

# К 90-ЛЕТИЮ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СЕРГЕЙ ЯКОВЛЕВИЧ СОКОЛОВ – ОСНОВОПОЛОЖНИК УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И ЗВУКОВИДЕНИЯ



## АББАКУМОВ

### Константин Евгеньевич

Д-р техн. наук, профессор, специалист III уровня квалификации по акустическим методам неразрушающего контроля, заведующий кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

В феврале 1928 г. молодой преподаватель кафедры «Специальная радиотехника» Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) Сергей Яковлевич Соколов (рис. 1) направил в Комитет по делам изобретений и открытий заявку на способ и устройство для испытания материалов, на которую впоследствии был получен патент № 11371 [1]. В этой заявке впервые было предложено использовать ультразвуковые колебания для прозвучивания изделий в целях получения информации об

их внутренних дефектах и структуре. Именно от этой даты (2 февраля 1928 г.) мировая общественность ведет отсчет начала ультразвуковой дефектоскопии – науки о методах и приборах контроля качества материалов и изделий с помощью ультразвука.

В 1925 г. после окончания обучения и защиты дипломного проекта на тему, связанную с проектированием передающего устройства связи для кораблей военно-морского флота, молодой инженер по приглашению его научного руководителя профессора И.Г. Фреймана начал работать на кафедре ассистентом. В качестве темы научных исследований ему было предложено проверить и предложить способы стабилизации частоты радиопередатчиков с помощью кварцевых резонаторов.

Практически за три года после серии задуманных и осуществленных им же самим экспериментов С.Я. Соколову удалось обнаружить и дать описание целого ряда явлений, положенных им в основу нового научного направления – ультразвуковой дефектоскопии.

Схема устройства (рис. 2), предложенного в заявке, выглядит весьма просто: пьезокварцевый преобразователь  $B$  расположен в ванне  $A$  с маслом, контакт преобразователя с изделием  $L$  осуществляется через слой ртути  $P$ , а в качестве индикатора используется слой масла  $M$ , рельеф



Рис. 1. Сергей Яковлевич Соколов (1897–1957), д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. АН СССР

поверхности которого наблюдается через лупу. Как видно по описанию, в этом первом патенте предложен «теневой» метод сквозного прозвучивания ультразвуковой дефектоскопии в иммерсионном варианте с непрерывным излучением.

В работе [2], опубликованной в 1929 г. в Германии, С.Я. Соколов обобщил результаты своих исследований по распространению ультразвуковых волн в различных металлах и сформулировал обнаруженные им свойства ультразвука:

- способность проникать на большую глубину в металлы и обнаруживать в них неоднородности;

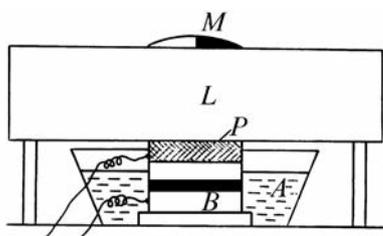


Рис. 2. Схема «теневого» метода ультразвукового контроля

- зависимость затухания ультразвуковых волн от структуры металла и примесей, а в сталях — от степени их закалки;
- способность распространяться по проволоке на расстояние в несколько десятков метров и отражаться от ее конца.

В этой же работе впервые было предложено использовать одну и ту же пьезопластину как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвука, т.е. был сформулирован принцип совместного преобразователя с применением частотно-модулированных колебаний.

Эффект от полученных изобретений был столь значителен, что администрацией Электротехнического института в 1931 г. было принято решение о формировании новой кафедры электроакустики и ультразвуковой техники (рис. 3), деятельность которой была направлена на подготовку инженеров в соответствующей области.

Первоначально кафедра располагалась в здании храма Спаса Преображения, бывшей в свое время полковой церковью Гренадерского полка, казармы которого располагались неподалеку на набережной р. Карповки. Автором проекта являлся К.Э. Тон, архитектор, известный своими многочисленными постройками по всей России, в том числе здания Московского вокзала в Санкт-Петербурге. Храмовое здание было совершенно не приспособлено для учебных занятий, и для обучения, как и для научных исследований, пришлось быстро переоборудовать помещения. Но энтузиазм преподавателей и студентов был настолько велик, что помогал преодолевать все трудности (рис. 4).

Наиболее известными из первого выпуска инженеров кафедры специалистами в области акустики стали профессора: М.А. Сапожков и В.К. Иофе [3].

В предвоенный период, начиная с 1937 г., здание неоднократно перестраивалось путем монтажа в нем междуэтажных перекрытий и перепланировки образующихся помещений. В таком виде оно просуществовало до 2006 г., когда по решению ученого совета ЛЭТИ было передано Российской Православной Церкви.

Первые же успехи в области неразрушающего контроля привлекли к нему внимание, и вскоре на-

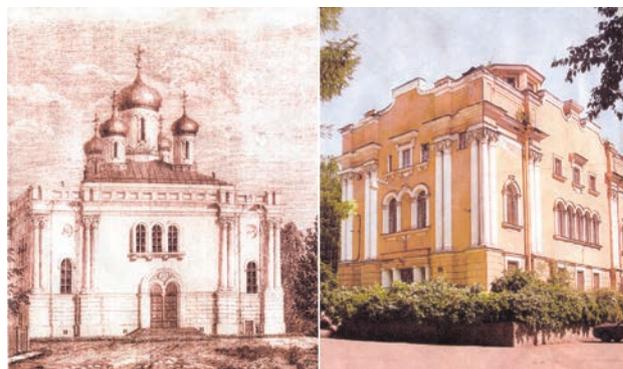


Рис. 3. Общий вид здания лаборатории (кафедры) электроакустики и ультразвуковой техники: а — в довоенный период (1931 г.); б — в послевоенный период (2004 г.)



Рис. 4. С. Я. Соколов с учениками на занятиях в лаборатории акустики (1936 г.)

чалось внедрение его результатов в промышленность. На изготовленном в стенах лаборатории оборудовании (рис. 5) проводился контроль изделий, поставлявшихся предприятиями. Количество таких заказов постоянно росло, и к выполнению практического контроля привлекалось все больше сотрудников, прием которых на работу контролировался лично С.Я. Соколовым.

Так, в лабораторию обратились сотрудники одного из оборонных предприятий с просьбой проконтролировать стальные сферы диаметром около 200 мм, использовавшиеся для изготовления подшипников качения, необходимых для вращения артиллерийских башен орудий крупных калибров военных кораблей.

По словам представителей предприятия, изделия часто не обладали необходимой прочностью и преждевременно разрушались. Заготовки были доставлены в лабораторию и обследованы на ультразвуковой установке. Часть из них была забракована. Результаты контроля тут же проверяли: забракованные шары сбрасывали с крыши лабора-

тории на каменные плиты входного крыльца. Некоторые из них сразу распадались на несколько частей.

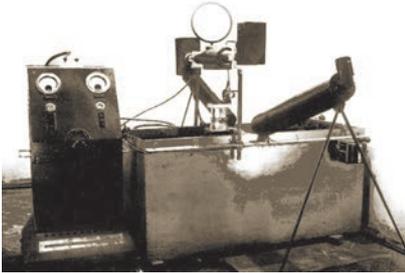


Рис. 5. Лабораторное оборудование для контроля с помощью ультразвука изделий в иммерсионной ванне

Оставшиеся целыми после падения шары вскрывали на металлорежущем станке. И в них тоже были обнаружены поры и трещины, но несколько меньших размеров, что не так фатально сказывалось на их прочностных характеристиках. Следует отметить, что и в то время, когда преобладали дефектоскопы исключительно для ручного контроля, и значительно позднее, когда стали внедряться многоканальные установки автоматизированного контроля, результаты проверки деталей и изделий на наличие дефектов с помощью ультразвука всегда вызывали сильное удивление и даже недоверие со стороны работников промышленности. Потребовался не один десяток лет, прежде чем результаты неразрушающего контроля стали восприниматься как достоверные сведения, а сам неразрушающий контроль стал обязательной технологической операцией.

Другим примером активного содействия лаборатории оборонным предприятиям являются работы по определению толщины закаленного слоя на броневых листах (рис. 6).

Происходило это так. В процессе закалки с помощью токов высокой частоты в стальном листе 1 (см. рис. 6) заметно изменя-

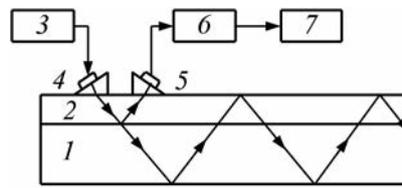


Рис. 6. Схема и устройство контроля толщины «закаленного» слоя на стальных листах

лись механические характеристики металла в приповерхностном слое 2. Граница этого слоя могла отражать падающие на нее ультразвуковые сигналы от излучателя 4, возбуждаемого генератором 3. Отраженные сигналы воспринимались приемным датчиком 5, усиливались усилителем 6 и подавались на устройство отображения информации 7, которым служила электронно-лучевая трубка. По сформированному изображению проводилась оценка толщины закаленного слоя 2. Если слоя не было или он был сформирован не достаточно явно, то ультразвуковые лучи уходили в слой 1 (по стрелке на рис. 6).

Серьезное внимание в этот период С.Я. Соколов начал уделять и вопросам автоматизации процессов контроля (см. рис. 7, где обозначены: 1 – объект контроля, 2 – генератор, 3 – излучатель, 4 – приемный датчик, 5 – усилитель, 6 – винт горизонтальной подачи, 7 – винт вертикальной подачи, 8 – «стол» записывающего устройства, 9 – «перо»-пишущий элемент, 10 – электромагнит, 11 – реле, 12 – подвижное зеркало).

За десятилетний период (1931–1941 гг.) С.Я. Соколовым были выполнены основные исследования и изобретения в области ультразвуковой дефектоскопии [3, 4]:

- разработан точный пьезоэлектрический приемный преобразователь, с помощью которого исследовано распределение амплитуд колебаний как

по поверхности излучающих сложных вибраторов, так и по поверхности «прозвучиваемых» изделий с внутренними несплошностями;

- предложен фокусирующий излучатель, в том числе с регулируемым механическим способом фокусным расстоянием;
- предложен сквозной теневой метод с частотной модуляцией путем автоматического изменения емкости колебательного контура генератора;
- предложен и реализован сквозной теневой и зеркально-теневой временные методы с импульсным излучением и модуляцией частоты;
- предложен резонансный метод измерения скорости звука в материале изделия;
- предложен наклонный ввод ультразвука в изделие, в том числе с возбуждением только поперечных волн;
- предложен и реализован эхометод ультразвуковой дефектоскопии с использованием раздельной схемы включения и частотно-модулированного излучения;
- предложен и осуществлен электромагнитно-акустический метод возбуждения колебаний в изделии, основанный на взаимодействии вихревых токов с полем постоянного магнита;
- реализован низкочастотный акустический метод измерения частот собственных колебаний турбинных лопаток в целях обнаружения в них внутренних дефектов (трещин);
- предложено и реализовано несколько типов теневых дефектоскопов с различными методами автоматического сканирования и записью контуров дефектов с помощью различных систем.

Аналогичные работы одновременно начали осуществляться и зарубежными учеными. Так, в 1933 г. немецкий инженер Мюльхаузер получил патент на способ

обследования изделий с помощью ультразвука, в котором для приема колебаний, в отличие от способа С.Я. Соколова [1], использовался не слой масла, а отдельный приемный преобразователь [4].

Исследования и изобретения С.Я. Соколова, сделанные им в этот период в области ультразвуковой дефектоскопии, показывают, что он намного опередил других ученых. Его работа получила высокую оценку: в 1942 г. С.Я. Соколову была присуждена Сталинская премия.

Несмотря на то что в целом ряде изобретений С.Я. Соколова упоминался импульсный режим работы приборов и регистрация отраженного излучения, первый патент на устройство «рефлектоскопа» для реализации эхометода контроля было получено не им, а американским инженером Файерстоуном в 1942 г. [4].

Работы над созданием подобного отечественного прибора начались после возвращения С.Я. Соколова и сотрудников его лаборатории из эвакуации. С 1949 г. в специально организованной лаборатории ультразвуковой дефектоскопии осуществлялся мелкосерийный выпуск отечественных ультразвуковых дефектоскопов различных модификаций (рис. 8).

В этой лаборатории все работы по проектированию и созданию новых приборов проводились в основном силами студентов (рис. 9), которым по инициативе С.Я. Соколова предоставлялась большая самостоятельность.

Примерно в это же время в лаборатории электроакустики и ультразвуковой техники начались работы по созданию многоканальных автоматизированных промышленных дефектоскопов для контроля листового проката (рис. 10, 11) [3].

На первый взгляд создание подобной аппаратуры кажется решением почти тривиальным,

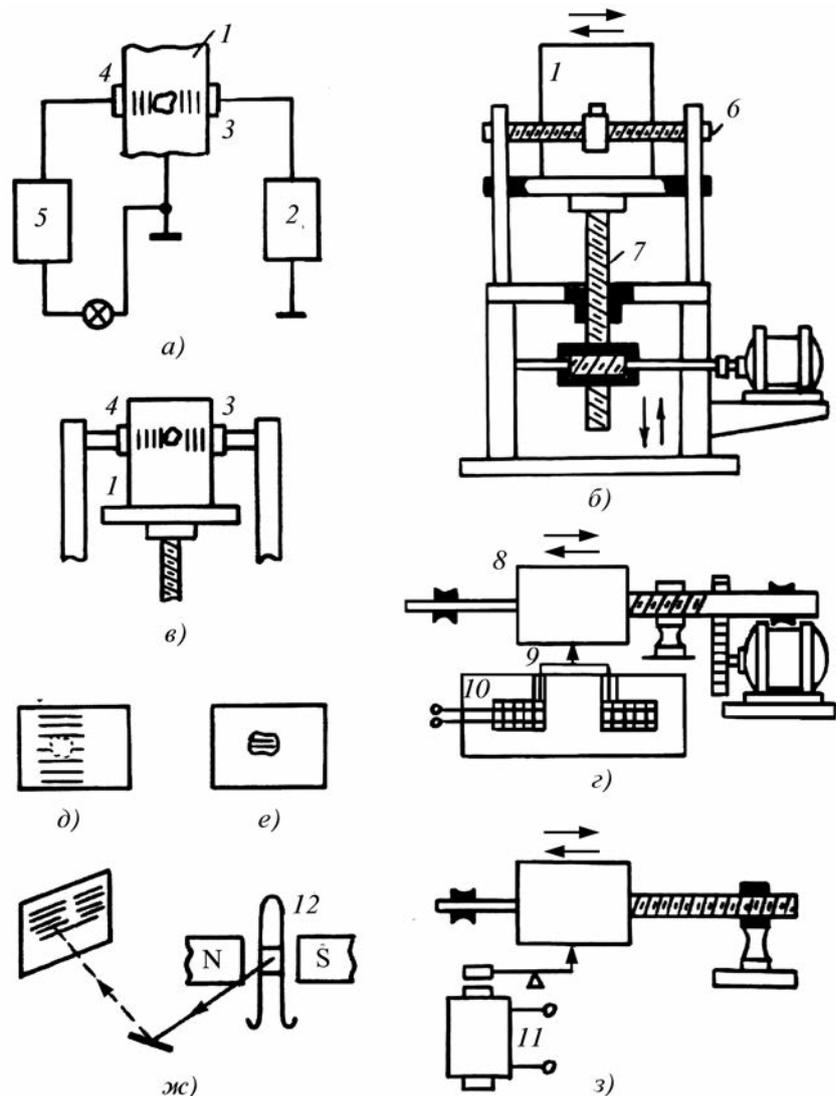


Рис. 7. Первые шаги в направлении автоматизации процессов ультразвукового контроля:

а – схема теневого метода контроля с двумя преобразователями; б – схема работы двухкоординатного сканирующего устройства; в – пример механизации «теневого» контроля; г – дефектоотметчик, управляемый электромагнитом; д и е – примерные виды дефектограмм; ж – схема построения изображения с помощью светового луча; з – дефектоотметчик, управляемый реле

требующим лишь объединения большого числа обычных дефектоскопов в единое целое. Однако уже первые расчеты с учетом требований по производительности и сплошности контроля показали, что для решения задачи могло потребоваться несколько сотен акустических каналов, дополненных соответствующим количеством преобразователей и электронных устройств. Такой

подход, исходя из требований надежности и экономичности, представлялся нереальным.

Радикальным решением, обеспечившим уменьшение количества электронных устройств, стало применение «бегущих ультразвуковых пучков» [3]. Однако массогабаритные показатели аппаратуры продолжали оставаться значительными (рис. 11) [3].

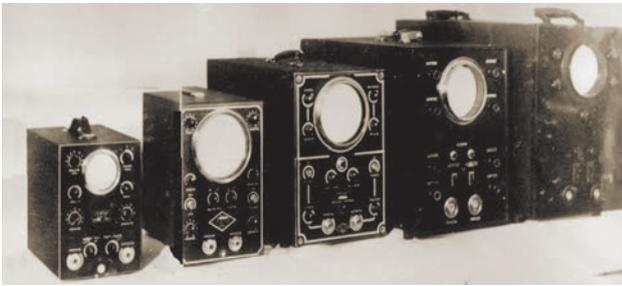


Рис. 8. Ультразвуковые дефектоскопы ранних серий, выпущавшихся в ЛЭТИ

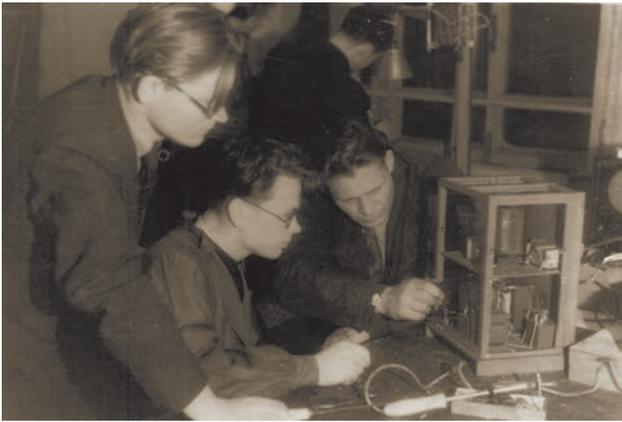


Рис. 9. Инженер С.В. Носиков (справа) и студенты П.С. Клушев (4-й курс) и Л.С. Каверин (5-й курс) за изготовлением ультразвукового дефектоскопа

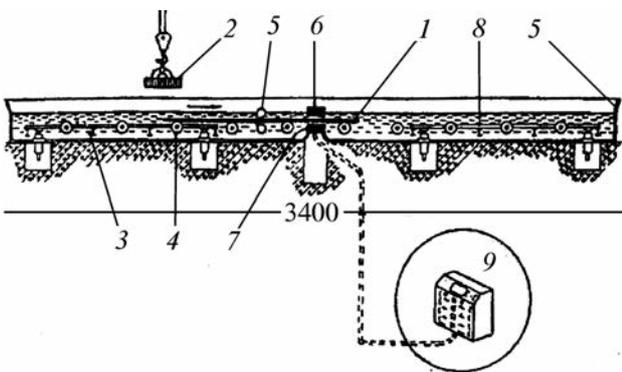


Рис. 10. Схема промышленной многоканальной ультразвуковой установки для контроля листового проката УЗУЛ-01

Перед работой установки (см. рис. 10) контролируемый лист 1 загружался с помощью крана 2 на гидравлические домкраты, которые опускали лист на ролик 4 в иммерсионной ванне 3 с технической водой 8. При контроле лист перемещался с помощью ролика через акустическую систему, состоящую из двух параллельных линеек излучающих 6 и приемных 7 датчиков. Обработка полезных сигналов и формирование дефектограммы контроля листа на электротермической бумаге осуществ-

лялись в шкафу с электронной аппаратурой 9. Предварительную очистку листов от окалины выполняли с помощью устройств гидросмыва 5. После контроля лист с помощью домкратов и крана выгружался из ванны.

Переход на новую элементную базу, замена электронных ламп на дискретные элементы (транзисторы, диоды и т.п.) и интегральные микросхемы позволили не только уменьшить массогабаритные показатели установки, но и подняться на более высокий уровень обработки информации с использованием ЭВМ и микропроцессорных систем (рис. 12). Существенно снизилось при этом и количество электроэнергии, потребляемой установкой. Повышение надежности работы отдельных узлов и блоков положительно сказалось не только на повышении надежности работы установки в целом, но и позволило сократить эксплуатационные расходы.

Переход на программный уровень управления работой всех систем и установки в целом обеспечил расширение функциональных возможностей установки в плане учета требований как отечественных, так и зарубежных стандартов. Наиболее продвинутой и совершенной системой в этом плане оказалась установка «ДУЭТ-5», изготовленная для металлургического комбината «Азовсталь» (Украина) (рис. 13) [5].

Переход на новую элементную базу позволил осуществить позитивные инженерные решения и по отношению к устройствам отображения информации. Долгое время единственным устройством, применявшимся для этих целей в дефектоскопах и другой аппаратуре для неразрушающего контроля, оставалась электронно-лучевая трубка.

С появлением матричных отображающих устройств (плазменных, жидкокристаллических и т.п.) представилась возможность отказаться от электронно-лучевой трубки и получить ряд дополнительных возможностей, отвечающих современным требованиям к средствам неразрушающего контроля (рис. 14). Прежде всего это положительно сказалось на надежности дефектоскопов из-за устранения в схеме прибора источников высокого напряжения. Это же позволило перейти на смешанное (аккумуляторно-сетевое) питание, допускающее применение приборов при работе в помещениях с повышенной опасностью и на открытом воздухе. Малые габариты и высокая автономность явились факторами, способствующими использованию портативной аппаратуры при работе на высотных объектах.

Одним из примеров средств контроля с подобными характеристиками являются дефектоскопы типа УЗД-2-Эксперт, разработанные в ЛЭТИ совместно со специалистами Крыловского госу-

дарственного научного центра (Санкт-Петербург).

Высокую экологическую опасность, сопровождаемую социальными последствиями, представляют современные системы трубопроводного транспорта, предназначенного для доставки потребителям бытовой воды (холодное и горячее водоснабжение) и энергоносителей (газ, нефть и нефтепродукты). В связи с этим в последнее время все большую актуальность приобретают задачи разработки средств контроля не только для технологических и производственных условий, но и для условий эксплуатации.

Решение этой актуальной задачи связано с появлением в последнее время разработок различного вида дефектоскопов-снарядов, предназначенных для проведения контрольных операций в потоке перекачиваемой среды или в подобных условиях.

Примером такой разработки, осуществленной специалистами СПбГЭТУ ЛЭТИ по заказу регионального отделения ОАО «Трансгаз» по Ленинградской области и Санкт-Петербургу, является неавтономный ультразвуковой дефектоскоп-снаряд (рис. 15), предназначенный для контроля толщины стенок труб водопроводных коммунальных систем диаметром до 600 мм при их частичном выводе из эксплуатации.

Система прошла полный цикл объектных испытаний и была рекомендована заказчиком для использования в организациях соответствующего профиля.

Вторым очень важным направлением работ С.Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии как до войны, так и в послевоенное время являются работы по звуковидению. Он считал, что необходимо не только обнаружить несплошности в изделии, но и установить их размеры и форму – визуализировать. К этому были все предпосылки, так как ультразвук оказался необычайно чувствителен к малейшим градиентам свойств вещества и способен визуализировать такие слабые неоднородности, которые не обнаруживаются другими методами.

Первой системой звуковидения, предложенной С.Я. Соколовым еще в 1928 г. [1] и подробно описанной в работах [5, 6], была система, основанная на создании и регистрации на свободной поверхности жидкости распределения акустического поля – метод поверхностного рельефа. Эта система после доработки была построена по аналогии с оптическими системами (рис. 16), где 1 – излучатель ультразвука; 2 – объект; 3 – акустическая линза; 4 – поверхность жидкости; 5 – источник света; 6 – конденсорная линза; 7 – объектив; 8 – диафрагма; 9 – экран. Ультразвуковой пучок,



Рис. 11. Шкаф с электронной аппаратурой установки типа УЗУЛ-01

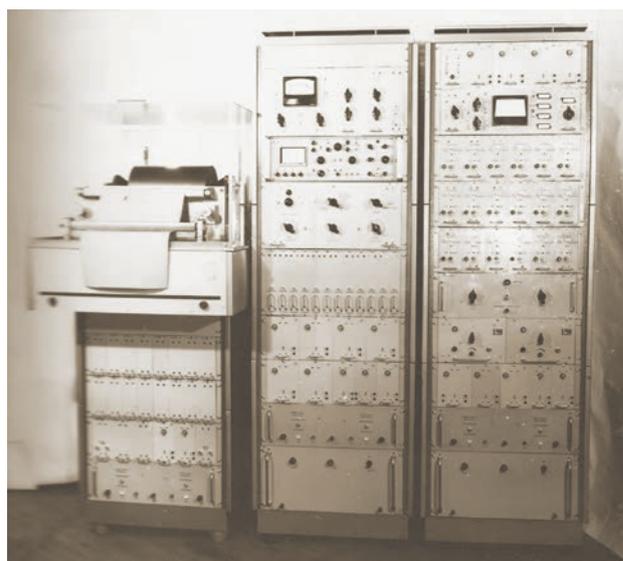


Рис. 12. Общий вид электронной аппаратуры установки для контроля листов из медных сплавов типа УДЛ-01

прошедший через контролируемое изделие и акустическую линзу, формирует на поверхности жидкости статический рельеф, образуемый постоянным давлением  $\bar{P}$  акустической радиации:

$$\bar{P} = 2J / C,$$

где  $J$  – распределение интенсивности акустических колебаний в «ультразвуковом изображении»;  $C$  – скорость звука в жидкости.

Дальнейшие исследования метода поверхностного рельефа, выполненные Е.Д. Пигулевским, показали, что этот метод обладает достаточно высо-

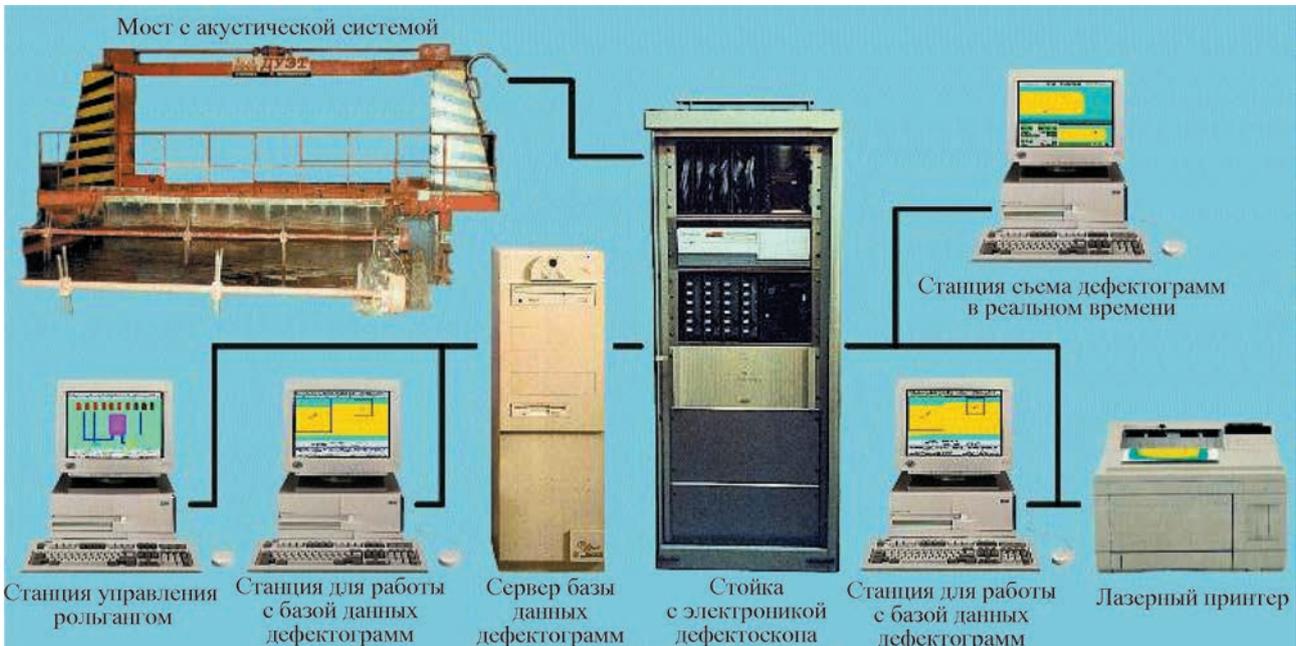


Рис. 13. Схема устройства установки типа «ДУЭТ-5»



Рис. 14. Один из первых отечественных портативных ультразвуковых дефектоскопов с матричным экраном типа УЗД-20



Рис. 15. Неавтономный ультразвуковой дефектоскоп-снаряд для контроля труб систем коммунального водоснабжения

кими пороговой чувствительностью ( $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>) и разрешающей способностью (2 мм) [7, 8].

Значительно большей чувствительностью обладала вторая система звуковидения, основанная на акустическом преобразовании в так называемой трубке Соколова – акустическом аналоге кинескопа. Наиболее подробно эта система описана в американском патенте [9] и в статье [10]. Структурная схема установки на основе трубки Соколова приведена на рис. 17, где 1 – контролируемое изделие с внутренним дефектом; 2 – излучающий преобразователь, возбуждаемый генератором 4; 5 – электронно-лучевая трубка, в которой светочувствительный экран заменен на звукочувствительный преобразователь 6, имеющий сеть точечных электродов, изолированных один от другого.

При прозвучивании изделия на приемной пьезопластине создается рельеф электрических зарядов, которые считываются электронным лучом 7, усиливаются и управляют яркостью луча 8 второй электронно-лучевой трубки 9, на светочувствительном экране 10 которой создается видимое изображение дефекта в изделии. Этот метод интроскопии, подробно исследованный В.Г. Прохоровым [11], показал пороговую чувствительность  $10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> и такую же, как в первом, разрешающую способность.

Дальнейшее совершенствование этого метода привело к созданию ультразвукового микроскопа [12].

В этих же работах [7, 10] С.Я. Соколов предложил еще один способ визуализации, основанный

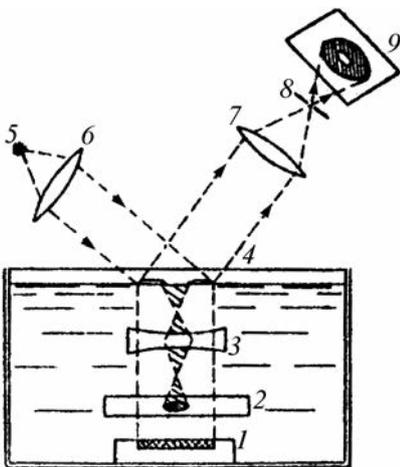


Рис. 16. Схема метода «акустического рельефа»

на механическом сканировании пьезоэлектрического рельефа.

Реализация этого способа представлена на рис. 18. В изделии 1 расположен дефект 2 (например, воздушная пора). Генераторное устройство 4 создает электрические сигналы для возбуждения излучающего преобразователя 3, формирующего упругие волны, бегущие внутри изделия 1. Эти волны частично задерживаются дефектом 2, формируя волновое поле в области донной грани изделия 1.

Рельеф электрических зарядов, возникших в различных точ-

ках «многоэлементного» пьезоприемника 5, считывается вращающимся от двигателя 6 диском 7, насаженным на вал 8, и с контактами, расположенными равномерно по спирали. Контакты соединены проводниками с гильзой 9 и замыкаются при вращении диска щеткой 10. Заряды каждой точки пьезоприемника усиливаются усилителем 11 и управляют яркостью неоновой лампочки 12, установленной перед вторым вращающимся диском 13, на котором имеются отверстия, расположенные таким же образом, как и контакты на первом диске.

В результате на матовом экране 14 образуется видимое изображение внутренней структуры объекта контроля. Исследования, выполненные впоследствии П.В. Пономаревым [13, 14], показали, что этот метод обладает самой высокой пороговой чувствительностью ( $10^{-13}$  Вт/см<sup>2</sup>). Однако вследствие большего времени механического сканирования он не может использоваться, в отличие от двух описанных выше, для контроля динамических изображений.

В предложенных С.Я. Соколовым методах и устройствах визуализации (рис. 19, 20) не ис-

пользовался огромный потенциал, заключающийся в принципиальном отличии звуковидения от оптики и рентгена, которое обусловлено возможностью регистрации ультразвуковых сигналов с точностью до фазы. Этот потенциал полностью раскрылся с появлением оптической голографии.

В устройстве на рис. 19 пьезокварцевая мозаика (на рисунке не обозначена) наклеивалась непосредственно на экран трубки формирующего электронно-акустического преобразователя. Одновременно этот экран являлся боковой гранью кюветы с водой, в которую погружались излучатель 4, контролируемый объект 2 и акустическая «линза» 3. На мозаику отбрасывалась «тень», возникающая при «озвучивании» объекта, находящегося в водной среде в кювете. Возникающие на элементах «мозаики» электрические потенциалы, имеющие величину, пропорциональную величине акустического давления в жидкости, сканировались электронным лучом, а затем визуально наблюдались на экране приемной электронно-лучевой трубки, давая видимое изображение исследуемого объекта.

Парадокс заключается в том, что если в оптике развитие голографии стало возможным только после появления когерентных источников света – лазеров, то в акустике источники звука обладали очень высокой когерентностью. Уже в первых опытах с системами звуковидения [1, 3, 5] регистрировалась интерференция падающих и отраженных от свободной поверхности жидкости когерентных ультразвуковых волн, т.е. образовывалась акустическая голограмма. Очевидно, это дало основание считать, что С.Я. Соколов является создателем акустической голографии [11].

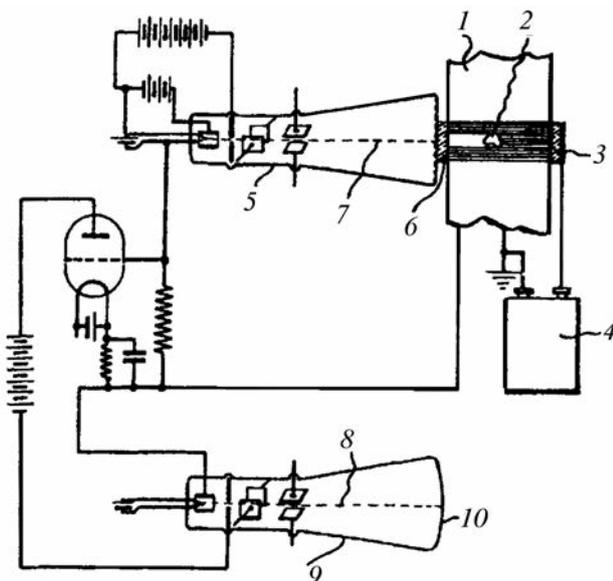


Рис. 17. Схема ультразвукового микроскопа

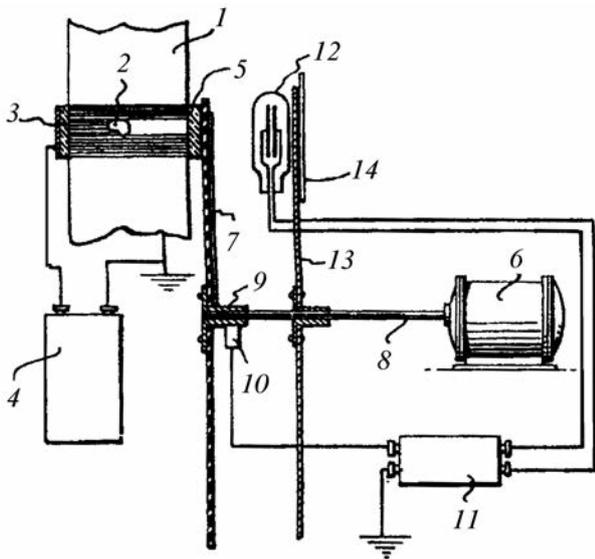


Рис. 18. Схема метода механического сканирования пьезоэлектрического рельефа

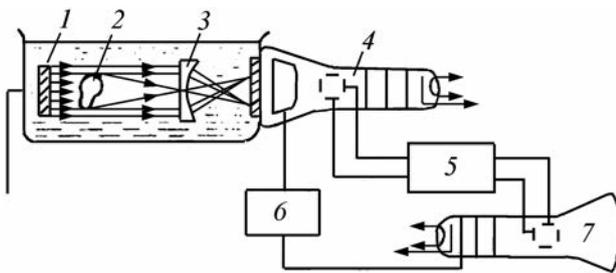


Рис. 19. Схема устройства электронно-акустического преобразователя («трубки Соколова»):

1 – излучатель; 2 – исследуемый объект; 3 – акустическая «линза»; 4 – электронно-акустическая трубка формирования изображения; 5 – устройство развертки; 6 – усилитель; 7 – приемная трубка демонстрации изображения



Рис. 20. Практические конструкции электронно-акустических преобразователей

Бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР на своем заседании 12 января 1972 г. постановило, что С.Я. Соколовым сделано открытие, и отразило этот факт следующей формулировкой: «Экспериментально обнаружено новое физическое явление, состоящее в том, что

ультразвуковые волны при прохождении через твердые, жидкие или газообразные среды, содержащие неоднородности, образуют акустическое изображение этих неоднородностей, которое с помощью звукооптических устройств может быть преобразовано в видимое изображение». Привилегии по данному открытию установлены по авторскому свидетельству [1] С.Я. Соколова с приоритетом от 2 февраля 1928 г.

### Библиографический список

1. Пат. № 11371 СССР, класс 42к 29. Способ и устройства для испытания металлов / С.Я. Соколов; опубл. 30.09.29 // Вестник Комитета по делам изобретений. 1929. № 6.
2. Sokoloff S. Zur Frage der Fortpflanzung ultraschalliger Schwingungen in verschieden Rörpern. // Elect. Nachr. Techn. 1929. Bd. 6. N. 11. S. 450–460 (К вопросу ультраакустических колебаний в различных телах).
3. Иофе В.К., Мясникова Е.Н., Соколова Е.С. Сергей Яковлевич Соколов / СПбГЭТУ. СПб., 1997. 176 с.
4. Чедд Г. Звук. М.: Мир, 1975. 206 с.
5. Паврос С.К. Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // Известия ГЭТУ. 1997. Вып. 505. С. 5–11.
6. Соколов С.Я. Избранные труды. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. 263 с.
7. Соколов С.Я. Ультраакустические колебания и их применение // Заводская лаборатория. 1935. № 5. С. 527–538.
8. Пигулевский Е.Д. О чувствительности и разрешающей способности акустооптического преобразователя на поверхности жидкости // Акуст. журн. 1958. Т. 4. № 4. С. 348–354.
9. Пат. № 2 164125 США. Средства для обнаружения дефектов в материале // С.Я. Соколов. Опубл. 08.06.1937.
10. Соколов С.Я. Ультраакустические методы изучения свойств закаленной стали и определения внутренних пороков металлических изделий // ЖТФ. 1941. Т. XI. Вып. 1. С. 160–169.
11. Прохоров В.Г. Электронно-акустический преобразователь // Акуст. журн. 1957. Т. 3. № 3. С. 248–254.
12. Соколов С.Я. Ультразвуковой микроскоп // ДАН СССР. 1949. Т. LXIV. № 3. С. 333–335.
13. Пономарев П.В. Опытная установка для видения ультразвукового поля // Известия ЛЭТИ. 1958. Вып. 34. С. 224–228.
14. Уэйд Г. Системы акустического изображения. Л.: Судостроение, 1981.