Wireless Telegraphy. London : Chapman & Hall Ltd. 1921. P. 162—163.
14. Телефонная трансляция // Наука и техника, 1925. № 6 (98). С. 2—3.
15. Nernst W. Zur Erinnerung an Robert von Lieben // Telefunken Zeitung. Sept. 1923. Nr. 32/33. S. 5—7.
16. Pichler F. Elektronen zur Signalverstärkung : Die Pionierarbeiten im Laboratorium “Lieben – Reisz – Strauss” in Wien 1905–1913 // e&i Elektrotechnik und Informationstechnik. 2004. Heft 5. S.180–186.
17. Reisz E. Neues Verfahren zur Verstärkung elektrischer Ströme // Elektrotechnische Zeitschrift. Nov. 1913. Band 34. Heft 45. S. 1359.
18. Robert von Lieben, Eugen Reisz und Siegmund Strauss, sämtliche in Wien. Relais für undulierende Ströme. Patent AT48172. Angemeldet am 30 März 1910. Beginn der Patentdauer : 1. Dezember 1910. Ausgegeben am 26. Mai 1911.
19. Robert von Lieben, Eugen Reisz und Siegmund Strauss, sämtliche in Wien. Relais für undulierende Ströme, bei welchem durch die zu verstärkenden Stromschwankungen ein Ionisator beeinflusst wird. Patent DE236716. Patentiert im Deutschen Reiche vom 4 September 1910.
20. Das Lieben des Robert von Lieben. Die Homepage von H.-T. Schmidt. URL: <http://www.hts-homepage.de/Lieben/Biografie.html> (10.11.2020).
21. Kvarkadabra. Začetki raziskovanja televizije v Ljubljani. URL: <https://kvarkadabra.net/2003/04/zgodovina-televizije/> (11.11.2020).
22. Juznic S. Zgodovina raziskovanja vakuum in vakuumskih tehnik. Ljubljana : Drustvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 2004. S. 229–230.
23. Zei R. und Nardin J. Relais für elektrische Ströme. Patent AT66604. Angemeldet am 13. August 1911. Beginn der Patentdauer : 15 Juni 1913. Ausgegeben am 10 September 1914.
24. Zei R. et Nardin J., résident en Autriche. Relais pour actions électriques à distances. Patent FR4611363. Demandé le 13 août 1913. Délivré le 27 octobre 1918. Publié le 27 décembre 1918. (Demande de brevet déposée en Autriche le 13 août 1912. Déclaration des déposants.)
25. Zei R. and Nardin J. Improvements in or relating to Relays. Patent GB18438. Patent, being date of first Foreign Application (in Austria) 13th Aug. 1912, Date of Application (in the United Kingdom), 13th Aug. 1913.

26. Zvonka Zupanič Slavec. Prva učitelja fizike in kemije na popolni Medicinski fakulteti, Julij Nardin in Dušan Štucin // Revija ISIS. 2010. Št. 3. S. 44–46.

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.