

В те далекие времена, когда еще не было ультразвуковых дефектоскопов...

Бархатов В.А.

В общем, так и начнем. В те далекие времена, когда еще не было ультразвуковых дефектоскопов и наш выдающийся ученый Сергей Яковлевич Соколов еще даже не предполагал, что можно прозвучивать твердые тела и находить дефекты. То есть примерно до 1928г. Что привело ученых к мысли сделать ультразвуковой дефектоскоп?

Современные услуги Интернет позволяют получить доступ в библиотеки всего мира, посетить виртуальные музеи, фотовыставки редких экспонатов. Любой пользователь компьютера, подключенный к сети, может получить исторические сведения и сформировать собственное мнение. Изучение истории науки и техники, очень увлекательное занятие. Медленное поступательное познание мира в первой половине 19-го века стало постепенно нарастать и концу века превратилось в лавину, которая обрушилась в бешеный 20-й век.

Идея этой работы – показать в каком огромном котле научных и технических достижений кристаллизовалась и выросла наша синтетическая отрасль – ультразвуковая дефектоскопия металлов.

Эта статья не претендует на скупуплезное историческое исследование. Большинство ученых и выдающихся инженеров 19-го и начала 20-го веков были универсалами. Они добивались результатов в разных, порой никак не связанных областях науки и техники. Подбирая материал для статьи невольно приходится как бы выдергивать факты, события из общей канвы истории и выстраивать их в определенном порядке, чтобы продемонстрировать переход от одного уровня знаний к другому. Поэтому заранее прошу прощения у требовательных читателей.

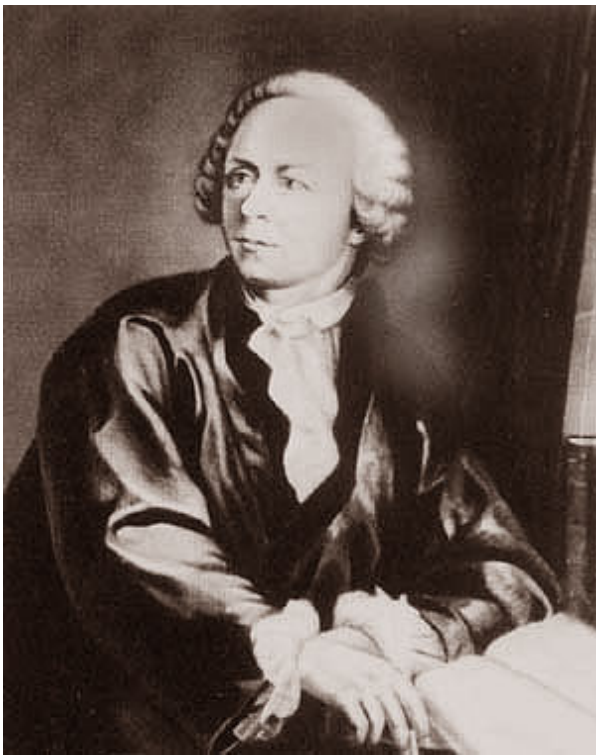
Развитие акустики и механики твердого тела

Теория механики и акустики сплошной среды создавалась постепенно в течение 18 и 19-го веков. Это направление связано с многими именами великих ученых того времени.

ЭЙЛЕР, ЛЕОНАРД (Euler, Leonhard) (1707–1783) входит в первую пятерку величайших математиков всех времен и народов. Фундаментальные результаты принадлежат Леонарду Эйлеру в рациональной механике. Он впервые дал последовательно аналитическое изложение механики материальной точки, рассмотрев в своей двухтомной *Механике* (1736) движение свободной и несвободной точки в пустоте и в сопротивляющейся среде. Позже Эйлер заложил основы кинематики и динамики твердого тела, получив соответствующие общие уравнения. Итоги этих исследований Эйлера собраны в его *Теории движения твердых тел* (1765). Совокупность уравнений динамики, представляющих законы количества движения и момента количества движения, крупнейший историк механики Клиффорд Трусделл предложил называть «Эйлеровыми законами механики».

В 1752 была опубликована статья Эйлера *Открытие нового принципа механики*, в которой он сформулировал в общем виде ньютоновы уравнения движения в неподвижной системе координат, открыв путь для изучения механики сплошных сред. На этой основе он дал вывод классических уравнений гидродинамики идеальной жидкости, найдя и ряд их первых интегралов. Значительны также его работы по акустике. При этом ему принадлежит введение как «эйлеровых» (связанных с системой отсчета наблюдателя), так и «лагранжевых» (в сопутствующей движущемуся объекту системе отсчета) координат.

ЛАГРАНЖ, ЖОЗЕФ ЛУИ (Lagrange, Joseph Louis) (1736–1813), французский математик и механик. Лагранж внес существенный вклад во многие области математики, включая вариационное исчисление, теорию дифференциальных уравнений, решение задач на нахождение максимумов и минимумов, теорию чисел (теорема Лагранжа), алгебру и теорию вероятностей. В двух своих важных трудах – *Теория аналитических функций* (*Théorie des fonctions analytiques*, 1797) и *О решении численных уравнений* (*De la résolution des équations numériques*, 1798) – подытожил все, что было известно по этим вопросам в его время, а содержащиеся в них новые идеи и методы были развиты в работах математиков 19 века.



Леонард Эйлер



Жозеф Луи Лагранж

ЛАПЛАС, ПЬЕР СИМОН (Laplace, Pierre-Simon) (1749–1827), французский математик, физик и астроном. Лаплас – автор фундаментальных работ по математике и математической физике, прежде всего – трактата *Аналитическая теория вероятностей* (*Théorie analytique des probabilités*, 1812), в котором можно обнаружить многие позднейшие открытия теории вероятностей, сделанные другими математиками. В нем рассмотрены некоторые вопросы теории игр, теорема Бернулли и ее связь с интегралом нормального распределения, теория наименьших квадратов; вводится «преобразование Лапласа», которое позже стало основой операционного исчисления. Широко известно уравнение Лапласа в частных производных, применяющееся в теории потенциала, тепло- и электропроводности, гидродинамике.

ФУРЬЕ, ЖАН БАТИСТ ЖОЗЕФ (Fourier, Jean-Baptiste-Joseph) (1768–1830), французский математик и физик. Фурье написал свой основной труд – *Аналитическая теория тепла* (*Théorie analytique de la chaleur*, 1822), в котором изложена теория теплопроводности, послужившая основой современных методов математической физики, относящихся к интегрированию уравнений в частных производных при заданных граничных условиях. Метод Фурье состоял в представлении функций в виде тригонометрических рядов (рядов Фурье) и нашел широкое применение в различных разделах физики и в акустике.

КОШИ, ОГЮСТЕН ЛУИ (Cauchy, Augustin-Louis) (1789–1857), французский математик. Научные работы Коши посвящены арифметике, теории чисел, алгебре, математическому анализу, дифференциальным уравнениям, механике, математической физике и т.д. Всего Коши написал свыше 800 работ, полное собрание его сочинений содержит 27 томов. Одна из первых работ Коши 1816г. - создание теории волн на поверхности тяжелой жидкости

Коши впервые дал четкое определение основным понятиям математического анализа – пределу, непрерывности функции, сходимости ряда и т.д. Он установил точные условия сходимости ряда Тейлора к данной функции и провел различие между сходимостью этого ряда вообще и его сходимостью к данной функции. Ввел понятие радиуса сходимости степенного ряда, дал определение интеграла как предела сумм, доказал существование интегралов от непрерывных функций. Нашел выражение аналитической функции в виде интеграла по контуру (интеграл Коши) и вывел из этого представления разложение функции в степенной ряд. Таким образом, он развил теорию функций комплексного переменного: используя интеграл по контуру, нашел разложение функции в степенной ряд, определил радиус сходимости этого ряда, разработал теорию вычетов, а также ее приложения к различным вопросам анализа и т.д. В теории дифференциальных уравнений

Коши впервые поставил общую задачу о нахождении решения дифференциального уравнения с заданными начальными условиями (называемую с тех пор задачей Коши), дал способ интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка.



Пьер Симон Лаплас



Жан Батист Жозеф Фурье

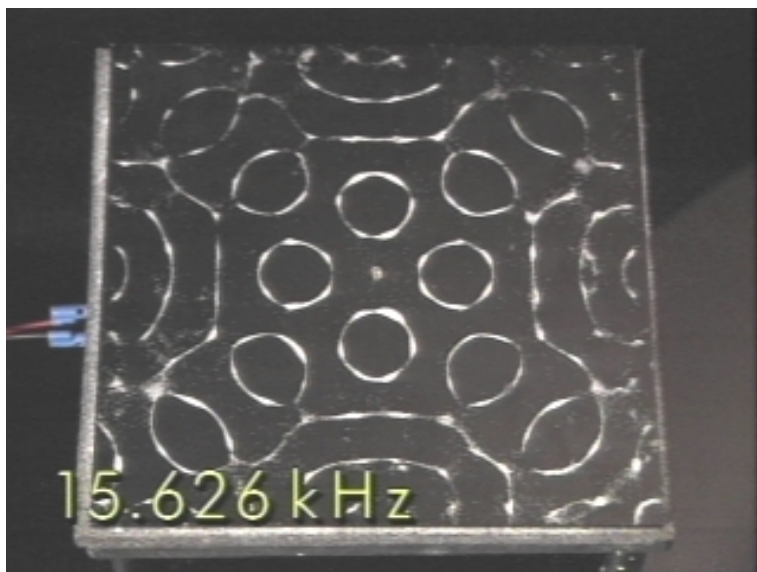


Огюстен Луи Коши

Эрнст Флоренс Фридрих Хладни (Ernst-Florens-Friedrich Chladni) решил проверить, какова будет реакция гибких пластин с порошком, если провести смычком по их краю. Так в 1787 г. появились его знаменитые звуковые фигуры, которые он описал в своем первом научном сочинении «Открытия в теории звука» (Лейпциг, 1787, репринтное издание в 1980 г.). Они показывали распределение стоячих волн, возникающих при вибрации пластинки, и стали в дальнейшем эффективным методом изучения собственных колебаний диафрагм различных акустических приборов.



Эрнст Флоренс Фридрих Хладни



Фигуры Хладни. Современный лабораторный опыт для студентов.

Уникальная возможность определения скорости звука на больших расстояниях представилась французскому исследователю Жану Батисту Био (Jean-Baptiste Biot) во время строительства водопровода в Париже, 1808г. Он произвел измерение скорости звука в водопроводных трубах длиной около 1000м.

Особенно нужно отметить экспериментальные работы французского ученого Вертгейма Гийома (Wertheim G.) выполненные с 1843 по 1851 годы. Ему принадлежат линейный закон зависимости оптических характеристик стекол от напряжений «закон Вертгейма», изучение

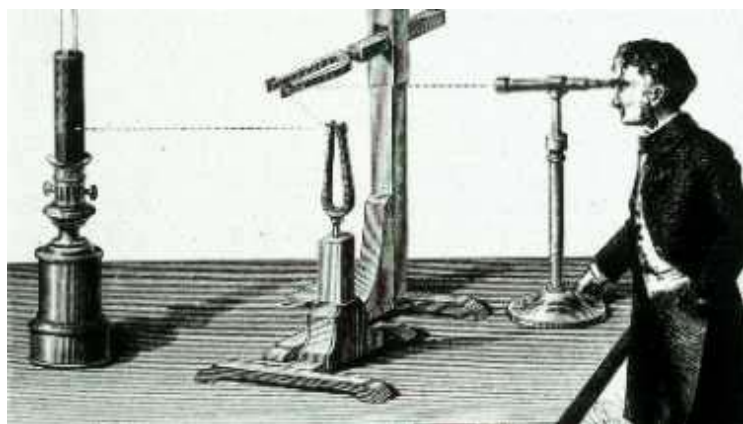
кручения стержней различных поперечных сечений, исследование распространения волн растяжения, первые работы по биомеханике (изучение упругости костей, тканей, мышц, артерий и нервов). В частности обнаружено, что мужские человеческие кости существенно крепче, чем женские.

Г.Вертгейм определил частоты стоячих волн в столбах жидкости и экспериментально изучил колебания пластин и стержней. Им обнаружено важное явление – «глубокий тон» колебаний стержней. В экспериментах с продольными колебаниями стержней появлялись колебания с частотой примерно в два раза ниже основного тона. Г.Вертгейм идентифицировал их как результат распространения сдвиговых волн в стержне.

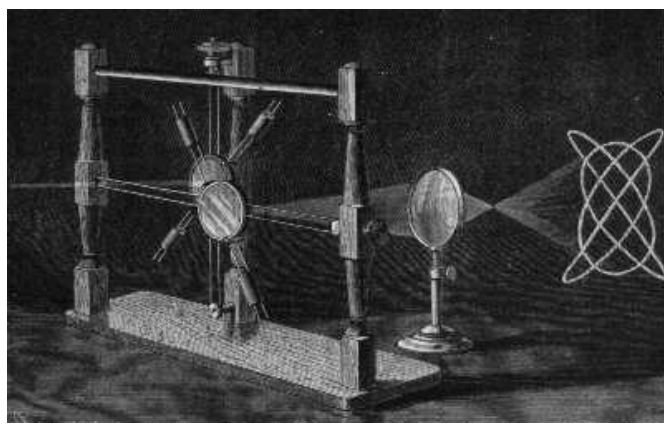
Все эксперименты Г.Вертгейма были поставлены очень тщательно и полученные результаты не вызывают сомнений. Страшный факт. Он покончил жизнь самоубийством, бросившись с колокольни собора святого Гатэна в г. Туре (Франция). Некоторые историки науки, например Дж. Белл, даже разделяют периоды становления механики и акустики сплошной среды «до Вертгейма» и «после Вертгейма».



Тонومتر 19-го века. Музейный экспонат.



Аппарат Лиссажу



Фигуры Лиссажу. Лабораторный опыт 19-го века.

Эксперименты с резонансными колебаниями различных объектов требовали определения частот. В 19-м веке широко использовался прибор – тонومتر. Он сильно похож на музыкальный инструмент с тем отличием, что звучащие цилиндры в нем были сделаны из металла с одинаковыми свойствами и имели точно известную длину. Исследователь-натуралист должен обладать идеальным слухом чтобы сопоставить частоту объекта и тонометра. Численное сравнение частот проводилось по соотношению длин цилиндров в тонометре.

Был также известен другой способ определения частот с помощью фигур Лиссажу. Впервые технология фигур Лиссажу обсуждалась Натаниэлем Бодичем (Nathaniel Bowditch) в 1815г. Существенно позже в 1857г. Юлий Антоний Лиссажу (Jules Antoine Lissajous) показал широкой публике аппарат для демонстрации своих фигур. Отклонение светового луча колебаниями двух независимых источников создает на экране множество сложных, меняющихся и завораживающих картин.

Ниже показаны некоторые акустические аппараты 19-го века. Посмотрите сколько труда, опыта и таланта вложено в эти приборы. Они демонстрируют глубокие знания акустики в 19-м веке. Если, например, предложить современному инженеру сделать хотя бы одноцилиндровую сирену, то у него вряд ли сразу получится эффективный излучатель звука.



*Волновая машина 1822г.
Учебное пособие. Демонстрация
волнового движения.*



*Параболические отражатели,
концентраторы звука в воздухе
1810г.
Учебное пособие.*



*Гармонограф 1875г.
Механический прибор для
наблюдения гармоник
колебаний.*



*Колесо Савата 1820г.
При вращении издает
жуткий звук.*



*Сирена 1840г.
Мощный излучатель
звука. Воздух подается
снизу.*



*Двухцилиндровая сирена Гельмгольца
1889г.*



Электромеханический синтезатор Фурье на 10 гармоник. Звуковой диапазон. 1870г.



Анализатор Фурье 1875г

Несколько слов о том, как появилась двухмодульная теория механики изотропного упругого тела. Начало теории упругости положили такие известные ученые как Исаак Ньютон, Томас Юнг, Роберт Гук. Первоначально главенствовала одноконстантная модель (закон Гука). В 1811г. известный физик и математик Симеон-Дени Пуассон (Poisson, Simeon-Denis) указал на существование поперечной деформации при растяжении твердого тела. Это явление характеризует коэффициент Пуассона.

Невозможно кратко описать все перипетии теории механики сплошной среды, заблуждения, переоткрытие законов, противоречие экспериментов, выполненных разными учеными. В общем, в середине 19-го века объединение всех частных линейных зависимостей сделал математик Габриэль Ламэ (Gabriel Lamé). Он предложил обобщенную теорию упругости. Всем известны постоянные Ламэ и их связь с модулем Юнга, модулем сдвига и коэффициентом Пуассона.

Замечательный факт. «Отмена» закона Гука в 1849г. Британская Королевская комиссия, «назначенная для того, чтобы исследовать применение железа для железнодорожных сооружений», рекомендовала инженерам впредь заменить линейный закон упругости Гука для железа при растяжении и изгибе параболической зависимостью,

$$\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^2, \quad \sigma - \text{напряжение}, \quad \varepsilon - \text{относительная деформация}.$$

В середине 19-го века при механических испытаниях твердых тел использовалась оптическая техника измерения перемещений. Достигнута разрешающая способность по деформациям примерно 10^{-6} .

В 1877г., Джон Уильям Струт, также известный как Лорд Рэлли, издал Теорию Звука «THE THEORY OF SOUND», которая объединила математические основы волнового движения и стала фундаментом акустики, а позднее и науки об ультразвуке. Более позднее переиздание этой книги 1945г. можно найти в интернете по ссылке <http://www.archive.org/download/theoryofsoundvol000709mbp>

Всем известны поверхностные волны Рэллея. Однако в книге «THE THEORY OF SOUND» проводится решение для волн, бегущих вдоль поверхности жидкости. Волны Рэллея на поверхности твердого тела были открыты только в первой половине 20-го века и нашли впоследствии применение в ультразвуковой дефектоскопии.

Вклад Д.Струта в акустику считался настолько существенными, что он был назначен в Палату Изобретений и Исследований Великобритании, орган, который впоследствии контролировал достижения в области гидролокации в течение первой Мировой войны.

Итак, в начале 20-го века уже полностью сформировалась механика и акустика сплошной среды. Создана математическая теория волнового движения, основанная на дифференциальных уравнениях

в частных производных. Решено множество прикладных задач, таких как резонансные колебания пластин, задачи распространения, отражения, интерференции и дифракции волн.



Симеон-Дени Пойсон



Габриэль Ламэ



Lord Rayleigh

*Джон Уильям Струт,
он же Лорд Рэлей*

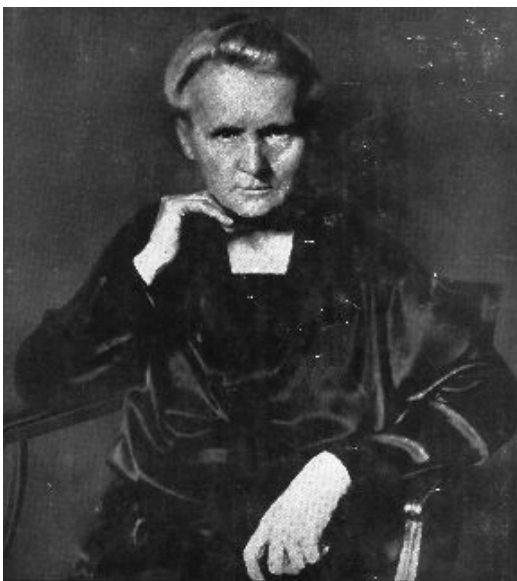
Открытие и исследование пьезоэффекта. Пьезоэлектрические компоненты.

В 1880г. Пьер и Жак Кюри (Pierre and Jacques Curie) сделали важное открытие. Братья Кюри заметили, что при оказании давления на кристаллы турмалина, кварца, топаза, сахара и сегнетовой соли, генерируется электрический заряд. Этот заряд был прямо пропорционален прикладываемой к кристаллу силе. Вначале эксперименты братьев Кюри были восприняты научной общественностью как курьезные выдумки и предположения.

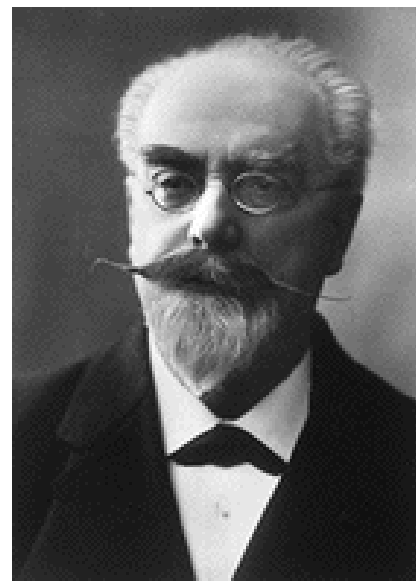
Эксперименты братьев Кюри в течении 1880-1881гг, устанавливающие основные соотношения между электрическим полем, механическими напряжениями и температурой, обеспечили признание нового явления. Начиная с этого времени комплекс свойств материалов, открытых Кюри, называют пьезоэлектричеством (piezoelectricity).



Пьер Кюри



Жак Кюри.



Габриэль Липман

В 1881г. Габриэль Липман (Gabriel Lippmann) нашел математическое описание пьезоэффекта на основе фундаментальных принципов термодинамики. Его формулы давали выражения пьезоконстант исходя из электро-упруго-механической модели.

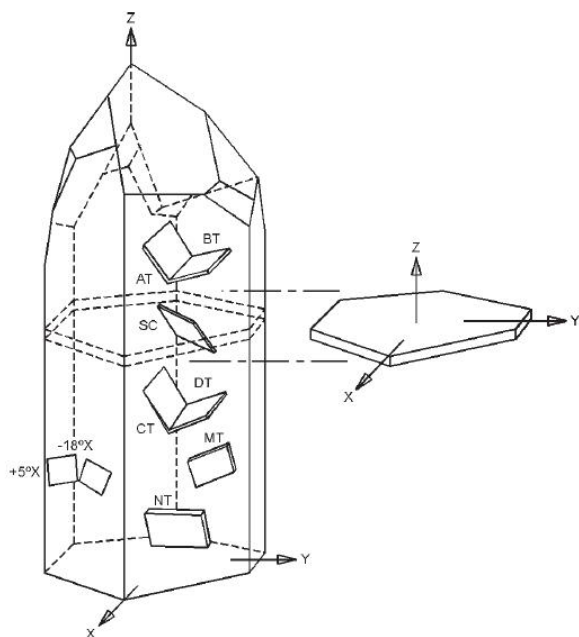
Начиная с 1882г. Европейское научное сообщество интенсивно изучало кристаллы с несимметричной структурой, обладающие пьезосвойствами. Исследовался взаимный обмен электрической и механической энергии в этих материалах, термодинамические соотношения, измерялись механические, электрические и температурные константы.

К 1910г. было обнаружено 20 классов кристаллических решеток, обладающих пьезосвойствами, определены все 18 тензорных пьезоконстант.

В 1910г. немецкий ученый с мировым именем Вольдемар Войгт (Woldemar Voigt) выпустил учебник «*Lerbuch der Kristallphysik*», который стал стандартом в понимании анизотропии физических свойств материалов и в частности пьезоэффекта. Физические представления были основаны на тензорном описании. К стати слово «тензор» введено в терминологию физиков и математиков тоже В. Войгтом в 1899г. В русскоязычной научной литературе как только не искажали фамилию бедного Вольдемара – Фогт, Войт, Вохт, Фохт. Это все один и тот же человек.



Вольдемар Войгт



Различные ориентации пьезопластин, вырезаемых из монокристалла кварца.



Современный кварцевый резонатор.

Первое практическое применение пьезоматериала (кварца) было сделано Лангевином и Чиловским во Франции (1915г.) – создан первый подводный эхолот.

Начиная примерно с 1920г успешное применение кварца в сонарах стимулировало создание пьезоэлектрических устройств всех видов – резонансных и не резонансных.

Как известно существенное повышение избирательности радиоприемников достигается применением кварцевых резонаторов. Первая работа о применении пластины кварца в качестве фильтра была опубликована Волтером Кади (Walter Cady) в 1922г. Она называлась - "The Piezo-Electric Resonator". Также в 20-е годы вышел большой цикл статей американского инженера-исследователя Волтера Масона (Walter P. Mason) о пьезоэлектрических фильтрах различного назначения.

Воздушные акустические локаторы

В журнале Scientific American за 1880г опубликована статья о новом устройстве - топофон профессора Майера (Mayer). Прибор состоит из коромысла, на котором установлены конусные концентраторы звукового давления. Акустические сигналы по трубкам поступают прямо в уши профессора. В левой руке он держит некий предмет. По одной версии это небольшая подзорная труба для визуального подтверждения цели. По другой версии это дудка. Профессор производил короткий звуковой сигнал и с помощью топофона слушал эхо. Как утверждается в статье, с помощью топофона можно было на больших расстояниях обнаруживать объекты, излучающие звук, например пароход в плохую погоду. Таким образом, профессор Майер изобрел первый в мире органолептический эхо импульсный локатор.

Курьезно выглядит факт, что в 1960г. идею профессора Майера повторил француз Джон Аустер (Jean Auscher). Его акустический локатор сделан из алюминиевого сплава и не содержит никакой электроники. Он крепится на элегантный шлем.



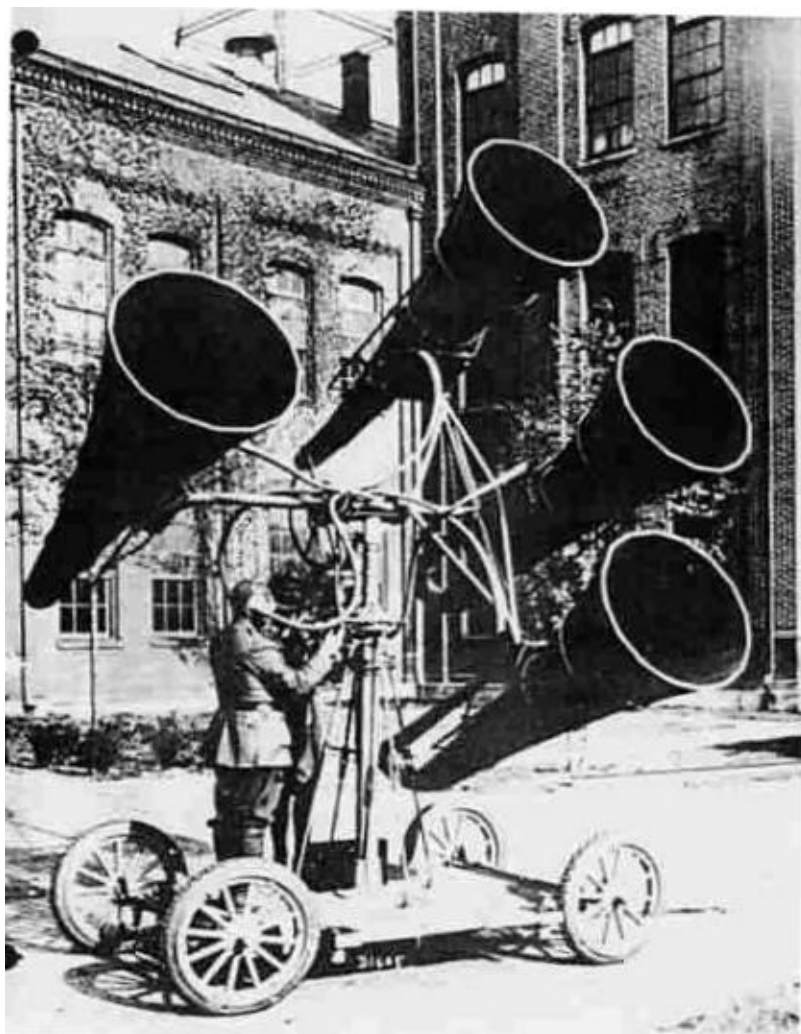
Профессор Майер, 1880г.



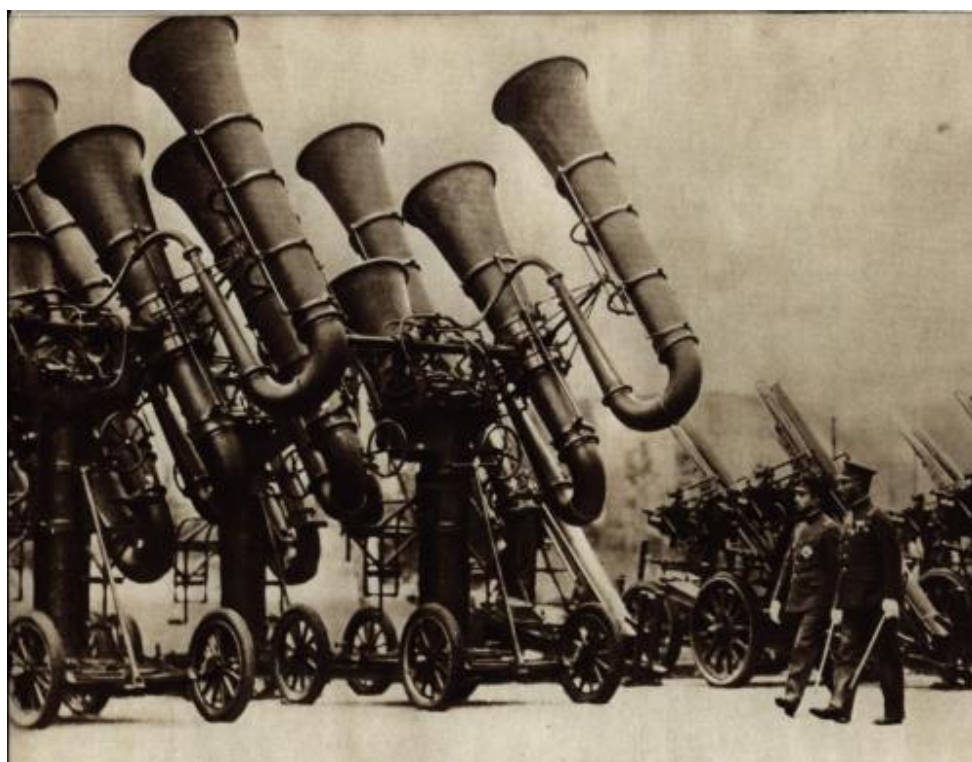
Джон Аустер, 1960г.

Применение авиации в первой Мировой войне стимулировало создание устройств, как теперь называют, противовоздушной обороны. Милитаристы быстро догадались, что с самолетов можно сбрасывать бомбы. Единственный метод обнаружения самолетов, доступный в то время – пассивная акустическая локация. Примеры таких установок показаны на фотографиях. Особенно впечатляют Японские акустические локаторы, они сделаны с поразительной виртуозностью.

Локаатор поворачивался в двух плоскостях. Оператор довольно точно находил направление на летящий самолет по максимуму звукового сигнала от работающего двигателя. Есть сведения, что по этим данным проводилось наведение артиллерийских орудий. Можно было обнаружить самолеты, летящие в облаках, и даже уничтожить их. Практически все участники первой Мировой войны имели на вооружении акустические локаторы.



Акустический пассивный локатор времен первой Мировой войны. Великобритания.



Акустические пассивные локаторы на параде вооруженных сил Японии. 1920-1930гг.

Одна из задач обороны – обнаружение объектов, приближающихся с моря в условиях плохой видимости. Для этой цели применялись акустические тарелки, которые при размере в несколько метров имеют очень большой коэффициент усиления. Такие тарелки были установлены на Английском побережье в местах Sittingbourne и Maidstone в июле 1915г. Тарелки могли поворачиваться для перемещения фокуса в различных направлениях. С их помощью обнаруживали суда и самолеты даже за границей линии горизонта. Интересный факт, что тарелки имели форму сферы, а не параболы, как этого требует теория отражения и фокусировки волн, к стати известная уже в то время. Ниже приведена современная фотография морского акустического локатора, построенного позднее, в 1928г.

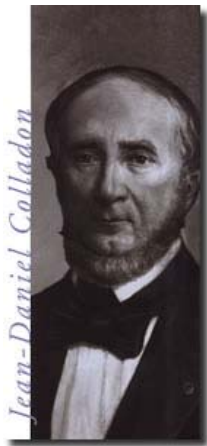


Акустический локатор (тарелка) диаметром 10м на полуострове Кент, Англия. Построен в 1928г. Современный снимок.

Акустические гидролокаторы, сонары.

Историю гидролокаторов обычно начинают с 1826г., когда, принимая участие в соревновании за ежегодный приз Королевской Академии Наук в Париже (Academie Royale des Sciences of Paris), исследователь и математик Жан-Даниэль Колладон (Jean-Daniel Colladon) и швейцарский физик Чарльз-Франциск Штурм (Charles-François Sturm), выполнили один из самых ранних экспериментов в акустике. Они провели измерение скорости звука в воде. Эксперимент состоял из удара в подводный колокол в Женевском озере с одновременным поджигом пороха. Вспышка от пороха наблюдалась Колладоном на расстоянии 10 миль, он также слышал звук колокола при помощи подводной слуховой трубы. Измеряя временной интервал между этими двумя событиями, Колладон вычислил скорость звука в Женевском озере, она равнялась 1435 м/сек. Разница с современными измерениями всего 3 м/сек. Этот эксперимент проложил путь к созданию гидролокатора.

Первые работы по созданию гидролокатора датируются 1838 годом, когда Бонникастл из Вирджинского университета (США), попытался сделать карту дна океана. Необходимо было произвести картографическую съёмку дна океана для размещения телеграфных линий и безопасного передвижения больших судов. Эта задача была предварительно решена медленным, громоздким, и, часто, неточным методом - при помощи отвеса. Попытки Бонникастла в эхолотировании закончились неудачей, но его усилия явились примером для других исследователей работать над этой задачей.



Жан Даниель Колладон



Чарльз Франциск Штурм

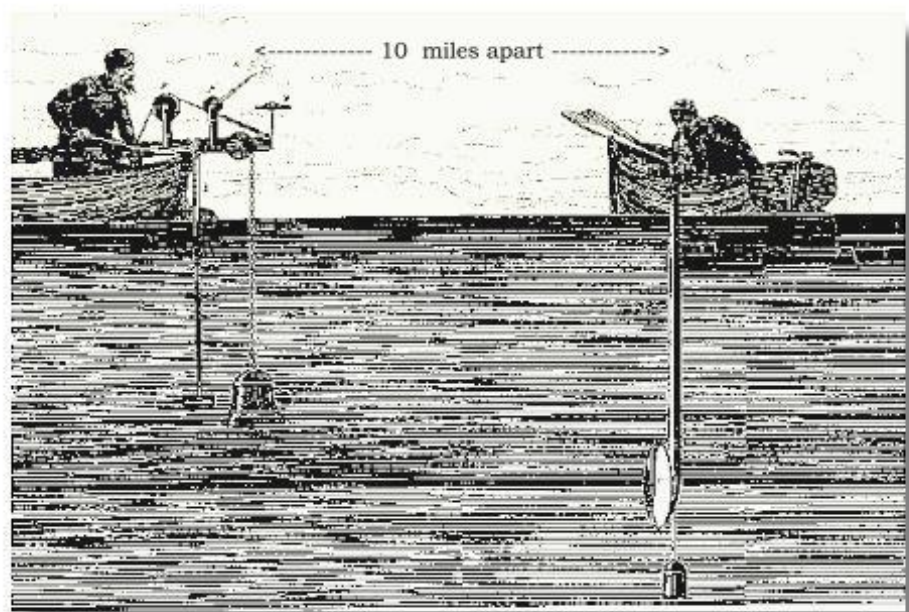


Схема эксперимента по измерению скорости звука в воде.



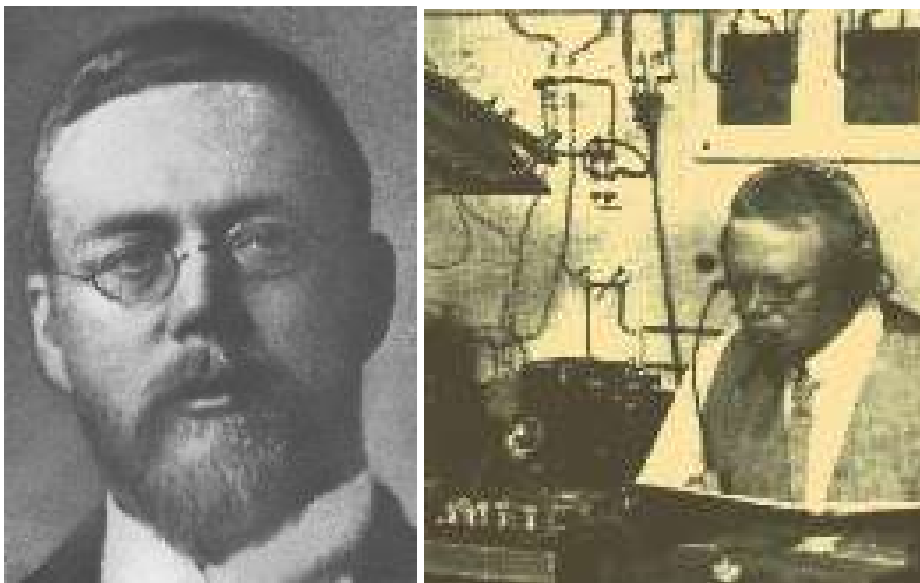
Озеро Женева, Швейцария. Современная фотография с воздуха.

В наше время в окрестностях озера расположены шикарные горнолыжные курорты.

В начале двадцатого столетия произошли два события, которые послужили катализаторами для продолжения работ над гидролокатором. Крушение парохода Титаник 15 апреля 1912г. Как известно, он столкнулся с айсбергом в северной Атлантике. И первая Мировая война, к которой стали широко использоваться подводные лодки. В это время английский метеоролог Левис Ричардсон (Lewis Richardson) провёл исследование и зарегистрировал патенты на воздушные и

подводные ультразвуковые системы обнаружения. По неизвестным причинам, он так никогда полностью и не разработал свои локаторы.

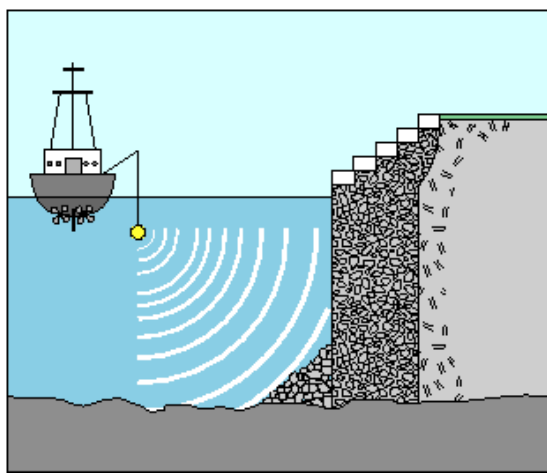
Параллельно работы над сонаром велись в США. Левис Никсон (Lewis Nixon) в 1906г изобрел свой первый примитивный сонар для обнаружения айсбергов. Как утверждают, в начале 1918г. Англия с США объединили усилия для создания эхоимпульсного сонара. Более подробной информации об этом найти не удалось.



Реджинальд А. Фессенден

В Америке, гениальный изобретатель, канадец Реджинальд А. Фессенден (Reginald Arbre Fessenden), работал над подводным эхолотом в компании Submarine Signal Co. В апреле 1914г. он зарегистрировал патент на свое изобретение. Прибор Фессендена имел электромагнитный осциллятор излучающий в воду низкочастотные колебания. Затем включался приемник и принимал эхосигналы. Стало возможным обнаружение айсберга на расстоянии до 2-х миль, однако прибор не давал никакой информации о положении отражающего объекта.

Константин Чиловский, русский эмигрант, живущий в Швейцарии, инженер - электрик, занимался проблемой эхолокации во время первой мировой войны. Интерес военных ведомств к разработке гидролокатора усилился в связи с атаками немецких подводных лодок на транспорт союзников. В 1915г. уже во Франции Чиловский совместно с выдающимся французским физиком Паулем Лангевинем (Paul Langevin) создал работающий высокочастотный гидрофон, который состоял из мозаики кварцевых кристаллов, вклеенных между двумя металлическими пластинами. Гидрофон работал на частоте около 40 КГц. В период 1915-1918 гг. параметры гидрофонов были существенно улучшены. Первый факт обнаружения немецкой подводной лодки класса «UC-3» с помощью гидрофона зарегистрирован в Атлантике в апреле 1916г. Подводная лодка была потоплена.





Пауль Лангевин



*К сожалению не удалось найти фотографию
Константина Чиловского*

После Первой Мировой войны, усилия исследователей переместились в область измерения глубин и топографической съёмки дна океана. К 1928г. французский океанский лайнер *Ile de France* имел на борту устройство Лангевина (Paul Langévin) для мониторинга дна океана и подводный передатчик для связи между судами. По заказу Британского Королевского флота канадец Дональд Спроул проводил испытания этого эхолота, который уже был оснащен дисплеем расстояния. Хотя эхолот отображал расстояние до донной поверхности океана, Спроул неожиданно обнаружил, что также этим устройством можно обнаружить стаи рыб.

Изобретение радиоламп. Старт электронной промышленности.

Ни одна отрасль промышленности не претерпевала столь бурного развития как электронная промышленность.



Томас А. Эдисон



Джон Флеминг



Ли ДеФорест

1883г. Томас А. Эдисон (Thomas Alva Edison) в Соединенных Штатах изучает электрические свойства электродов в вакууме. Выясняется, что ток проходит от отрицательно заряженного нагретого электрода к положительно заряженному электроду. Это явление называют «эффект Эдисона». Тогда еще не было известно существованию электронов, которые отвечают за перенос заряда между электродами.

1904г. В Англии Джон Флеминг (Sir John Fleming) разрабатывает вакуумный диод, основанный на эффекте Эдисона. Это устройство сразу же находит применение в качестве детекторов радиоприемников и дает начало большой династии радиоламп.

1907г. Ли ДеФорест (Lee DeForest) устанавливает электрод между катодом и анодом лампы Флеминга. Третий электрод называют сеткой (grid). Электрический потенциал сетки позволяет управлять током, текущим между анодом и катодом. Новый прибор называют «аудион» (audion). ДеФорест и не предполагал, что его изобретение обладает свойствами усилителя энергии электрических сигналов. Аудион был не стабильным прибором, электроды быстро окислялись, параметры прибора плохо воспроизводились.

1912 год стал поворотной точкой в создании радиоламп. Независимые американские исследователи Н.Д.Арнольд и Ирвинг Лангмюр (H.D. Arnold and Irving Langmuir) обнаружили, что аудион, работающий при глубоком вакууме, становится стабильным устройством. Они также предложили включить аудионы последовательно, что повышает общий коэффициент усиления. Фактически Н.Д.Арнольд и И.Лангмюр заложили основы схемотехники электронных устройств.



Ирвинг Лангмюр



Волтер Шотки

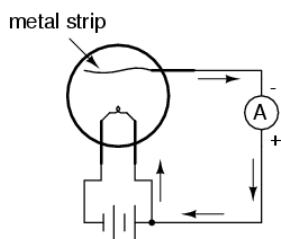
Французские ученые, работающие в военной тематике, быстро освоили схемотехнические приемы американцев и предложили выражать коэффициент передачи триода величиной R – отношение напряжения сетки к анодному току лампы. Так была создана математическая модель триода. С ее помощью легко выполнялся расчет электронных устройств.

В этом же году в Германии О.Винелт (O. Wehnelt) разработал оксидное покрытие для электродов, которое увеличивает электронную эмиссию катода и стабилизирует параметры лампы.

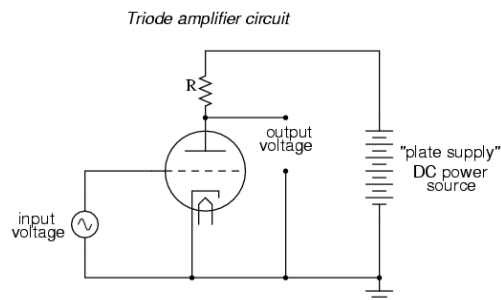
Впервые компания Вестерн Электрик (Western Electric Co.) использует модифицированный аудион в телефонном усилителе – 1912г. В следующие 5 лет Вестерн Электрик изготовила для армии США около 500 000 телефонов под марками «VT1» и «VT2».

В период первой Мировой войны 1914-1918гг. компания Джeneral Электрик (General Electric) копирует телефонный аппарат Вестерн Электрик, дает ему название «VT11», и производит еще 200 000 аппаратов для военно-морского флота и армии США.

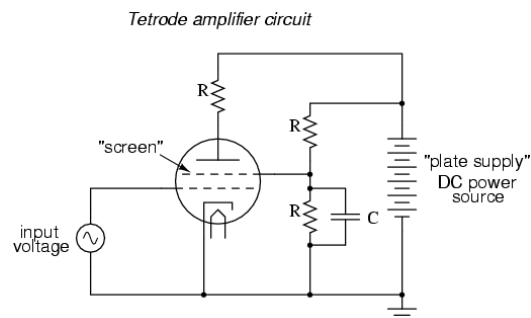
1915г. Ирвинг Лангмюр работает в Вестерн Электрик и добавляет в аудион еще одну сетку для сбора объемного заряда. Получается более совершенный прибор – тетрод. Он уже может усиливать сигналы с частотой более 10 мегагерц. В этом же году в Германии тетрод изобретает Волтер Шотки (Schottky), работая в компании Сименс (Siemens AG).



Вакуумный диод



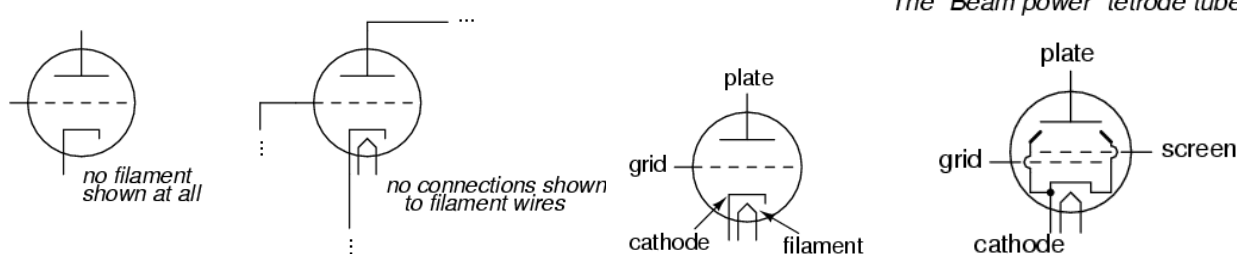
Вакуумный триод «Аудион»



Вакуумный тетрод

В 1918г. компания Вестерн Электрик создает 50 ватный телефонный аппарат «VT18». Компания RCA (Radio Corporation of America) тут же копирует его и называет «UV203».

1919г. Изобретен «эквипотенциальный катод». В лампе отделяется цепь подогрева «filament» от катодной цепи. Эти нововведения делают лампу более экономичной и позволяет создавать устройства с разнообразными обратными связями. Модифицированные лампы появляются практически одновременно у всех изготовителей. Однако их производство еще весьма дорогое.



1919-1922гг. Исследование паяных соединений стекло-металл и их стойкости к охлаждению водой дают увеличение мощности лампы от 500 Ватт до 50 000 Ватт! В результате исследований обратных связей в ламповых каскадах созданы стабильные генераторы частоты, эффективные детекторы, высокочастотные и низкочастотные усилители, генераторы импульсов и т.д.



Первый серийный триод, Компания Western Electric, 1913-1916гг.



Триод Компании R.J.W., 1914г.



*Компания Marconi Co. UK, 1916г.
Первый миниатюрный триод.*



Триод Компании R.A.F. Co, 1916г.

Изобретение радио. Эволюция радиоаппаратуры.

1886г. О возможности передачи сигналов с помощью магнитной индукции говорил Т.А.Эдисон. Чуть позже профессор Петербургского университета И.И.Боргман в 1888г. применил катушку Румкорфа для возбуждения магнитного поля и добился приема сигнала на расстоянии до 19м.

1892г. В. Крукс (William Crookes), немецкий физик и химик, опубликовал статью, в которой предсказал возможность использования электромагнитных волн для телеграфирования без проводов путем направленного излучения и настройки на определенную длину волны.

Общая теория распространения электромагнитных волн как известно создана Джэймсом Максвеллом (James Clerk Maxwell) в период 1870-1880гг. фактически до экспериментального обнаружения радиоволн.

Изобретению радио предшествовали опыты Генриха Герца (Heinrich Rudolf Hertz) по излучению, распространению и приему электромагнитных волн 1880-1890гг. Г.Герц по праву считается основоположником практической радиосвязи. Вибратор Герца послужил основой для радиопередатчиков.

Первенство изобретения радио несомненно принадлежит нашему соотечественнику, талантливому инженеру, Александру Степановичу Попову. В 1893г. он создал достаточно мощный электромагнитный передатчик и приемник для системы телеграфии без проводов Военно-морского флота России.

Но официальное свидетельство об изобретении получил не А.С.Попов а Гульельмо Маркони, который в 1897г. зарегистрировал патент на беспроволочный телеграф.

Г.Маркони не имел систематического образования в физике и математике, но зато хорошо чувствовал потребность общества в коммуникациях, был богатым человеком, и самое главное - он был великолепным организатором. Маркони в 1897г. организовал крупное акционерное общество «Маркони К°». Для работы в своей фирме он пригласил многих видных учёных и инженеров. В 1891г. им была осуществлена радиосвязь через Атлантический океан. А в это время А.С.Попов обивал пороги Российских ведомств, убеждая финансировать свои разработки.



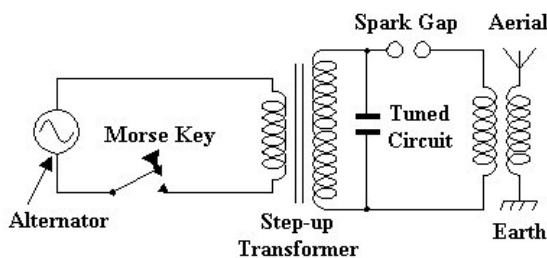
Генрих Рудольф Герц



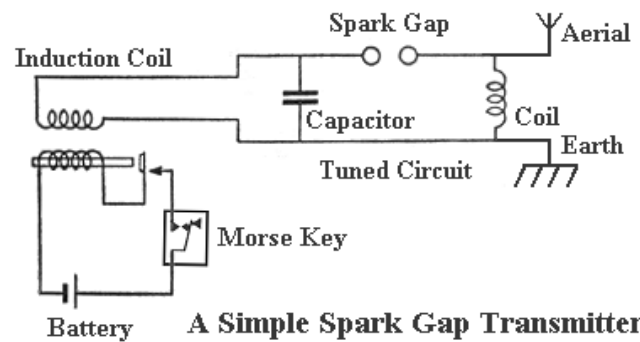
Александр Степанович Попов



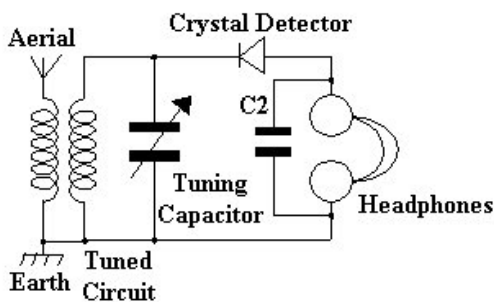
Гульельмо Маркони



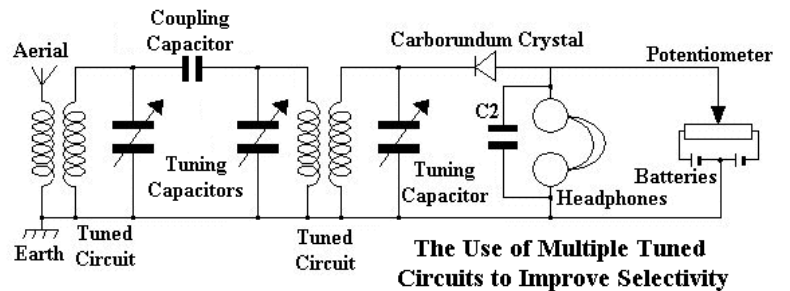
Первый радиопередатчик Маркони



Усовершенствованная схема радиопередатчика



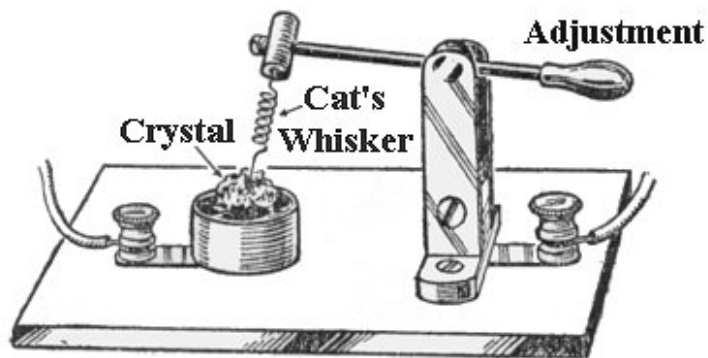
Один из первых радиоприемников



Усовершенствованная схема радиоприемника

Выше показаны типичные схемы радио передатчиков и радиоприемников первых годов 20-го века. Обратите внимание, что в приемниках используются точечные кристаллические детекторы (диоды).

Первый патент на кристаллический детектор подал Бозе (J.C. Bose) в 1901г. В этом устройстве использовался контакт металл - кристалл сульфида свинца. В 1906г патент на кристаллический детектор из карбида кремния получили Генри Харрисон (Henry Harrison) и Чейс Данвуди (Chase Dunwoody). В 1907г появляется патент Джона Виттера (John Greenleaf Whittier) на детектор кремний-металл! Это же первый полупроводниковый диод! Причем, его можно было бы назвать диодом Шоттки с точечным контактом.



Точечный кристаллический детектор (полупроводниковый диод)

Совсем парадоксальный факт. В 1907 году в журнале *Wireless World* появилась статья английского инженера Хенри Роунда (Henry J. Round) под названием «A Note on Carborundum». В ней говорилось, что кристаллический детектор из карбида кремния, находящийся под постоянным напряжением, излучает голубой свет. В наши дни, именно карбид кремния используется в светодиодах голубого цвета.

Хорошо известна история о русском (советском) инженере Олеге Лосеве, у которого не было денег на радиолампы. В 1922г. Олег Лосев создал элемент с отрицательным сопротивлением, туннельный диод! Это был точечный диод на основе контакта металл – кристалл окиси цинка (ZnO). Радиоприемник с таким диодом усиливал и детектировал сигналы на частоте 5МГц.

Неизвестно, как бы развивалась электронная техника, если бы ученые того времени обратили пристальное внимание на эти кристаллические детекторы. Уж точно, транзистор был бы изобретен уже в 20-х годах и первые ультразвуковые дефектоскопы были бы транзисторными. Вакуумный диод был создан в это же время, в 1904-м. Победа вакуумной техники задержала полупроводниковые устройства более чем на 40 лет!

В 1900г. уже известный нам Реджинальд А. Фессенден (Reginald Arbrey Fessenden) разработал принцип «наложения вибрирующих волн звуковой частоты, на постоянную радиочастоту, чтобы модулировать амплитуду радиоволны в форму звуковой волны». Принцип был назван амплитудной модуляцией (АМ). В этом же году Фессенден провел первые эксперименты по передаче голоса по радио. Он предложил принцип гетеродина (1902г). Осуществил первую официальную передачу голоса по радио – 1906г.

Христиан Халсмайер (Christian Hulsmeier), немецкий инженер, предложил принцип использования отраженных радиосигналов в устройстве, предназначенном для предотвращения столкновений на флоте. Получил патент 30 апреля 1904г на изобретение «telemobiloscope» – первого примитивного радара с дальностью действия до 2-х км. В то время на изобретение не обратили внимание. Даже компания «Telefunken» отказалась приобрести патенты изобретателя.

1907г. Эдуард Белин (Édouard Belin), французский инженер, осуществил первую передачу фотоизображений между Парижем, Лионом и Бордо. Это событие настолько сильно впечатлило французские власти, что они согласились принять систему для коммерческого использования. В дальнейшем система была принята в качестве основного средства передачи фотоизображений высокого качества для газет, полиции и др., как во Франции, так и в некоторых других европейских странах.

1917г. Очень важная дата не только для русских. Эдвин Говард Армстронг (Edwin Howard Armstrong) разработал принцип супергетеродинного приемника. Изобретение было представлено на суд общественности в 1918г. Принцип супергетеродина позволил кардинально улучшить чувствительность и селективность радиоприемников в широком диапазоне частот. Через несколько лет супергетеродин совершил революцию в радиосвязи, вытеснил практически все типы радиоприемников и до настоящего времени остается основным типом радиоприемных устройств.

В большинстве исторических публикаций авторство изобретения супергетеродина приписывается Армстронгу. Нельзя согласиться с подобными утверждениями, так как принцип приема с изменением входной частоты (аналогично супергетеродину) разрабатывался многими учеными. Среди них австриец Александр Мейсснер, разработавший аналогичный принцип в 1914г.

Французский ученый Люсьен Леви (Lucien Levy) получивший патенты на приемник, использующий принцип аналогичный супергетеродину 4 июля 1917 и 1 октября 1918. Работы в этом направлении вел и немецкий ученый Уолтер Шотки.

Причина известности изобретения Армстронга заключается в том, что оно произошло в США – стране, в которой развитию радио уделялось очень большое значение. Любое новшество в области радио сразу же подхватывалось и развивалось многочисленными американскими компаниями до практического коммерческого применения. В дальнейшем компаниям других стран было проще и экономически целесообразней приобретать готовые технологии в США, например, супергетеродин, чем тратить средства и время на выпуск изделий на собственных разработках.



Эдвин Говард Армстронг рядом с приемником «Radiola Super-Heterodyne», 1923г.



Владимир Кузьмич Зворыкин



Реклама радиоприемника, 1921г.

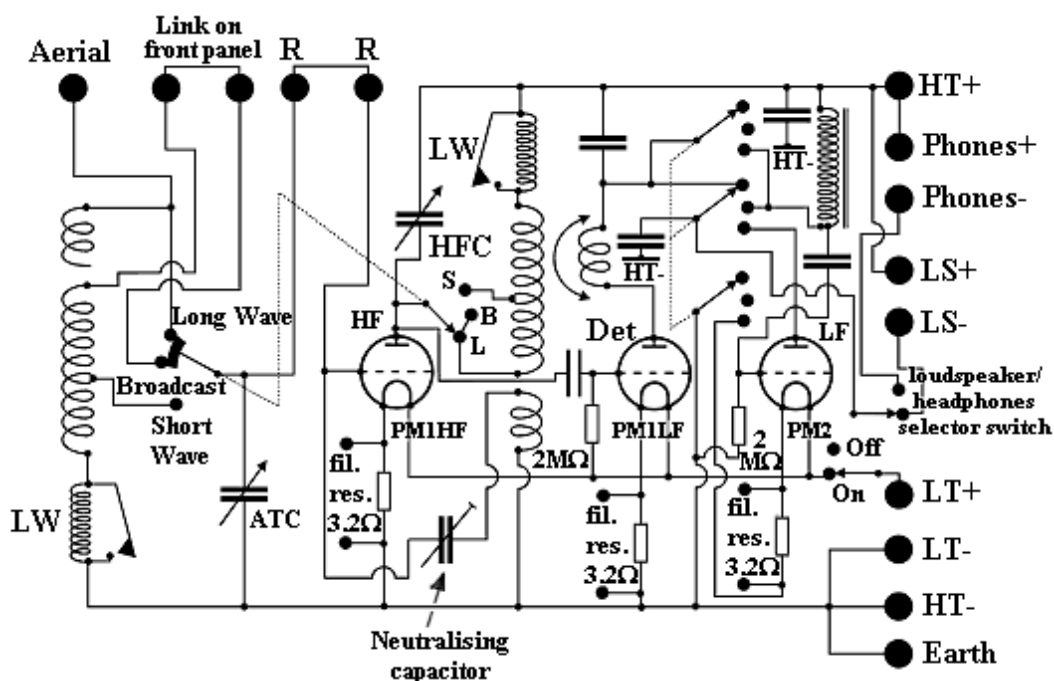


Лондон, снимок 14 ноября 1922г. На заднем плане средневолновые антенны первой радиостанции БиБиСи L2O.

1923г. Владимир Кузьмич Зворыкин, инженер и изобретатель, американец российского происхождения, получил патент на иконоскоп – первую передающую телевизионную трубку, основанную на теории Кампбелла–Свинтона. Изображение фокусируется внешним объективом внутри иконоскопа. Высокоскоростной электронный луч последовательно сканирует изображение по горизонтали. Фотоэлементы считывающего устройства освещаются с разной яркостью и формируют импульсы, зависящие от падающего на них количества света. Далее информация преобразовывается в электрический видеосигнал и передается на приемное устройство, на котором происходит процесс восстановления изображения, подобный считыванию. В начале изобретение

было предложено компании «Westinghouse» и не было по достоинству оценено. Позже, в 1929г., Зворыкин впечатлил руководство «RCA» при демонстрации усовершенствованной системы. Работы Зворыкина по передаче видеоинформации позволили ему заслужить титул «отца телевидения».

Ниже приведена принципиальная электрическая схема радиоприемника английской фирмы A.J.S. Wireless and Scientific Instruments, типичная для 1918-1924гг. Разработчик электронной техники 60-х годов (расцвет и закат радиоламп) сказал бы, что схема приемника выглядит вполне современно. В вот конструкция приемника сделана в духе времени, как сейчас говорят с упреком, использован навесной монтаж. Не смотря на эти недостатки в радиосвязи хорошо был освоен диапазон длинных и средних волн.



Трехламповый среднечастотный приемник фирмы A.J.S. Wireless and Scientific Instruments. Схема электрическая принципиальная. Англия, 1922г.



Внешний вид приемника и вид снизу на монтажные соединения.

Изобретение электронно-лучевой трубки. Осциллограф.

1871г. Вильям Крукс (William Crookes) интересовался спиритизмом и с медиумом Даниелом Дугласом (Daniel Douglas) проводил домашние физические опыты. Они хотели обнаружить «новую силу», пытались сделать индикатор «силы» и верили, что каждый человек должен ей обладать.

В следующие 4 года Крукс с ассистентом Чарльзом Гимингхэмом (Charles Henry Gimingham) создали вакуумный электрический радиометр. В современной терминологии это газоразрядная лампа низкого давления. А 5 ноября 1875г. Крукс зарегистрировал патент на радиометр – трубка Крукса. Одновременно над похожей проблемой работал физик Геслер (Geissler), но его трубка работала в более высоком вакууме. В сущности Геслер выполнил первые качественный эксперименты с электронными пучками, правда тогда еще электроны были неизвестны.

В мае 1876г. в Лондоне королева Великобритании открывала выставку «Special Loan Exhibition», где В.Крукс и Геслер представили свои изобретения. В.Крукс продемонстрировал королеве свой «флакон с ничем» - вакуумную колбу. Королеву это не заинтересовало.

1897г. В Страсбургском университете Карл Фердинанд Браун (Karl Ferdinand Braun) исследовал явление люминесценции (свечение экрана, покрытого фосфором, под воздействием пучка электронов) и создал катодно-лучевую трубку (cathode-ray tube, CRT) – трубка Брауна. Это была трубка с холодным катодом, отклонение электронного пучка в ней проводилось магнитным полем, трубка работала при напряжениях 10-20 киловольт и позволяла наблюдать на экране колебания электрического напряжения с частотой 50-60 Гц. Частотный диапазон трубки в основном ограничивался индуктивностью отклоняющих катушек.

В это же время, в течение 1895-1897гг., Джозеф Джон Томпсон (Joseph John Thomson) занимался фундаментальными исследованиями свойств электронов в лаборатории Кавендиша в Кембридже (Cavendish Laboratory, Cambridge). Он сделал более совершенную катодно-лучевую трубку. В ней использовался подогреваемый катод, два анода, ускоряющих пучок электронов, и электростатическое отклонение луча. Трубка Томпсона является прообразом современных осциллографических трубок.



Вильям Крукс



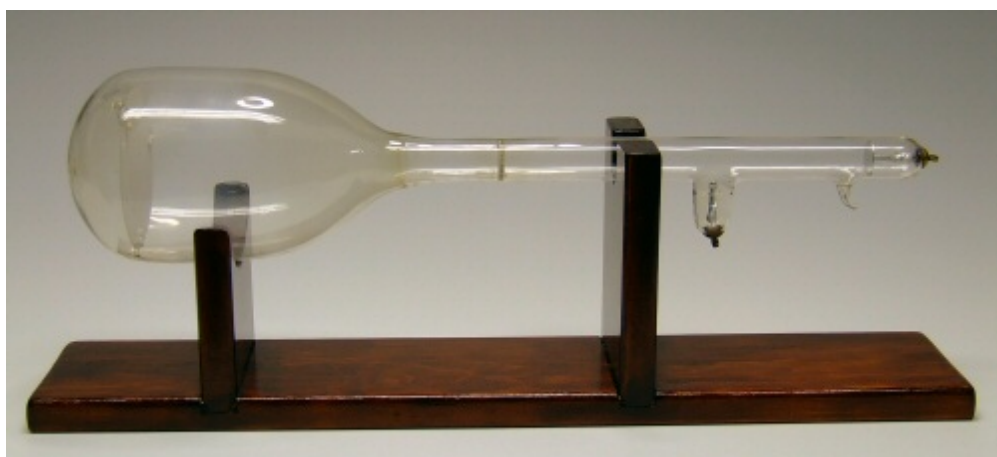
Музейные экспонаты трубок Крукса



Изображение на трубке Крукса



Карл Фердинанд Браун



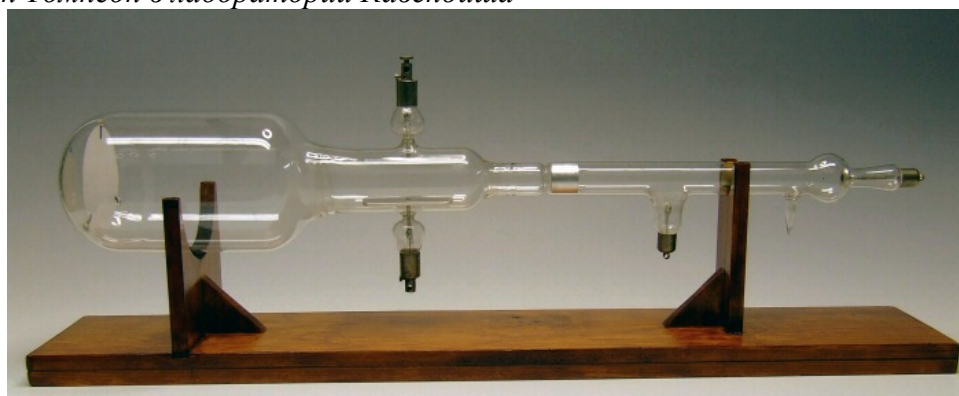
Трубка Брауна, музейный экспонат.



Джозеф Джон Томпсон в лаборатории Кавендиша



Изображение на трубке Томпсона



Модифицированная трубка Томпсона, музейный экспонат

Следует отметить работы Роберта Миликана (Robert A. Millikan) посвященные фотоэффекту и квантовой природе света, опубликованные в 1906-1914гг. Они дают базовые знания, которые составляют основу создания люминофоров в осциллографических трубках.

Идея создания прибора для наблюдения электрических сигналов (осциллографа) активно разрабатывалась в середине 20-х годов. В США Ален Дюмонт (Allen Balcom DuMont) в собственном гараже начал делать на заказ электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) для осциллографов и телевидения, 1931г. Американцы часто рассказывают о том, что великие изобретения делаются в гаражах.

В Японии Kenjiro Takayanagi, профессор высшего технического института в Хамамацу, разработал электронно-лучевую трубку, 1924г. Начиная с 1930г. компания Tokyo Shibura Electric Company выпускает серийные ЭЛТ профессора Kenjiro. В дальнейшем электронно-лучевые трубки и осциллографы стали выпускать многие фирмы в мире.

Непонятно, как обходились инженеры электроники того времени без осциллографа? Это же основной прибор для диагностирования электронных схем. Удивительно, что осциллограф не сделали, скажем, в 1915г.

Изобретение ультразвукового дефектоскопа.

Идея ультразвуковой дефектоскопии металлов общепризнанно принадлежит нашему соотечественнику Сергею Яковлевичу Соколову. В 1926г. по окончании Ленинградского электротехнического института он был назначен заведующим лабораторией по радиотехнике и руководителем лабораторных работ студентов. В декабре 1927г. коллективом лаборатории был испытан пьезоэлектрический вибратор с частотой 1МГц, позволяющий получать мощные ультразвуковые колебания в воде.

Занимаясь первоначально вопросами распространения ультразвуковых колебаний в жидкой среде, он стал изучать возможности распространения ультразвуковых колебаний и в других средах. Была обнаружена способность ультразвуковых волн проникать на большую глубину в металле и обнаруживать дефекты в них, а также способность ультразвуковых колебаний распространяться по

проволоке и отражаться от мест неоднородностей, выявлена зависимость поглощения ультразвуковых колебаний от структуры металла и примесей.

Развитие этих идей дало огромный диапазон применения – от тяжелой промышленности, трубопроводного, железнодорожного транспорта до медицины.



Сергей Яковлевич Соколов.

1937г. В Берлине Полман (Pohlman) реализовал установку для визуализации различий ультразвуковой энергии в металле. В ней использовались непрерывные ультразвуковые колебания. Картинка получалось наподобие рентгеновского изображения.

Промышленное использование такого оборудования началось одновременно в трех странах – США, Великобритании и в Германии.

Европейские историки не любят упоминать об этих фактах. В США в 1942г. Доналд Спрул (Donald Sproule) успешно применил принципы ультразвуковой эхолокации для обнаружения несплошностей в сталях. А в 1945г. американская компания Sperry Products Inc. представила первый настоящий эхо импульсный ультразвуковой дефектоскоп (supersonic reflectoscope type A), разработанный Флойдом Фаерстоуном (Floyd Firestone). Информация о нем опубликована в журнале «The Journal of the Acoustical Society of America» в июле 1946г.

Исследования и разработки проводились в секрете от конкурентов, поэтому официальная информация о дефектоскопе была весьма скудной. Можно предположить, что в приборе использовались кварцевые пьезопластины толщиной около 1мм, он работал на частотах 1-3 МГц и позволял выявлять несплошности размером более 10мм на глубине 100-300мм в сталях.

С этого момента началась эра ультразвуковой дефектоскопии.

В Европе, а точнее в Германии, информация об эхо импульсном дефектоскопе была опубликована в 1949г. Причем два человека одновременно сделали это даже и не подозревая о существовании друг друга. Это Джозеф Крауткрамер (Josef Krautkramer) и Карл Дойч (Karl Deutsch). Джозеф Крауткрамер и его брат Гильберт (Herbert) были физиками и сначала занимались созданием осциллографа. Карл Дойч, инженер механик, работал с партнером Хансом Браншедом (Hans-Werner Branscheid), который был электроником и раньше занимался радаром военного назначения. Только за один год две маленькие компании независимо смогли создать ультразвуковые эхо импульсные дефектоскопы (UT-flaw-detectors). Отметим небольшой, но существенный факт, приборы были сделаны из серийно выпускаемых электронных компонентов того времени. Кроме того, вплоть до конца 50-х годов в дефектоскопах использовались кварцевые пьезоэлементы.

FIG. 4. Type A sweeping and timing system. This is the pattern which appears on the screen when the crystal is not being energized. It consists essentially of a time scale which is formed by the green spot of the oscilloscope traveling along the zigzag path A, B, C, D, etc. Each microsecond the spot is deflected slightly upward so as to notch the line and thereby form a timing scale. Every eighth notch is made higher in order to assist in counting. There are eight of these higher marks per zigzag so that it requires 64 microseconds to traverse one zigzag.

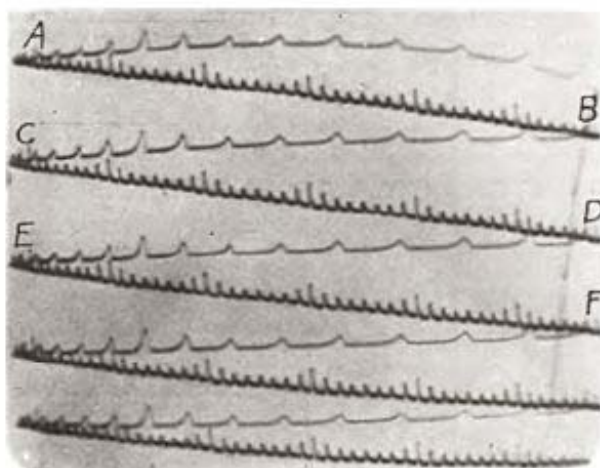
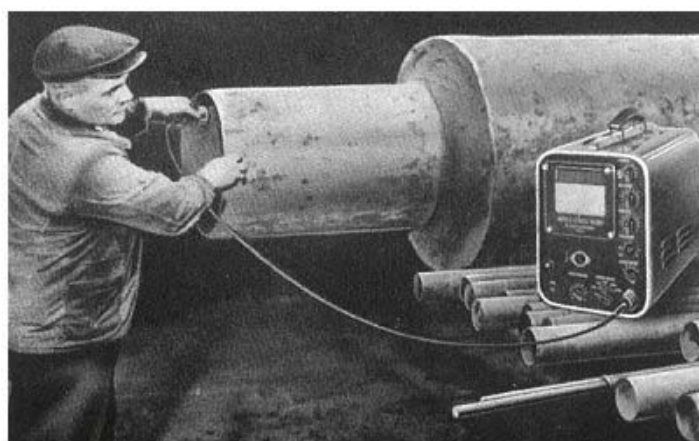


FIG. 2a. Type A supersonic reflectoscope.

Первый промышленный эхо импульсный УЗД компании Sperry Products Inc., 1945г.



Контроль заготовки вала с помощью одного из первых дефектоскопов фирмы Крауткрамер

Хотите верить, хотите – нет, но импульсный ультразвуковой дефектоскоп могли создать уже 1920 году. Для этого имелись все основные технические средства и научные знания.

Но не все так просто. В плане знаний нужно было предположить, а потом проверить, что металлы хорошо проводят ультразвук, а затем браться за установку регистрации эхосигналов. Для это требуется наблюдательность, интуиция и вера в успех.

С технической стороны возникали две проблемы.

1. Электронно-лучевая трубка. В трубке Томпсона нужно добавить еще две отклоняющих пластины, чтобы луч мог перемещаться в двух направлениях. Тогда станет возможным отображение А-скана, развертка эхосигналов во времени. Если господин Ален Дюмонт смог сделать ЭЛТ в гараже, то в научной лаборатории это тоже выполнимо.

2. Технология изготовления пьезопреобразователей. Нужно было создать небольшой участок для изготовления тонких пластин кварца Х-среза, толщиной 1-2мм. Для целей ультразвуковой дефектоскопии не требуется слишком высокая точность геометрических размеров пластины поскольку излучение должно быть достаточно широкополосным. И еще нужно было догадаться не

приклеивать электроды на пластину кварца, а наносить их путем гальванического покрытия или вжигания. Такие технологии уже давно существовали в ювелирном деле.

Что касается электронной схемы дефектоскопа, то в 1920г. весь спектр электронных компонентов производился серийно – резисторы, конденсаторы, диоды, триоды, тетроды и т.д. В это время существовала огромная армия радиолюбителей. Схемотехника различных функциональных устройств позволяла создать все блоки дефектоскопа - синхронизатор, генератор зондирующих импульсов, приемный тракт, генератор пилообразного напряжения. В частности в качестве электронного приемного тракта УЗД вполне подошел бы радиоприемник прямого усиления того времени, немного переделанный.

Скажем, в 1922г. дефектоскопы вполне могли выпускать серийно. В первых моделях проще всего было использовать иммерсионный ввод ультразвука в изделия (водяная ванна). Прибор мог работать на частотах 0,5-2 МГц, с его помощью можно было бы исследовать металлические изделия размером 100мм и более, чувствительности такого УЗД хватило бы для обнаружения крупных дефектов!!!

Не будем судить историю. Что было, то было. Но стоит задуматься, а может быть аналогичная ситуация наблюдается в наше время?