

ДВЕ ТЫСЯЧИ ШЕСТОЙ ГОД В ДАТАХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ*

Д.И. Трубецков

«Электронные» даты как зеркало нелинейной науки

125 лет со дня рождения (и 50 лет со дня смерти) немецкого физика Генриха Георга Баркгаузена (1881–1956), исследования которого относятся к магнетизму, радиотехнике и электронике. В 1919 году Баркгаузен открыл явление скачкообразного изменения намагниченности в ферромагнетиках при непрерывном изменении внешних условий, например, магнитного поля (эффект Баркгаузена). В 1919–1920 годах Баркгаузен и Курц обнаружили сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания при исследовании обычных триодов, в которых сетка находилась под положительным потенциалом по отношению к аноду и катоду (рис. 1). Баркгаузену принадлежит

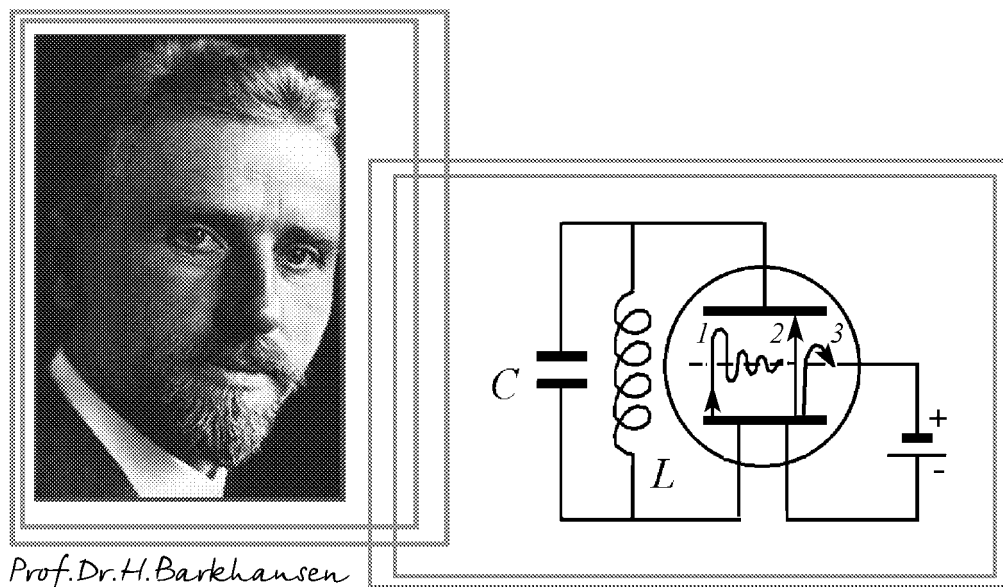


Рис. 1.

*Начало см. в журналах «Известия вузов. ПНД», 2007, т. 15, № 1, с. 103; № 2, с. 91.

и первое объяснение колебаний в таком генераторе. Вылетевшие из катода электроны ускоряются сеткой, но пройдя ее, возвращаются тормозящим полем обратно в пространство сетка – анод, проскакивают сетку в обратном направлении, разворачиваются, вновь ускоряются сеткой, проходят ее, вновь тормозятся и т.д. Такие колебания электрона около сетки происходят до тех пор, пока он не попадет на нее (траектория 1 на рис. 1).

Таким образом, каждый электрон подобен маятнику, совершающему в общем случае нелинейные колебания, обусловленные статическими полями между электродами. По современным воззрениям совокупность таких нелинейных электронов-осцилляторов (классических осцилляторов) проявляет свойства «универсальной» активной среды, способной поддерживать электромагнитные колебания без обычных электродинамических систем с размерами порядка усиливаемой или генерируемой длины волны.

Возможность использования так называемого индуцированного излучения возбужденных классических осцилляторов (в нашем случае электронов-осцилляторов) утвердила впоследствии за подобными приборами название «электронные мазеры». Напомним, что maser – аббревиатура словосочетания microwave amplification by stimulated emission of radiation. Как следует из расшифровки аббревиатуры, термин не обязательно относится к среде из квантовых осцилляторов: среда может быть и классической. Любопытно, что электроника СВЧ начиналась именно с электронных мазеров – генераторов Баркгаузена – Курца [1].

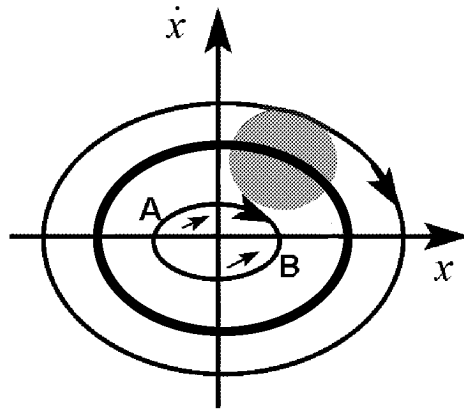


Рис. 2.

нужно удалить «неправильнофазные» электроны из пространства взаимодействия – нужен механизм фазовой рассортировки. В анализируемой схеме таким механизмом является поглощение электронов анодом или сеткой (траектории 2 и 3 на рис. 1).

Рассмотрим теперь образование сгустка неизохронных ($d\omega_0/dE \neq 0$) электронов-осцилляторов на фазовой плоскости (x, \dot{x}) , где x – смещение осциллятора, а \dot{x} – его скорость. На рис. 2 жирная фазовая траектория соответствует движению электронов-осцилляторов в отсутствие переменного поля. Чаще всего $d\omega_0/dE < 0$, то есть частота уменьшается с ростом энергии. При этом ускоренные электроны-осцилляторы колеблются медленнее (на фазовой плоскости это соответствует переходу на внешнюю, по отношению к начальной, траекторию; относительное движение их показано стрелкой В), а заторможенные начинают колебаться быстрее (пере-

Группирование электронов-осцилляторов под действием переменного тока определяется их неизохронностью, то есть зависимостью их собственной частоты ω_0 от энергии E . Если частота ω внешнего воздействия в точности равна ω_0 и осцилляторы изохронны ($d\omega_0/dE = 0$), то половина электронов будет отдавать энергию в тормозящем высокочастотном поле («правильнофазные»), а половина – забирать в ускоряющем («неправильнофазные»). Поэтому для получения эффекта индуцированного излучения электронов-осцилляторов

ход на внутреннюю, по отношению к начальной, траекторию; относительное движение их показано стрелкой А).

В результате образуется «фазовый сгусток» (на рис. 2 он заштрихован). Аналогичная «фазовая группировка» имеет место и при $d\omega_0/dE > 0$, но сгусток образуется в фазе, сдвинутой на π по отношению к предыдущему случаю. Образовавшийся сгусток может поддерживать колебания определенной фазы, что соответствует индуцированному излучению классических электронных осцилляторов, которое характеризуется возможностью весьма широкой перестройки частоты, поскольку последняя определяется напряженностью статических полей в пространстве взаимодействия.

Звездное скопление «магнетронных» дат. В созвездии электронных дат можно выделить звездное скопление под названием «магнетрон». Оно связано с именами Альберта Хэлла, Дмитрия Аполлинариевича Рожанского, Абрама Александровича Слуцкого, Син-итиро Томонаги и его сотрудников; сюда же относится изобретение и создание магнетронной печи.

Автоколебания сверхвысоких частот были получены в 1919 году в аудионе – триоде. Лампа была сконструирована для работы на низких частотах, а СВЧ-колебания имели место при наличии колебательного движения электронов в межэлектродном пространстве при положительном потенциале на сетке и отрицательном – на аноде.

Восемьдесят пять лет назад Альберт Хэлл (1880–1966) опубликовал работу «The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders» [2], в которой была показана возможность управления движением электронов между коаксиальными цилиндрами с помощью постоянного магнитного поля (регулируемого извне), перпендикулярного к постоянному электрическому полю между цилиндрами. В том же году (1921) им была опубликована работа «The Magnetron» [3].

Хэлл начинал не как физик: он окончил Йельский университет по специальности «греческий язык» и второстепенному курсу социологии, учился несколько лет в Академии в Олбани, затем вернулся в Йэль, чтобы окончить университет с ученой степенью по физике.

Хэлл имел целью создание низкочастотного мощного генератора: в его экспериментах обмотка электромагнита была включена в колебательный контур магнетрона и в анодную цепь, так что его магнетрон был генератором звуковой частоты. Главным в работах Хэлла было открытие докритического, критического и закритического статических режимов магнетрона. На рис. 3 приведена зависимость тока I , проходящего через цилиндрический магнетрон в статическом режиме при постоянном анодном напряжении V_a , от индукции магнитного поля. Над соответствующими точками кривой изображены траектории электронов для случая отсутствия магнитного поля $B = 0$, докритического $B < B_{кр}$, критического $B = B_{кр}$ и закритического $B > B_{кр}$ режимов работы магнетрона; при этом критическая напряженность магнитного поля

$$H_{кр} \approx \frac{\sqrt{V_a}}{r_a \left[1 - \left(\frac{r_k}{r_a} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

где r_a и r_k – радиусы анода и катода.

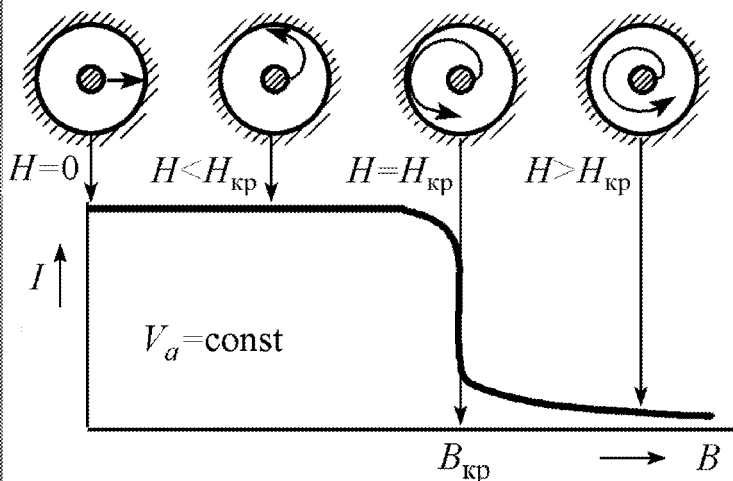


Рис. 3.

Стало понятно, что в двухэлектродной лампе можно управлять электронами, отклоняя их магнитным полем (до этого было известно лишь управляющее и отпирающее действие сетки в аудионе – триоде).

Первые СВЧ-колебания в магнетроне с гладким анодом (конструкция Хэлла) были получены Жачеком [4]. В основе работы лежал механизм фазовой сортировки электронов – ускоренные высокочастотным (ВЧ) полем электроны сразу оседали на катоде. Для удаления из пространства взаимодействия магнетрона электронов, которые в течение нескольких периодов ВЧ-поля тормозились и потеряли свою энергию вращательного движения, применялся наклон постоянного магнитного поля относительно оси прибора или введение дополнительных электродов на краях магнетрона (концевые диски).

И. Хабан [5] обнаружил, что при разделении анода на два равных сегмента, между которыми помещена высокочастотная цепь, выходная мощность резко возрастает.

В 1928–1929 годах две важные работы по исследованию цилиндрического разрезного магнетрона были выполнены Х. Яги [6] и К. Окабе [7]. В японской литературе есть ссылки и на более раннюю работу К. Окабе [8].

В том же 1924 году в Харьковском государственном университете были начаты работы, которые также привели к открытию магнетронного способа создания колебаний. В дальнейшем выделим две яркие фигуры предвоенной магнетронной эпопеи: Дмитрий Аполлинариевич Рожанский (1882–1936) и Абрам Александрович Слуцкий (1881–1950). С этими именами связано возникновение и развитие харьковской школы радиофизики; некоторые сведения о ней мы будем черпать из статьи [9].

О Д.А. Рожанском написана замечательная книга «Дмитрий Аполлинариевич Рожанский», авторами которой являются И.Д. Рожанский, М.М. Рожанская и С.Р. Фионович [10].

Следует заметить, что работы по созданию магнетронов проводились не только в Харькове. Так, академик Борис Алексеевич Введенский в выступлении на торжественном заседании коллектива сотрудников Института радиоэлектроники, посвященном 70-летию со дня его рождения в апреле 1963 года, указывал на следующее.

«Мы шли (в ВЭИ была организована довольно большая лаборатория УКВ) и по линии укорочения волны, в этом главная заслуга принадлежит Марии Тихоновне Греховой – ныне директору НИРФИ, М.Л. Слиозбергу и В.М. Бовшеверову. Мария Тихоновна культивировала баркгаузеновские колебания, создавала оригинальные баркгаузеновские лампы, достигала на таких лампах связи на довольно больших расстояниях. Особенно пригодились нам ее приемные баркгаузеновские лампы.

Слиозберг и Бовшеверов разработали свои собственные разрезные магнетроны, независимо от разработок в Харькове у А.А. Слуцкина и зарубежных. С этими приборами в экспедиции 1933 года на Черном море мы получили на длине волны 60 см дальность света свыше 100 км – за горизонтом. Началось изучение нами влияния тропосферы» [11].

Нас, в связи с магнетроном, в первую очередь будет интересовать часть жизни Рожанского, связанная с Харьковом, а также все его работы в области СВЧ-колебаний и радиолокации. Начнем с основных дат его жизни.

- 1882, 2 сентября – родился в Киеве в семье Аполлинария Николаевича и Ольги Ивановны Рожанских; всего в семье было четверо детей: два сына и две дочери.
- 1894 – поступление в 4-ю киевскую гимназию.
- 1899 – поступление в Первую Императорскую киевскую гимназию; в этой гимназии немного позже учился К.Г. Паустовский; учился в ней и М.А. Булгаков, описавший ее в романе «Белая гвардия». Рожанский, проучившись всего один выпускной год в этой гимназии, блестяще окончил ее, получив золотую медаль в 1900 году.
- 1900 – поступление на физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета (физическое отделение), где преподавали крупнейшие физики университета О.Д. Хвольсон и И.И. Боргман; начало научной работы под руководством И.И. Боргмана.
- 1904 – окончание Санкт-Петербургского университета (диплом с отличием); оставлен при физико-математическом факультете для «приготовления к профессорской и преподавательской деятельности»; работа лаборантом (по нынешней терминологии – ассистентом) на кафедре физики Петербургского электротехнического института, которую возглавлял в то время А.С. Попов.
- 1905–1906 – работа в Геттингене в Институте прикладного электричества у профессора Германа Зимона.
- 1906 – публикация первой научной работы «К теории поющей дуги» [12].
- 1911 – защита магистерской диссертации «Влияние искры на колебательный ряд конденсатора»; присуждение премии А.С. Попова.
- 1911–1921 – харьковский период.
- 1911 – приват-доцент Харьковского университета.
- 1914–1921 – профессор Харьковского университета.

В 1911 году Д.А. Рожанский читал в Харьковском университете кроме курса физики курс метеорологии и физической географии, а также заведовал магнитно-метеорологическим кабинетом кафедры и метеорологической станцией. В 1912 году он был назначен исполняющим обязанности экстраординарного профессора по магнитно-метеорологическому отделению кафедры физики. До осени 1914 года он заведовал этим отделением и метеорологической станцией. Осенью Дмитрий Аполлинариевич становится ординарным профессором и заведующим всей кафедрой физики. Он занимал эту должность до осени 1921 года.

Д.А. Рожанский организовал научный физический семинар, к работе которого широко привлекал студентов. Вскоре семинар стал центром физической научной мысли Харькова. Эти годы он интенсивно занимается научной работой.

«Вот примерная тематика его собственных исследований и работ, проведенных под его руководством на кафедре физики в 1912–1916 гг.:

1. Колебания в связанных цепях и их теория.
2. Свойства электрической дуги.
3. Влияние искры на период электрических колебаний.
4. Применение трубки Брауна к исследованию колебательного разряда.
5. Влияние искры на резонансные кривые.
6. Исследование разряда в разреженных газах.
7. Поглощение катодных лучей веществом.
8. Измерение радиоактивности некоторых препаратов.
9. Магнитная восприимчивость некоторых парамагнитных тел.
10. Работы по спектроскопии.

Результаты этих работ были опубликованы в 1912–1920 годах» [10].

В 1913–1914 гг. Д.А. Рожанский написал несколько глав для курса физики О.Д. Хвольсона. В это же время вышла его известная книга «Учение об электромагнитных колебаниях и волнах» [13].

Нет нужды писать о том, что жизнь Украины в рассматриваемый период была весьма сложной. Было трудно, но работа на кафедре продолжалась.

1921–1923 – нижегородский период (работа в Нижегородской радиотехнической лаборатории).

Дмитрий Аполлинариевич одним из первых принял участие в работе этой лаборатории, созданной в 1919 году М.А. Бонч-Бруевичем по декрету, подписанному В.И. Лениным, а в 1921 году его пригласили туда на постоянную работу. Рожанский стал одним из тех, кто создал славу этой лаборатории, проведя серию фундаментальных работ по теории антенн («метод наведенных эдс», в котором расчет сопротивления излучения проводился путем учета обратного действия поля, создаваемого излучающей системой, на саму систему). Здесь же он начал создавать теорию кварцевой стабилизации ламповых генераторов, принимал активное участие в расчете антенны для первого советского радиопередатчика на Ходынской радиостанции.

По приглашению А.Ф. Иоффе в 1923 году Д.А. Рожанский переезжает в Петроград. Одна из причин переезда – раскол в лаборатории, вызванный «диктаторским» поведением ее руководителя М.А. Бонч-Бруевича – человека деспотичного и не терпящего соперников. Авторы [10] так описывают сложившуюся ситуацию.

«А такой соперник у него появился. Это был известный радиофизик и радиотехник, профессор В.П. Вологдин, который разрабатывал там альтернативный метод получения радиоволн с помощью высокочастотных машин. Автор собственного метода, М.А. Бонч-

Бруевич относился к методу Вологодина резко отрицательно, мешал ему в работе, в спорах с ним вел себя, по мягкому выражению Д.А. Рожанского, «очень некорректно». Дмитрий Аполлинариевич стал на сторону В.П. Вологодина. Когда в 1923 году в лаборатории произошел окончательный раскол, он ушел из лаборатории вместе с В.П. Вологодиным и работавшим с ними известным изобретателем А.Ф. Шориным».

1923–1936 – ленинградский период. Профессор Политехнического института, работа в Физико-техническом институте.

В это же время Д.А. Рожанский продолжал руководить работой харьковских физиков, и его по праву можно отнести к создателям в Харькове физико-технического института. Он одним из первых оценил важное значение сверхвысоких частот для дальнейшего развития как радиотехники, так и всей радиофизики. В 1924–1925 годах Дмитрий Аполлинариевич организовал в Харьковском университете цикл исследований по генерации дециметровых и сантиметровых волн, а в 1927–1929 годах он продолжает руководить работами по генерированию таких волн магнетронами. В 1927 году выходит его работа «Возникновение коротковолновых незатухающих колебаний внутри катодной лампы» [14], в которой Д.А. Рожанский обосновывает возможность получения коротковолнового излучения (с длиной волны до 10 см), используя электроды лампы в качестве колебательного контура. Интересно, что Дмитрий Аполлинариевич качественно пытается описать процессы, происходящие в лампе, не феноменологически, говоря об электрическом токе, а рассматривая движение электронов. Некоторые историки науки просматривают в этой работе путь к открытию принципа действия клистрона. В частности, в уже цитированной книге о Рожанском [10] написано следующее.

«В первой половине 1930-х годов деятельность его развивалась в трех основных направлениях.

Во-первых, это проблема клистрона. В 1932 году он первым обратил внимание на возможность фазовой фокусировки электронных пучков и применения ее в электронно-лучевой трубке для генерации электромагнитных колебаний.

Он разработал проект такого генератора, указав, таким образом, новые пути генерации радиоволн в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. С полным основанием можно сказать, что Д.А. Рожанский в 1932 году открыл принцип действия клистрона».

В известной обзорной статье Р. Варнеке «Эволюция принципов действия современных электровакуумных приборов для СВЧ» [15] в разделе, в котором излагается история создания пролетного клистрона, есть следующее замечание: «Насколько известно из русской литературы, физик Рожанский якобы провел исследования, преследовавшие ту же цель [16], но соответствующая публикация не известна автору». Судя по всему, публикации не было: все осталось в отчетах об исследованиях. В [10] есть подтверждение этому. «По-видимому, он был так занят и своими собственными исследованиями и руководством работой своих, более молодых учеников и коллег, что просто руки не доходили до представления результатов в виде, пригодном для публикации. Что ж, понятно, но очень жаль... Нет печатной работы по клистрону, практически ничего не опубликовано по радиолокации. А ведь по свидетельству учеников... объем работы, выполненной Д.А. Рожанским, огромен».

1930, 25 сентября – выступление на собрании Института.

1930, 4–5 октября – арест.

1931, 26 июля – освобождение.

В указанный период (точнее, с 1927 года) в стране вслед за коллективизацией началась расправа с интеллигенцией, в первую очередь, с ведущими инженерами угольной, пищевой, тяжелой промышленности. Причем с 1928 года судебные процессы становятся публичными («Шахтинское дело», процесс «организаторов голода», процесс по делу несуществующей «Промпартии»). Все подсудимые должны были признаться (и признавались) в мнимых преступлениях, связанных со «шпионажем» в пользу иностранных разведок и русской эмиграции. Но этого было мало. Как пишет А.И. Солженицын [17, с. 59], «с этого момента предпринят важный шаг... ко всенародному распределению ответственности за канализацию» (так А.И. Солженицын называет все потоки репрессированных. – *Д.И.Т.*). И далее: «оставшиеся на «поверхности» должны были славить суд и радоваться судебным расправам... (Это предусмотрено! – пройдут десятилетия, история очнется, – но следователи, судьи и прокуроры не окажутся более виноваты, чем мы с вами, сограждане!)».

Кампания требования смерти «врагам народа» не обошла и Политехнический институт. Слово сыну Д.А. Рожанского Ивану Дмитриевичу (цитируется по [10, с. 132–134]).

«Какие-то конкретные мотивы ареста? У Солженицына в «Архипелаге» фамилия моего отца упоминается. А дело заключалось в следующем. В декабре 1930 г. у нас тогда был период вредительства, на самом деле оно нигде никогда не существовало. Все больше и больше, в 1930 г. это была прямо мания такая, везде высматривать вредительство. В частности, в газете было неожиданно опубликовано обвинительное заключение по делу работников пищевой промышленности. Было сказано, что раскрыта организация, которая старалась всячески сорвать снабжение населения продовольственными товарами. Там перечислялись 48 человек, которые участвовали в этой организации, это были, в основном, инженеры-технологи с дореволюционным прошлым. Было сказано, что коллегия Верховного суда рассмотрела это дело, приговорила всех к высшей мере наказания, и приговор был приведен в исполнение. Так сразу было сказано.

Как тогда было принято, в учреждениях собирали собрания, которые должны были одобрять эти приговоры, было такое собрание на факультете. Там должен был быть доклад чей-то, затем голосование – одобрить приговор, и все проголосовали за, а отец воздержался. Председательствующий спросил его, по каким мотивам он воздерживается. Отец сказал, что он ничего не может сказать об этом деле, что он, конечно, против вредительства, но и против смертной казни, поскольку считал, что эти люди еще могут принести пользу. Поэтому он не может одобрить этот приговор. И все. Это было числа 25 сентября, а 28 – в «Ленинградской правде» появилась заметка, которая называлась «Рожанским не место в семье советских ученых». У меня даже есть вырезка, где-то она у меня в бумагах хранится. Было написано в типичном для того времени хамском духе, грубо очень, помню, фраза была «в то время как советские люди единогласно одобряют этот приговор, вот нашелся один такой отщепенец, этот самый Рожанский, который голосовал против». Это послужило, очевидно, поводом к аресту. В ночь с 4 на 5 октября он был арестован. Он пробыл в заключении сравнительно недолго, меньше года. Я помню летом, в августе месяце, я вернулся домой, и он был дома. А до этого было так. Вначале его допрашивали, хотели как-то привязать к «Промпартии». Как раз готовился процесс «Промпартии». Это не удалось, он никого не знал из тех, кто проходил по этому процессу, не был знаком, не был связан. От этого обвинения следователь вскоре отошел. Но тогда, в 1930 г., было сравнительно либеральное время, в том смысле, что еще не применялись такие методы допроса, как в 1937 г. Самое большое, что я знаю, что однажды следователь просто оставил отца в коридоре стоять и сказал: «Стойте, я приду» –

и ушел. И не приходил до утра. Он всю ночь должен был там стоять, причем стражник, который был рядом, не давал ему спать. Это, пожалуй, самое сильное, что применялось. А потом, через несколько недель, как-то перестали допрашивать. И он просто сидел в одиночке несколько месяцев. Он написал заявление на имя военного прокурора или главного прокурора о том, что он сидит, не знает, за что арестован, сидит без всякого следствия, и если не будут приняты меры, то он объявляет голодовку. Это подействовало, потому что вскоре после этого он был переведен в так называемое техническое бюро. «Шарашка», говорили еще. Где он и специалисты сидели и работали по специальности. Это было в 1931 г., и последние месяцы он был в этой «шарашке» в компании уже инженеров, специалистов. Были еще некоторые обстоятельства, почему он был выпущен. Во-первых, за него хлопотали, в частности, Иоффе хлопотал. У Иоффе были встречи с Кировым. Со слов Иоффе, Киров сказал ему так: «Если... он сам на себя не наговорит, то обещаю, что он будет выпущен». А кроме того, в тот период, в 1931 г. были опубликованы так называемые условия товарища Сталина, о политическом курсе страны в настоящее время. Одно из этих условий состояло в том, что надо перейти от политики репрессий по отношению к научно-технической интеллигенции к политике привлечения ее к социалистическому строительству. И многие незаконченные дела были прекращены. А людей, которые были арестованы, но не получили еще конкретных сроков, освободили. Так и мой отец, он был просто схвачен, и освобожден без всяких объяснений. Его сразу восстановили на работе, во всех должностях и званиях и т.д. И потом он работал до 1936 г.».

Конечно, освобождение Д.А. Рожанского было во многом случайным, противоречащим происходящему. Может быть, «виноват» в этом А.Ф. Иоффе, который ходатайствовал перед С.М. Кировым и Г.К. Орджоникидзе об освобождении Дмитрия Аполлинариевича. Возможно, причина иная: стране нужны были специалисты, и в 1931 году были опубликованы знаменитые «шесть сталинских условий строительства социализма», где, в частности, предлагалось не репрессировать, а привлекать старую научно-техническую интеллигенцию к социалистическому строительству и даже заботиться о ней. Рожанский попал в этот антипоток возвращаемых к жизни, по-видимому, потому, что и следствие было не закончено, и он ни в чем не «сознался» и ничего не подписал (в документах значилось, что он был выпущен за «недостаточностью улик»). В книге «Архипелаг ГУЛАГ» А.И. Солженицын, оценивая мужественное поведение Д.А. Рожанского, вопрошает: «Не сказать ли, что он выдержал поединок со Сталиным?» [17].

В интервью с Е.Н. Рожанской (приложение 4 в цитируемой ранее книге) описан удивительный по цинизму эпизод.

Журналист задает вопрос: «Он вернулся, ему не объяснили ничего, что к чему?»

Е.Н.: «Нет, ему ничего не объясняли. Однажды на улице он встретил своего тюремного врача. Тот очень удивился тому, что видит перед собой живого и здорового Дмитрия Аполлинариевича, и сказал: «Мы, кажется, сделали все, что могли, чтобы Вы не выжили». А к врачам Дмитрий Аполлинариевич не обращался, и жалоб у него каких-то особенных не было. Лежал он в тюремной больнице с эндокардитом».

По-видимому, не случайными в тюремном заявлении Д.А. Рожанского были слова: «Ваше обещание вычеркнуть меня из списка живущих...»

1932–1933 – начало работ по физике газового разряда.

1933, 1 февраля – избрание членом-корреспондентом Академии наук СССР по отделению естественных наук (физические науки).

1935, 28 сентября – начало работы по проблемам радиолокации.

В указанный период Д.А. Рожанский занимался проблемой газового разряда, создав в Ленинграде несколько лабораторий физики газового разряда.

В этих лабораториях проводились исследования низкотемпературной плазмы, физические процессы в газотронах, тиратронах и ртутных выпрямителях. Совместно с учениками (В.Ф. Коваленко и др.) были выполнены работы по исследованию электронной плазмы усовершенствованным методом зондов Ленгмюра.

Еще в «шарашке» Дмитрий Аполлинариевич начал писать книгу «Физика газового разряда» [18], которая вышла в свет уже после его смерти. Несомненно, книга была энциклопедией физики газового разряда и сохраняет свою ценность и сегодня.

Часть книги, а также заявления Д.А. Рожанского написаны карандашом на страницах сборника переводов стихов зарубежных поэтов 1920-х годов.

К последним годам жизни Д.А. Рожанского относятся и его работы в области радиолокации, началом которой в СССР можно считать эксперимент, осуществленный 3 января 1934 года, когда в Ленинграде с помощью небольшой, специально построенной установки, были зарегистрированы отраженные от самолета радиоволны.

Первые эксперименты использовали технику непрерывного излучения сигналов. Рожанский с сотрудниками предложили использовать импульсный метод излучения. Возглавляемой Д.А. Рожанским лаборатории к концу 1935 года удалось создать первую в мире радиолокационную установку и провести удачные эксперименты. К осени 1936 года была готова аппаратура, позволяющая обнаруживать самолеты, облучаемые импульсами ультракоротковолнового диапазона. Но 27 сентября 1936 года Д.А. Рожанского не стало.

По воспоминаниям сына, «... умер он... скоропостижно, от сердечного приступа: он упал и скончался тут же, мгновенно. Я думаю, это была милость судьбы какая-то, потому что в 1936–1937 гг. очень вероятен был повторный арест. Вероятность была велика, многих так арестовывали. И уже так благополучно дело не могло закончиться».

И еще о Д.А. Рожанском.

«Потрясающее трудолюбие, мастерство экспериментатора, недюжинный талант теоретика, организаторские способности, исключительно высокий моральный авторитет

1. Дмитрий Рожанский с родителями – Ольгой Ивановной и Аполлинарием Николаевичем, 1900 г.

2. Д.А. Рожанский в Берлине, 1908 г.

3. В нижегородской лаборатории, приблизительно 1921–23 гг.

4. Д.А. Рожанский среди сотрудников Центральной радиотехнической лаборатории (1-й слева); рядом с ним сидят А.Н. Щукин (будущий академик) и О.Р. Гильберт (в 1930 г. репрессирован и умер в тюрьме). Ленинград, середина 1920-х годов.

5. Физики Петрограда. В первом ряду, в центре – П.С. Эренфест, во втором ряду 2-й слева – А.Ф. Иоффе, 7-й – Д.А. Рожанский.

6. Д.А. Рожанский. Конец 1920-х годов.

7. В кругу семьи. 1930-е годы.

8. Анонимная статья в газете «Ленинградская правда» от 28 сентября 1930 г.

φωτο

фото

φωτο

фото

и человеческое достоинство – это неполный перечень качеств, характеризовавших Д.А. Рожанского... Но его творческая жизнь пришлось на труднейший период истории нашей страны, а тяжелые испытания, выпавшие на его долю, привели к безвременной кончине... И если отнести известные стихотворные строчки не только к поэтам, а ко всем людям творчества, то можно закончить рассказ об этом замечательном человеке цитатой из русской классики:

Тяжка судьба поэтов всех времен.

Тяжеле всех она казнит Россию» [10].

Мы уже указывали, что, работая в Ленинграде, Д.А. Рожанский курировал исследования в Харьковском государственном университете (ХГУ) и дважды в год приезжал в Харьков. Он всегда поддерживал молодых исследователей, «продвигал» многих из тех, кто потом стал знаменитым. Конечно, не случайно двое его студентов – А.А. Слуцкий в Харькове и Ю.Б. Кобзарев в Ленинграде (он тоже окончил ХГУ) – возглавили работы по созданию первых советских импульсных радаров. Авторы статьи [9] о формировании в ХГУ харьковского радиофизического сообщества указывают следующее: «Основным открытием Д.А. Рожанского в Харькове стал Абрам Слуцкий – самый выдающийся украинский ученый в области радиофизики и электроники в период между 1925 и 1950-м годами.

<...> Мы думаем, что А. Слуцкий (1881–1950) играл ключевую роль в формировании современной науки о радио. В 1910 году, как раз перед прибытием Д.А. Рожанского, он поступил на физико-математический факультет ХГУ. Рожанский начал вести очень интересный физический семинар, в котором принимали активное участие студенты. Именно это, по словам Слуцкого, навсегда определило его интерес к электронике. В 1916 году Слуцкий окончил университет и работал ассистентом в ХГУ (до 1928 года), а затем стал профессором на физическом факультете. 1928–1930 годы он провел в Германии, где работал у Баркгаузена. В 1937 году, без защиты диссертации, ему была присвоена степень доктора наук. В 1939 году он был избран членом-корреспондентом, а позже (1948) – академиком АН Украины. Он исследовал магнетрон и импульсный радар...

В ХГУ работа по исследованию электромагнитных колебаний была расширена после того, как в 1926 году была создана отдельная секция исследовательского факультета физики. После возвращения из Германии в 1930 году ее возглавил Слуцкий. Это было время быстрого развития харьковского радиофизического сообщества, так же как и других сообществ, организованных ранее в Москве и Ленинграде. Талантливые студенты и молодые ученые активно включились в исследования, основным из которых стало изучение магнетрона» [9].

9. Черновики книги Д.А. Рожанского «Физика газового разряда», написанные в тюрьме на страницах сборника переводов иностранной революционной поэзии.

10. А.А. Слуцкий, 1949 г.

11. «Журнал русского физико-химического общества», вып. 2, 1926 г. со статьей А.А. Слуцкого и Д.С. Штейнберга «Получение колебаний в катодных лампах при помощи магнитного поля».

12, 13 и 15. Макеты магнетронов, разработанные в Харькове в 1920–1930-х годах.

14. С.Ю. Брауде, 1948 г.

16. Рабочая группа по развитию теории магнетрона под руководством Син-итиро Томонаги, Япония, 1943 г.

17. Син-итиро Томонага, приблизительно 1977 г.

18. Первый патент П. Спенсера на магнетронную печь.

19. Перси Спенсер (справа) показывает магнетроны руководителю компании «Raytheon» Л. Маршаллу (первый слева) и военным.

В указанный период Слуцкий исследовал разрезные магнетроны и развивал теорию магнетронных колебаний в динактронном режиме. По воспоминаниям А.Я. Усикова (1904–1995) Слуцкину импонировала его роль – пионера исследований магнетрона. В лаборатории общие и теоретические исследования проводились самим Слуцкиным, а специфические проблемы изучались его сотрудниками.

Известный советский радиофизик Семен Яковлевич Брауде (1911–2006) вспоминает (цитируется по [9]): «Слуцкий был моим учителем, так как он читал лекции в ХГУ, где я учился. Именно он содействовал моему назначению в УФТИ сразу после окончания университета. Как ученый, я сформировался под его влиянием. Вместе мы опубликовали несколько работ, в основном посвященных теории магнетронных колебаний. Надо заметить, что он лично курировал все исследовательские проекты и каждый день обсуждал полученные результаты».

Еще одна неожиданная «магнетронная» дата – 100 лет со дня рождения Синитиро Томонаги (1906–1979). Казалось, какое отношение к магнетрону имеет Томонага, награжденный медалью Ломоносова АН СССР в 1964 году, получивший Нобелевскую премию по физике в 1965 году вместе с Ю. Швингером и Р. Фейнманом «За фундаментальный вклад в квантовую электродинамику, имеющий важное значение для физики элементарных частиц»? В японском журнале «AAPS Bulletin», целиком посвященном столетнему юбилею Томонаги, в библиографической справке выделена дата «1943, сентябрь–ноябрь – развита теория магнетрона с гладким анодом» и опубликована статья Коичи Шимода «Теория Синитиро Томонаги магнетронов с гладким анодом» [19]. Любопытное «вкрапление» военного времени в судьбу выдающегося теоретика!

В разделе «Рабочая группа по теории магнетронов» указанной статьи Шимода пишет, что во время Второй мировой войны, в сентябре 1943 года, на физическом факультете Императорского университета Токио была сформирована рабочая группа по теоретическому изучению магнетронов. Автор статьи участвовал в семинарах этой группы. На семинаре рабочей группы 10 сентября 1943 года К. Очиаи представил теорию, основанную на изучении кинематического движения электронов, а Т. Сакаи – теорию, основанную на газодинамическом подходе. Томонага построил теорию магнетрона при жестком допущении параболического распределения потенциала между катодом и цилиндрическим анодом, применив теорию возмущений из ранней квантовой теории, и представил ее на четвертом семинаре, 24 октября 1943 года. Дальнейшие исследования касались развития теории Томонаги и Котани. В них участвовали также Миязима, Хагихара. Окончательно результаты работ Томонаги были доложены 26 ноября 1943 года. Приходится лишь удивляться интенсивности и эффективности этих исследований. В 1948 году за эти работы Томонага и Котани получили премию Японской академии наук.

Заметим, что группа представляла весьма интересную компанию: Юсуке Хагихара (профессор небесной механики), Масао Котани (профессор теоретической химической физики), Татиоки Миязима (ассистент-профессор электромагнитной теории), Киичиро Очиаи (профессор теории относительности), Такузо Сакаи (профессор статистической физики), Синитиро Томонага (профессор теории поля) и некоторые другие.

Еще одна «магнетронная» дата – еще один пример *serendipity* – искусства использовать неожиданные случайности. Речь пойдет о магнетронной печи. Мы будем

использовать материалы статьи Вильяма Хэммарка «Самое величайшее изобретение с начала использования огня» [20], заключая текст из нее в кавычки. Вот первая цитата о том, сколь случайным и не случайным было изобретение печи.

«Многие из нас слышали, как инженер компании «Raytheon», пройдя однажды мимо лампы СВЧ, заметил, что конфета, находившаяся в его кармане, растаяла. Это навело его на мысль использовать СВЧ-волны для приготовления пищи. Такое происшествие или что-то типа этого могло произойти в действительности, но за этой историей кроется нечто большее. Идея – готовить еду с помощью микроволн – не была основана на отдельном случайном открытии. После выдвижения первоначальной идеи до начала использования микроволновых печей прошли годы, даже десятилетия, разработки и рекламирования».

В США над созданием магнетронной печи серьезно задумались после Второй мировой войны, в частности, когда на вопрос руководителя компании «Raytheon» Лоренца Маршалла: «Что мы будем делать после войны?» один из управляющих компании, Перси Спенсер предложил перейти с производства радаров на производство магнетронных печей. Маршалл знал Спенсера как энергичного человека и хорошего специалиста. Именно ему он доверил в 1925 году превратить его абстрактные идеи в действующие устройства, что потребовало создания электровакуумных приборов. Спенсер так проявил себя при создании этих устройств, что его коллега записал: «Имея бутылку из-под молока, консервную банку, немного упаковочной проволоки и ведро побелки, он может сделать любую электронную лампу».

Интересна биография Перси Спенсера. Он окончил только начальную школу и изучал основы вакуумной электроники во время службы на флоте во время Первой мировой войны. О себе он говорил, что, вдохновленный героизмом радиосвязистов «Титаника», освоил учебники, занимаясь самообразованием, будучи на вахте. Не менее предприимчивым был его брат Джон. Когда Джон работал на фабрике по производству прищепок, его посетила идея создания термостата. В разработке этой идеи участвовал и Маршалл, которому Джон в 1925 году и порекомендовал своего брата Перси для работы в компании «Raytheon». В компании Перси Спенсер своеобразно продолжил свое самообразование. Он поручил одному из инженеров каждую неделю приобретать все новые патенты на вакуумные приборы, рассматривать каждый из них, составлять краткую рецензию и выражать свое мнение о возможности применения этой идеи в «Raytheon». Затем Спенсер изучал доклады инженера с целью улучшить продукцию компании, что было крайне необходимо, поскольку из 19 лет своей истории 10 лет компания несла убытки, и только Вторая мировая война стала «золотым веком» для «Raytheon». Во всяком случае первые 20 лет успех компании зависел во многом от инженерного таланта Перси Спенсера, поэтому Маршалл в свое время доверил Спенсеру разрабатывать и производить вакуумные приборы.

«Неизвестно, как и когда Спенсер пришел к идее создания микроволновой печи, и даже было ли это его идеей. Во время войны, зимой, инженеры фирмы "Raytheon" часто прогуливались мимо ряда магнетронов (в радарах), работающих на открытом воздухе, и грели руки теплом, идущим от них. Магнетроны были закреплены на "специальных подставках", за счет которых в них постоянно поддерживался высокий вакуум, что увеличивало их надежность. Спенсер обратил внимание на эти подставки и придумал использовать большое количество таких подставок для нагревания микроволнами. В 1946 году он сообщит журналу "Fortune": "Один лишь Господь знает, какая огромная область применения будет у микроволн. Мы даже и не знаем всех возможных применений – высушивание ти-

пографской краски, лечение табакокурения... Их так много, что голова идет кругом". Он был очень захвачен идеей готовить пищу с помощью микроволн, так что в начале 1940-х годов он и другие инженеры начали обыгрывать идею использования электронных ламп из радара для нагревания пищи. Случай с конфетой, о котором часто говорят, мог побудить Спенсера экспериментировать с едой, но возможность использовать микроволновые приборы для нагревания была уже достаточно хорошо изучена»*.

Видимое и инфракрасное излучения всегда использовались для приготовления пищи: лесной костер древнего времени последовательно сменили домашний очаг, дровяная, угольная, газовая печи, керогаз, примус, газовая и электрическая плиты, гриль... Но эти виды излучения не могут проникнуть вглубь продуктов, поэтому приготовление происходит только благодаря проникновению тепла внутрь продукта за счет нагревания его поверхности. Микроволны могут проникать внутрь продукта и нагреть его внутри, но, увы, глубина проникновения невелика, и поэтому большие куски пищи после приготовления в микроволновой печи могут быть сырыми внутри.

«С разрешения Маршалла Спенсер и служащие "Raytheon" начали конструировать образцы печей. Первая из печей состояла из ненужного ведра, в отверстие на дне которого была вставлена электронная лампа. Исследователи использовали полученный прибор для приготовления поп-корна, и обнаружили, что яйца, если их нагревать слишком быстро, будут взрываться... Хотя самое главное состоит в следующем: что бы они ни готовили, еда всегда готовилась быстрее, чем при обычных способах. Маршалл был достаточно впечатлен полученными результатами, чтобы профинансировать дальнейшие исследования».

Заметим, что идея магнетронной печи могла прийти и из металлургии; на это указано, например, в статье «Можно ли зажарить мамонта в микроволновой печи?», вошедшей в книгу Л.Г. Асламазова и А.А. Варламова «Удивительная физика» [21]. Действительно, после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции была изобретена электроплавка, основанная на помещении куска металла в быстро меняющееся магнитное поле. В металле, как в проводнике, при изменении магнитного поля возникает ЭДС индукции $\mathcal{E} = -d\Phi/dt$ (Φ – магнитный поток, пронизывающий образец), приводящая к возникновению токов Фуко – вихревых индукционных токов. Линии тока повторяют замкнутые (отсюда название «вихревые») линии индукционного электрического поля. Когда протекает ток (обычный или индукционный), вызванный приложенным электрическим полем, выделяется джоулево тепло, что при достаточно больших амплитуде и частоте изменения магнитного поля (ЭДС индукции достаточно велика) может привести к плавлению металла. По мнению авторов указанной статьи, создание кухонного аналога электроплавильной печи было связано с полетами в космос, когда уже в 60-е годы прошлого столетия космонавты стали задерживаться на орбите все дольше и дольше, и питание из тюбиков стало их удовлетворять все меньше и меньше. (Правда, американцы начали раньше, и у них речь шла о бытовых применениях.) Если идти от электроплавильной печи, то аналогия прозрачна. Потребляемые человеком продукты в большой степени состоят из воды. Она – электролит (хоть и не очень хорошо проводит ток, но проводит), поэтому, если поместить, например, кусок мяса в переменное электромагнитное поле, в нем возникнут токи Фуко, энергия электромагнитного поля превратится в джоу-

*Известны были факты, когда птицы, попадающие в зону действия сверхмощных радаров, падают мёртвыми, но не обгоревшими, а как бы сварившимися.

лево тепло и произойдет тепловая обработка мяса. Поле должно быть достаточно интенсивным (отсюда – магнетрон) и для безопасности (вспомните про сварившихся птиц) его следует куда-либо запереть (негодное ведро у американцев) и сделать неподвижным.

Вернемся к американской истории магнетронной печи.

«Для конструирования и разработки дизайна нового устройства Спенсер обратился к Марвину Боку, молодому инженеру компании. Разработка устройства на продажу для гражданского населения была новым делом для «Raytheon». Большая часть продукции компании была выпущена для обученных специалистов, например, военных офицеров, которые могли после прочтения инструкции бережно обращаться с оборудованием. Печь же должна была быть более понятным приспособлением, чем любое военное устройство, так как должна была использоваться в ресторанах, которые теперь рассматривались как главный рынок сбыта. Она должна была быть по возможности автоматической, чтобы многие пользователи могли готовить на ней блюда быстрого приготовления...»

Основные проблемы, с которыми столкнулся Бок при разработке печи, сводились к следующим: чтобы получать однородное нагревание, следовало подобрать подходящую частоту, размер печной камеры, размер продуктов и их правильное расположение. Боку пришлось пройти непростой путь, излагать который мы не будем, пока он не создал первую магнетронную печь. Вес ее был порядка 30 кг, высота 157.4 см, а ширина и длина около 61 см. Печь пришлось подключить к напряжению 220 В и подвести к ней дополнительную водяную трубу для охлаждения магнетрона, который генерировал на частоте 2450 МГц. Первая печь была продана сразу после войны более чем за 2000 долларов, что эквивалентно 20000 долларов сегодня. Понятно, что такая печь не могла быть бытовым прибором.

Фирма потратила много сил на различные виды рекламы печи, включая хорошо продуманные сценические постановки для представления специалистам по закупке микроволновых печей для ресторанов. Акцент все время делался на быстроту приготовления пищи. Программа создания печи то почти умирала, то возрождалась.

В статье Вильяма Хэммарка [20] много любопытных деталей работы различных менеджеров. Интересен рассказ о подключении к созданию печей Новой японской радиоконпании, которая создала дешевые магнетроны. Довольно красочно описано подключение к демонстрации печи Джоан Андерсон, которая назвала ее «прибором для женщин и покупкой только для женщины». Она говорила своим продавцам: «Никогда не лгите и не преувеличивайте возможности печи. Это – и так чудо».

«Она научила демонстраторов, как объяснить, что это за чудо: "Это простая вещь, в ней нет ничего необычного. Есть энергия, это – микроволновая энергия, которая, по существу, атакует молекулы воды в вашей пище... она активизирует эти молекулы". Потом она вытянула руку и начала трясти ей, как бы показывая, как молекулы воды вращаются с очень большой скоростью, больше, чем два миллиарда раз в секунду. "Такое вращение вызывает трение, а, как известно, трение сопровождается выделением тепла. Поэтому ваша пища готовится сама"» [20].

В 1970 году «Raytheon» и ряд других фирм США продали 40000 печей по цене 300–400 долларов. Однако к 1971 году японцы начали экспортировать дешевые печи по цене 100–200 долларов. За счет, в основном, японских производителей к 1985 году было продано уже 10 миллионов печей. Таков путь микроволновой печи от дорогого чуда до предмета повседневной необходимости.

Вернемся к собственно печи, которая стоит в вашей квартире и на задней стенке которой написана стандартная частота 2450 МГц, соответствующая длине волны $\lambda \sim 12,25$ см. Почему выбрана такая частота? Известно, что камера печи – объемный резонатор, на длине которого должно укладываться целое число волн «запертого» излучения. В резонаторе с помощью магнетрона возбуждается стоячая электромагнитная волна, узлы которой расположены на стенках. Размер резонатора и определяет длину волны.

Не исключено, что многие сталкивались со следующей ситуацией. Вы поместили в печь большой кусок замороженного мяса и включили ее. Сквозь прозрачную дверцу печи видно, как мясо зажаривается, и минут через тридцать кажется совсем готовым. Но, разрезав его, вы обнаруживаете внутри куска не только сырую, но даже не разморожившуюся область. В чем дело? Первое, что приходит в голову, такой конфуз связан с неравномерным распределением поля внутри печи. Действительно, камера имеет длину порядка 30 см, а длина волны излучения – порядка 12 см. Узлы приходятся на стенки камеры, поэтому внутри ее по меньшей мере три узла стоячей волны, где интенсивность поля равна нулю, поэтому кусок непрожаренного мяса мог оказаться как раз в одном из этих узлов. В вашей печи эту проблему решают вращением столика с приготавливаемой пищей внутри камеры, тем самым усредняя действие сверхвысокочастотного поля по объему камеры.

Интересно, как Бок решал эту проблему «смешивания мод».

«Сначала он попытался использовать маленький мотор, который двигает одну из стенок печи вперед-назад, но это оказалось слишком сложным и дорогим для массового производства частично из-за самого мотора, частично из-за того, что излучение проникает в отверстие между подвижной стенкой и корпусом печи». Тогда Бок выбрал иной путь. «Он повесил к верхней стенке вращающиеся рейки. Мотор вращал их примерно два или три раза в секунду. После того, как излучение достигало верха печи, оно отражалось, направляясь к рейкам. Такой "смеситель" частично пропускал и останавливал определенную часть волн, создавая постоянно изменяющийся сдвиг стоячих волн. Несмотря на то, что решение было несовершенным (даже сегодня ни одна микроволновая печь не нагревает пищу равномерно), такой метод позволил распределить микроволновую энергию довольно равномерно».

Как пишут Асламазов и Варламов: «Так что, казалось бы, загрузив тушу найденного в леднике мамонта на столик размером с карусель и поместив в соответствующего размера СВЧ-печь, можно было бы через некоторое время попробовать хорошо пропеченное жаркое из мамонятины».

Увы, непреодолимым препятствием на пути к лакомству мамонятиной является скин-эффект – свойство высокочастотных токов протекать лишь в поверхностном слое проводника. На сверхвысоких частотах электромагнитное поле, направленное вглубь большого куска мяса, из-за затухания просто не дойдет до его середины и не прожарит эту область.

Оценим эффективную глубину проникновения электромагнитного поля в проводник в зависимости от частоты и свойств проводника, используя анализ размерностей [21]. Предположим, что электромагнитная волна с частотой ω падает нормально на плоскую границу проводника, внутри которого начинает затухать по амплитуде, поскольку электрическое поле волны заставляет свободные электроны двигаться, возникают токи, и энергия волны тратится на нагрев (джоулевы потери). Затухание

волны происходит по закону

$$E(x) = E(0)e^{-x/\delta(\omega)},$$

где $E(0)$ – амплитуда напряженности электрического поля волны; $E(x)$ – амплитуда на расстоянии x вглубь проводника; $\delta(\omega)$ – длина, на которой поле ослабевает в e раз, то есть эффективная глубина проникновения поля. От чего зависит величина $\delta(\omega)$ (кроме частоты, поскольку эта зависимость очевидна: при $\omega=0$ постоянный ток течет по всему сечению проводника)? Следует принять зависимость δ и от проводящих свойств образца, то есть от удельного сопротивления ρ или удельной проводимости $\sigma = 1/\rho$. Эта зависимость понятна, так как мощность джоулевых потерь в единице объема V при скин-эффекте имеет вид

$$\frac{P}{V} = jE = \frac{E^2}{\rho} = \sigma E^2,$$

поскольку из закона Ома $j = \sigma E$, где E – напряженность электрического поля в данной точке проводника. Чтобы учесть существование магнитной индукции, создаваемой током в окружающем пространстве, введем в число определяющих величин размерную магнитную постоянную $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м⁻¹. Будем пренебрегать так называемым током смещения, считая, что магнитное поле создается только реальными токами и переменное электрическое поле можно не учитывать. Это означает, что мы не будем включать в число определяющих величин электрическую постоянную ϵ_0 . Данное предположение выполняется на рассматриваемых частотах весьма точно.

Тогда можно записать, что

$$\delta = C\omega^\alpha \sigma^\beta \mu_0^\gamma,$$

где C , α , β , γ – постоянные. Составим матрицу размерностей в системе LRT , где L – длина, R – сопротивление, T – время, учитывая, что в этой системе RT измеряется в Генри, а μ_0 имеет размерность RTL^{-1} . Тогда

	ω	σ	μ_0
L	0	-1	-1
R	0	-1	1
T	-1	0	1

Следовательно,

$$L = L^{-\beta-\gamma} R^{-\beta+\gamma} T^{-\alpha+\gamma}$$

и

$$\left. \begin{array}{l} -\beta - \gamma = 1 \\ -\beta + \gamma = 0 \\ -\alpha + \gamma = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \alpha = \beta = \gamma = -\frac{1}{2}.$$

Поэтому

$$\delta(\omega) = C\sqrt{\frac{1}{\mu_0\omega\sigma}}.$$

Строгий расчет на основе решения уравнений Максвелла показывает, что $C = \sqrt{2}$. Для частоты $\nu = 2.45 \cdot 10^9$ Гц при $\sigma_1 \sim 6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (медь) и $\sigma_2 = 2.5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (мышца, что должно подходить для куска мяса) получим

$$\delta_1 = 10^{-3} \text{ см}, \quad \delta_2 = 1 \text{ см}.$$

Каковы выводы? Их делают Л.Г. Асламазов и А.А. Варламов.

«Даже наш пробный кусок мяса с характерным размером 10 см великоват – напряженность поля, а с ней и выделяемая мощность падают в центральной области во много раз, и единственным источником тепла остается теплопроводность. А уж что касается нашего гипотетического жаркого из мамонта, то для него скин-эффект приобретает до обидного прямой смысл – прожариться сможет в лучшем случае лишь толстая мамонтовая кожа, мясо же останется сырым»*.

Заметим, что оценка, аналогичная проведенной выше, для глубины проникновения радиоволны в мозг говорящего по сотовому телефону GSM (частота $\nu \sim 1800$ МГц) дает значение $\delta \sim 1.095$ см.

Закончим изложение истории создания американской магнетронной печи цитатой из упоминавшейся неоднократно статьи [9].

«История создания микроволновой печи включает в себя много сведений о технологиях второй половины двадцатого века. Она раскрывает большое влияние технологий времен Второй мировой войны на нашу жизнь; она ставит во главу угла развитие электроники как самой большой силы, сыгравшей роль в изменении технологий. Она отражает, как развивались рекламное дело и маркетинг. Она, наконец, показывает большое изменение в роли женщины из-за индустриализации домашнего хозяйства».

Даты других важных событий, относящихся к нелинейной динамике.

435 лет со дня рождения Иоганна Кеплера (1571–1630) – одного из творцов небесной механики. Используя наблюдения датского астронома Тихо Браге и свои собственные, Кеплер открыл законы движения планет (три закона Кеплера). Он показал, что действительное перемещение планет, включая Землю, вокруг Солнца происходит не по кругам, а по эллипсам, и представил точные законы этих перемещений. Велик вклад Кеплера в оптику. Известен он и как конструктор телескопа. У него есть идея тяготения и мысль о том, что причиной приливов и отливов в океанах является Луна. Именно он предложил понятие силы как причины ускорения. И все эти величайшие деяния Кеплера происходили на фоне слабого здоровья, семейных неудач, тяжелого материального положения, религиозных преследований...

Конечно, жизнь Кеплера заслуживает отдельного повествования, но о нем очень много и подробно написано (см., например, [22; 23, т. 1, с. 37]. Замечательная статья Ю.А. Данилова «Гармония и астрология в трудах Кеплера» [24] начинается краткой, но объемной характеристикой Кеплера: «Не будет преувеличением сказать, что из всех своих современников Иоганн Кеплер был, пожалуй, одной из наиболее ярких, противоречивых и драматических фигур, романтиком (в смысле В. Оствальда) и еретиком, постоянно бросавшим вызов догмам, будь то догмы астрономии, религии или астрологии».

*В цитируемой книге есть замечательная задача: можно ли с помощью СВЧ-печи приготовить столь немислимое блюдо как... запеченное в тесте мороженое.

225 лет со дня рождения Симеона Дени Пуассона (1781–1840) – французского механика, математика, физика. Физические исследования относятся к электричеству и магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний, теории света.

220 лет со дня рождения Доменика Франсуа Араго (1786–1853) – французского ученого и политического деятеля, научные работы которого относятся к астрономии, физике, математике, метеорологии. Замечательны его биографии Карно, Гаспара Монжа, Жозефа Фурье, Малюса, Томаса Юнга, Френеля, Гей-Люссака, Александра Вольта, Ампера, Пуассона, Джеймса Уатта и др. Как роман читается автобиография Араго, отражающая его полную событий и приключений яркую жизнь. Несомненно, что именно она натолкнула Даниила Гранина на написание «Повести об одном ученом и одном императоре» [25], которая начинается так.

«Имя Араго хранилось в моей памяти со школьных лет. Щетина железных опилок вздрагивала, ершилась вокруг проводника... Стрелка намагничивалась внутри солонида... Красивые, похожие на фокусы опыты, описанные во всех учебниках, опыты – иллюстрации, но без вкуса открытия.

Маятник Фуко, торричеллиева пустота, правило Ампера, закон Био – Савара, закон Джоуля – Ленца, счетчик Гейгера... – имена эти сами по себе ничего не означали. И Араго тоже оставался прикрепленным к железным опилкам и магнитной стрелке, пока не попалось мне трехтомное его сочинение: «Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров».

В разного рода очерках по истории науки я встречал ссылку на эту книгу.

Историки часто пользовались ею. Она была написана более ста лет назад, и было странно, почему до сих пор к ней сохранился интерес. Ее цитировали почти все, в кавычках и без. Если можно судить о ценности работы по количеству ссылок на нее, то книга Араго в истории науки занимает одно из первых мест.

Книга сама служила первоисточником – вот в чем был секрет. Большею частью она состояла из воспоминаний Араго о своих современниках.

Это были его учителя – Лаплас, Пуассон, Гаспар Монж. Его друзья – Фурье, Ампер, Френель, Малюс, Гумбольдт. Он работал с Томасом Юнгом, Био, Пети. Он знал Лагранжа, Д'Аламбера, Дальтона, Кювье, Гершеля.

Однако «Биографии» заинтересовали меня не только фактами...

Где-то за фигурами героев, как шорох за сценой, как вычерки в рукописи, появлялась личность автора. Причем появлялась против его воли – вот что было любопытно: он всячески прятал себя и тем самым проступал, обозначался из умолчаний и недомолвок о самом себе...

Он только свидетель и летописец. Единственное, что он не прячет, это свою влюбленность. Никогда не скажешь, что его научные заслуги не меньше, а иногда и больше тех, о ком он пишет с таким уважением и восторгом».

250 лет со дня рождения Эрнста Флоренса Фридриха Хладни (1756–1827) – немецкого физика. Основные научные работы его относятся к акустике. Его по праву можно считать основателем экспериментальной акустики. Им открыты продольные колебания струн, стержней, пластин, камертонов, колоколов и крутильные колебания стержней. Наиболее известны «акустические фигуры Хладни», которые получаются при колебаниях пластины, посыпанной песком. Эти эксперименты дали толчок развитию теории мембран. Хладни изобрел ряд музыкальных инструментов. Он поистине является «отцом метеоритики» – открытой им области науки, сформировавшейся на стыке астрономии, физики, химии, минералогии и метеорологии.

Жизни этого выдающегося физика и удивительного человека посвящена интересная статья А.И. Еремеевой «Беспокойный гений Эрнста Хладни. К 250-летию со дня рождения», опубликованная в журнале «Природа» [26]. Статья оканчивается следующими словами. «Юношеская мечта Хладни – войти своими трудами в историю человечества – полностью осуществилась. Недаром вводную часть своего сочинения 1819 г.* он закончил латинским изречением: "Так доброе дело (давно желаемое), наконец, восторжествовало"».

100 лет назад умер Александр Степанович Попов (1859–1906) – один из изобретателей радио и радиолокации. Написано о нем много, но, пожалуй, наиболее эффективным и необычным следует назвать эссе М.А. Миллера «Об изобретении радио... и не только» [27].

90 лет со дня рождения Сергея Александровича Жевакина (1916–2001) – российского ученого, который сумел объяснить природу переменности блеска цефеид** и построить модель этого явления. Довольно подробная биография С.А. Жевакина изложена в статье Ю.Ю. Куликова и Р.В. Троицкого «Звезды, которые дышат. К 90-летию С.А. Жевакина. Разгадавший тайну цефеид», опубликованной в журнале «Природа» [28].

80 лет назад английский астрофизик и физик Артур Стэнли Эддингтон (1882–1944) высказал предположение, что источником энергии, обеспечивающим автоколебания звезд, может быть излучение, распространяющееся от центра звезды к ее поверхности. Для этого необходимо, чтобы вещество внутри звезды становилось менее прозрачным при сжатии и задерживало часть проходящего через него излучения, а при расширении звезды – более прозрачным, чтобы задержанное ранее излучение быстрее высвободилось. В 1953 году С.А. Жевакин показал, что нужными для этого свойствами обладает зона ионизации гелия (содержание гелия в звезде не менее 15%) и что с указанных выше позиций можно объяснить пульсации звезд.

В статье Ю.А. Фадеева «Пульсации звезд» [29], опубликованной в том же номере журнала «Природа», где и биография С.А. Жевакина, есть красивое и простое объяснение перехода пульсаций звезд к автоколебаниям. Приведем его.

«С термодинамической точки зрения каждый слой вещества звезды представляет собой элементарную тепловую машину, способную совершать положительную (нарастание колебаний) или отрицательную (затухание колебаний) механическую работу за счет энергии проходящего через этот слой излучения... Рассматривая звезду как совокупность большого числа тепловых машин, мы приходим к выводу, что пульсации всей звезды в целом могут возникнуть лишь при условии, если суммарная работа всех слоев вещества положительна: $A > 0$. В противном случае ($A < 0$) звезда устойчива относительно пульсаций и любые колебания в ней затухают.

По мере того, как в пульсационно неустойчивой звезде амплитуда колебаний нарастает, непрозрачность частично ионизованного газа при максимальном сжатии увеличивается, и механическая работа, совершаемая слоем за цикл, оказывается все больше. Однако это происходит лишь до тех пор, пока в данном слое газа остаются нейтральные

* Имеется в виду сочинение Хладни «Об огненных метеорах и падающих вместе с ними массах».

** Для классификации звезд используют интенсивность их блеска. В 1784 году было установлено, что звезда в созвездии Цефея, которой в астрономических каталогах присвоена буква δ (δ Цефея) периодически изменяет свой блеск с периодом порядка 130 часов. Сейчас таких звезд открыто много, и их называют цефеидами.

атомы. Как только все атомы ионизованы, дальнейшее усиление сжатия становится невозможным, так как приводит к уменьшению непрозрачности и увеличению потерь тепла, то есть уменьшению величины механической работы. Таким образом происходит переход к предельному циклу (автоколебаниям), когда суммарный вклад всех слоев, возбуждающих неустойчивость, компенсируется вкладом слоев, подавляющих колебания, то есть когда суммарная работа всех элементарных тепловых машин равна нулю: $A = 0$ ».

Простейшая проблема теории пульсации звезд – определение периода колебаний. Как сформулировать такую задачу, и какие величины выбрать в качестве определяющих, если решать ее на основе анализа размерностей?

Обычно полагают, что пульсации звезд – их периодические сжатия и разрежения – имеют довольно строго выраженный радиальный характер, и амплитуду пульсаций можно считать малой.

Оценим, следуя книге Э.А. Дибая и С.А. Каплана* «Размерности и подобие астрофизических величин» [30], зависимость периода колебаний от параметров звезды. В качестве определяющих величин выберем массу звезды M , светимость \mathcal{L} и радиус \mathcal{R} . Светимость – одна из важнейших единиц астрофизики. Под светимостью понимают количество энергии, излучаемой небесным телом за единицу времени, поэтому в системе LMT

$$[\mathcal{L}] = \frac{L^2 M}{T^3}.$$

Поскольку M , \mathcal{L} и \mathcal{R} имеют независимые размерности, их можно выбрать в качестве основных первичных единиц размерности.

Кроме указанных определяющих величин, следует добавить гравитационную постоянную \mathcal{G} , входящую в закон всемирного тяготения, поскольку сжатие звезды при пульсациях вызвано полем тяготения звезды. Наконец, при малых амплитудах пульсации определяются только периодом \mathcal{P} или частотой. Получилось пять определяющих величин. При этом отброшены такие «тонкости», например, как зависимость периода пульсаций от структуры звезды и ее химического состава, роль ионизации в поверхностных слоях, конвекция и т.п. Все эти факторы, конечно, влияют на период пульсаций, но это уже более высокое приближение в решаемой задаче.

Запишем искомую физическую зависимость в неявной форме:

$$f(M, \mathcal{L}, \mathcal{R}, \mathcal{G}, \mathcal{P}) = 0.$$

Число независимых размерностей равно трем. Согласно П-теореме должны быть два критерия подобия Π_1 и Π_2 , и предыдущее уравнение можно переписать в виде

$$f(\Pi_1, \Pi_2) = 0.$$

Составим матрицу размерности в системе LMT :

	M	\mathcal{L}	\mathcal{R}	\mathcal{G}	\mathcal{P}
L	0	2	1	3	0
M	1	1	0	-1	0
T	0	-3	0	-2	1

*Самуил Аронович Каплан (1921–1978) – известный советский астрофизик.

Используя матрицу размерности и определение размерности, найдем два безразмерных комплекса, в один из которых входит \mathcal{G} , а в другой – \mathcal{P} .

Тогда

$$\frac{[\mathcal{P}]}{[\mathcal{L}]^\alpha [\mathcal{M}]^\beta [\mathcal{R}]^\gamma} = 1, \quad \frac{T}{L^{2\alpha+\gamma} M^{\alpha+\beta} T^{-3\alpha}} = 1,$$

$$\left. \begin{array}{l} 2\alpha + \gamma = 0 \\ \alpha + \beta = 0 \\ 1 + 3\alpha = 0 \end{array} \right\} \alpha = -\frac{1}{3}, \quad \beta = \frac{1}{3}, \quad \gamma = \frac{2}{3}.$$

Таким образом,

$$\Pi_1 = \frac{(\mathcal{L}\mathcal{P})^{1/3}}{(\mathcal{M}\mathcal{R}^2\mathcal{P}^{-2})^{1/3}}.$$

Есть ли какой-либо физический смысл у этого критерия подобия? Оказывается, удобнее интерпретировать величину Π_1^3 , которая есть отношение энергии $\mathcal{L}\mathcal{P}$, излученной звездой за один период колебаний, к величине, характеризующей механическую энергию колебаний звезды ($\mathcal{M}\mathcal{R}^2\mathcal{P}^{-2}$). Аналогичным образом будем отыскивать и второй критерий подобия, который обозначим пока Π'_2 (почему, будет ясно потом).

Итак,

$$\frac{[\mathcal{G}]}{[\mathcal{L}]^{\alpha_1} [\mathcal{M}]^{\beta_1} [\mathcal{R}]^{\gamma_1}} = 1, \quad \frac{L^3 M^{-1} T^{-2}}{L^{2\alpha_1+\gamma_1} M^{\alpha_1+\beta_1} T^{-3\alpha_1}} = 1,$$

$$\left. \begin{array}{l} 2\alpha_1 + \gamma_1 = 3 \\ \alpha_1 + \beta_1 = -1 \\ -3\alpha_1 + 2 = 0 \end{array} \right\} \alpha_1 = -\frac{2}{3}, \quad \beta_1 = -\frac{5}{3}, \quad \gamma_1 = \frac{5}{3}$$

и, следовательно,

$$\Pi'_2 = \frac{\mathcal{G}\mathcal{L}^{-2/3}}{\mathcal{M}^{-5/3}\mathcal{R}^{5/3}}.$$

Образуем критерия подобия

$$\Pi_2^2 = \Pi'_2 \Pi_1^2 = \frac{\mathcal{P}^2}{\mathcal{G}^{-1}\mathcal{M}^{-1}\mathcal{R}^3}.$$

Тогда

$$\Pi_2 = \mathcal{P}\mathcal{G}^{1/2}\mathcal{M}^{1/2}\mathcal{R}^{-3/2}.$$

Критерий Π'_2 определяет период колебаний звезды. Эти колебания являются механическими, поэтому вместо Π'_2 используется критерий Π_2 , который не содержит светимость звезды.

Для средней плотности звезды можно написать соотношение $\bar{\rho} = \frac{\mathcal{M}}{(4/3)\pi\mathcal{R}^3}$.

С учетом этого из последней формулы получим

$$\mathcal{P}(\bar{\rho}) = \frac{\Pi_2}{\sqrt{(4/3)\pi\mathcal{G}^{1/2}}}.$$

Если считать правую часть этой формулы постоянной, то она выражает хорошо известное в астрофизике соотношение «период – плотность» для пульсирующих звезд. Для выяснения физического смысла безразмерного комплекса Π_2 применим к пульсациям звезды формулу для периода колебаний математического маятника, считая, что длина l маятника равна радиусу звезды \mathcal{R} . Кроме того, положим ускорение силы тяжести равным его значению на поверхности звезды, а именно $g = \mathcal{G}M\mathcal{R}^{-2}$. Тогда

$$\mathcal{P} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{\mathcal{R}^3}{\mathcal{G}M}}$$

или с учетом выражения для $\bar{\rho}$, $\mathcal{P} = \sqrt{\frac{3\pi}{\mathcal{G}\bar{\rho}}}$,

$$\mathcal{P}(\bar{\rho})^{1/2} = \sqrt{\frac{3\pi}{\mathcal{G}}}.$$

Легко видеть, что полученное выше соотношение «период – плотность» и последняя формула совпадают, если $\Pi_2 = 2\pi$.

Почему имеет место такое совпадение для столь разномасштабных объектов? Все дело в физической общности явлений, приводящих к малым пульсациям звезд и малым колебаниям маятника. И в том и в другом случае сущность колебаний одна и та же – механическое движение в поле тяжести, соответствующее небольшим отклонениям от положения равновесия.

Конечно, во многом сравниваемые явления различны. Они подобны только по одному критерию подобия. Более того, критерий подобия Π_1 не может считаться постоянным, он – разный для разных звезд и всегда много меньше единицы.

80 лет со дня рождения Рема Викторовича Хохлова (1926–1977) – одного из создателей отечественных школ по физике нелинейных волн, нелинейной оптике и нелинейной акустике.

75 лет назад вышла в свет книга выдающегося итальянского математика Вито Вольтерры «Lecons sur la Theorie Mathematique de la Luttle la Via» [31]. Русский перевод книги Вито Вольтерры вышел 30 лет назад, в 1976 году, под названием «Математическая теория борьбы за существование».

55 лет назад опубликованы статьи Петра Леонидовича Капицы «Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса» [32] и «Маятник с вибрирующим подвесом» [33].

Как и в предыдущих статьях и лекциях не все упомянутые даты описаны с одинаковой степенью подробности. Выбор дат по-прежнему на совести автора.

Появляются даты новейшей истории нелинейной динамики, но до них очередь еще не дошла.

Библиографический список

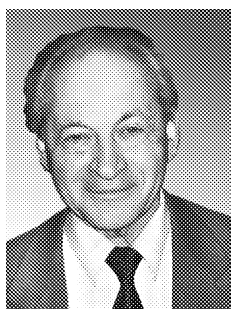
1. *Barkhausen H., Kürz K.* Die kurzesten, mit Vacuumröhren herstellbaren Wellen // Phys. Zs. 1920. Vol. 21, № 1. P. 1.
2. *Hull A.* The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders // Phys. Rev. 1921. Vol. 18. P. 31.

3. *Hull A.* The Magnetron // AIEE Journal. 1921. Vol. 49, 9. P. 715.
4. *Zachek A.* Über eine methode zur erzeugung von sehr Kurzen electromagnetschen wellen // Casopis pro Pest. Math. a Pyz (Pragye). 1924. Vol. 24. P. 115.
5. *Haban E.* Eine neue generatore // Zeitschrift fur Hochfrequenztechnik. 1924. T. 24. P. 115.
6. *Yagi H.* Beam transmission of ultra-short waves // Proceeding of the IRE. 1928. Vol. 16, № 6. P. 715.
7. *Okabe K.* On the short-wave limit of magnetron oscillations // Proceeding of the IRE. 1929. Vol. 17, № 4. P. 652.
8. *Okabe K.* Generation of undamped ultra-short waves by using magnetrons // J. Electrical Engineering. 1927. Vol. 47, 575, (in Japanese). P. 860.
9. *Kostenko A.A., Nosich A.I. and Tishchenko I.A.* Development of first Soviet three-coordinate L-band pulsed radar in Kharkov before WWII // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2001. Vol. 43, № 3. P. 29.
10. *Рожанский И.Д., Рожанская М.М., Филонович С.Р.* Дмитрий Аполлинариевич Рожанский. М.: Наука, 2003, 159 с.
11. Физики о себе. Л.: Наука, 1990. С. 237.
12. *Рожанский Д.А.* К теории поющей дуги // Журн. Рус. физ.-хим. о-ва, часть физ. 1906. Т. 38, вып. 8, разд. 1. С. 455.
13. *Рожанский Д.А.* Учение об электромагнитных колебаниях и волнах. СПб.: 1913, 106 с.
14. *Рожанский Д.А.* Возникновение коротковолновых незатухающих колебаний внутри катодной лампы // Докл. Акад. наук, серия А. 1927, № 23. С. 403.
15. *Варнеке Р.* Эволюция принципов действия современных электровакуумных приборов для СВЧ // Миллиметровые и субмиллиметровые волны. Сборник статей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. С. 11.
16. *Коваленко В.Ф.* Изв. АН СССР, сер. физ. 4. 1940. № 3. С. 489.
17. *Солженицын А.И.* Архипелаг ГУЛАГ: Опыт художественного исследования. Вермонт; Париж: УМСА-Press. 1989. Т. I, II.
18. *Рожанский Д.А.* Физика газового разряда. М.; Л.: ОНТИ, 1937. 348 с.
19. *Koichi Shimoda.* Theory of split-anode magnetrons by Sin-itiro Tomonaga // AAPPS Bulletin. 2006. Vol. 16, № 2, april. P. 17.
20. *Hammark W.* The greatest discovery since fire // IEEE Microwave Magazine. 2005. December. P. 62.
21. *Асламазов Л.Г., Варламов А.А.* Удивительная физика // М.: Добросвет, 2002. С. 108.
22. *Бельый Ю.А.* Иоганн Кеплер. М.: Наука, 1971.
23. *Араго Ф.* Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т. I-III. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
24. *Данилов Ю.А.* Причудливый мир науки. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2004. С. 138.
25. *Гранин Д.А.* Араго и Наполеон // Сад камней. М.: Современник, 1972. С. 127.

26. *Еремеева А.И.* Беспокойный гений Эрнста Хладни. К 250-летию со дня рождения // *Природа*. 2006. № 12. С. 58.
27. *Миллер М.* Всякая и не всякая всячина, посвященная собственному 80-летию. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 90.
28. *Куликов Ю.Ю., Троицкий Р.В.* Звезды, которые дышат. К 90-летию С.А. Жевакина. Разгадавший тайну цефеид // *Природа*. 2006. № 8. С. 14.
29. *Фадеев Ю.А.* Пульсации звезд // *Природа*. 2006. № 8. С. 16.
30. *Дибай Э.А., Каплан С.А.* Размерности и подобие астрофизических величин. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976, §1.
31. *Volterra V.* Lecons sur la theorie mathematique de la lutte la via, Paris, 1931; *Вольтерра Вито.* Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976.
32. *Капица П.Л.* Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // *ЖЭТФ*. 1951. Т. 21. С. 588.
33. *Капица П.Л.* Маятник с вибрирующим подвесом // *УФН*. 1951. Т. 44. С. 7.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 20.03.2007



Трубецков Дмитрий Иванович – родился в Саратове (1938). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1965) и доктора физико-математических наук в СГУ (1978) в области радиофизики. Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования. Научный руководитель Лицея прикладных наук и факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника сверхвысоких частот, теория колебаний и волн, нелинейная динамика, история науки. Автор более двадцати учебных пособий и монографий, а также более двухсот статей в периодической печати.