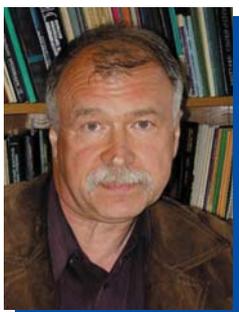


# ВКЛАД КАФЕДРЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНИКИ В РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗА 90 ЛЕТ С МОМЕНТА ОСНОВАНИЯ



**АББАКУМОВ**  
Константин Евгеньевич



**ВЬЮГИНОВА**  
Алена Александровна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

В 1928 г., 2 февраля, молодой преподаватель кафедры «Специальная радиотехника» Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) Сергей Яковлевич Соколов направил заявку на регистрацию способа и устройства для испытания материалов, на которые впоследствии был получен патент № 11371 [1]. В этой заявке впервые было изложено предложение использовать ультразвуковые колебания для исследования изделий в целях получения информации об их внутренних дефектах и структуре. Именно от этой даты мировая общественность ведет отсчет существования ультразвуковой дефектоскопии – науки о методах и приборах контроля качества материалов и изделий, созданной на кафедре, которой в этом году исполняется 90 лет.

Схема устройства, изложенного в заявке, сегодня выглядит весьма архаично: 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 поверхности которого наблюдается через лупу, т.е. предложен теневой сквозной метод ультразвуковой дефектоскопии в иммерсионном варианте с непрерывным излучением.

В статье [2], опубликованной в 1929 г. в Германии, С.Я. Соколов (рис. 1) обобщил результаты своих исследований по распространению ультразвуковых волн в различных металлах и сформулировал обнаруженные им особенности свойств ультразвука:

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

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

Здесь же он впервые предложил использовать одну и ту же пьезопластину как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвука, т.е. сформулировал принцип совмещенного преобразователя с применением частотно-модулированных колебаний.

В конце 1929 г. на кафедре «Специальная радиотехника», заведующим которой был профессор И.Г. Фрейман (рис. 2), была организована специализация по электроакустике, а уже в 1930 г. состоялся первый выпуск инженеров (4 человека). В 1931 г. была создана первая в стране кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, бессменным заведующим которой до своей смерти в 1957 г. оставался С.Я. Соколов. Интенсивные научные исследования по ультразвуку теперь сопровождались хлопотами по организации и ведению учебного процесса (рис. 3, 4).

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

- разработан точечный пьезоэлектрический приемный преобразователь и исследовано распределение им 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 отдельной 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 тур-



Рис. 1. Сергей Яковлевич Соколов — основатель звуковидения и ультразвуковой дефектоскопии, зав. кафедрой ЭУТ в 1931—1957 гг.



Рис. 2. Имант Георгиевич Фрейман (1890—1929), профессор, д-р техн. наук, зав. кафедрой специальной радиотехники в ЛЭТИ; учитель, наставник и научный руководитель С.Я. Соколова



Рис. 3. Работа у экспериментального стенда (на фото слева направо: О.Г. Страхова, С.Я. Соколов, Ю.Ф. Тутуров)



Рис. 4. С.Я. Соколов с учениками в учебной лаборатории (1936 г.)

бинных 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.

Проведенные в этот период исследования, а также изобретения С.Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии намного опередили аналогичные работы других ученых и получили высокую оценку: в 1942 г. ему была присуждена Сталинская премия.

Вторым очень важным направлением работ С.Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии как до войны, так и в послевоенное время являются работы по звуковидению (рис. 5, 6). 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 слабые неоднородности, которые не обнаруживаются другими методами.

Первой системой звуковидения, предложенной С.Я. Соколовым еще в 1928 г. [1] и подробно описанной в статье [5], была система, основанная на создании распределения поля на поверхности жидкости, — метод поверхностного рельефа. Ультразвуковой пучок, прошедший через контролируемое изделие, формирует на поверхности жидкости статический рельеф, образуемый постоянным давлением  $\bar{P}$  акустической радиации:  $\bar{P} = 2J/C$ , где  $J$  — распределение интенсивности звука в «ультразвуковом изображении» на поверхности, а  $C$  — скорость звука в жидкости. Ультразвуковое изображение далее освещается световым пучком, который, отражаясь от поверхности, на вертикальном или горизонтальном экране образует «ультрасонограмму» — световое изображение. Дальнейшие исследования этого метода выполнил аспирант кафедры Е.Д. Пигулевский, который показал [6], что этот метод обладает высокой пороговой чувствительностью —  $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> и разрешающей способностью 2 мм на частоте 3 МГц.

Значительно большей чувствительностью обладала система звуковидения, основанная на акустооптическом преобразовании в так называемой трубке Соколова — акустическом аналоге кинескопа, у которого светочувствительный экран заменен пьезоэлектрическим преобразователем [3]. Этот метод звуковидения, подробно исследованный аспирантом В.Г. Прохоровым [7], показал пороговую чувствительность порядка  $10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> и разрешающую способность, как у предыдущего.

Еще более высокая чувствительность этого метода (порядка  $10^{-13}$  Вт/см<sup>2</sup>) была достигнута аспирантом П.В. Пономаревым [8] путем механического сканирования пьезоэлектрического рельефа, возникающего на пьезомишени под воздействием ультразвукового изображения. Однако из-за длительности механического сканирования он не мог применяться для контроля динамических изображений.

В предложенных С.Я. Соколовым методах и устройствах визуализации не использовался огромный потенциал, заложенный в том принципиальном отличии звуковидения от оптики и рентгена, которое обусловлено возможностью регистрации ультразвуковых сигналов с точностью до фазы. Этот потенциал полностью проявился с появлением оптической голографии.

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] 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 [9].

Бюро отделения общей физики и астрономии АН СССР на своем заседании, состоявшемся 12 января 1972 г., установило, что С.Я. Соколовым сделано открытие со 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». Приоритет С.Я. Соколова по данному открытию установлен авторским свидетельством [1].

Работы в области звуковидения на кафедре были возобновлены в конце 1960-х гг. первоначально в направлении акустической голографии (Е.Д. Пигулевский, О.В. Клыкковский, А.А. Перрен) [10], а впоследствии реконструктивной акустической томографии (А.В. Осетров, В.В. Долганов) [11]. За этот период были решены задачи, связанные с обработкой информации в методах синтезированной апертуры [12] и построением систем неразрушающего контроля объектов сложной формы [13].

После войны работы в области ультразвуковой дефектоскопии на кафедре возобновились лишь в 1947 г. с создания нового промышленного импульсного дефектоскопа (патент Дж. Файрстона Соколову уже был известен). К этой работе были привлечены три дипломника (А.Л. Давыдов, Б.Н. Машарский, Ю.В. Мирохин), а также группа студентов четвертого курса — А.И. Сауков, В.Г. Прохоров, Д.Б. Дианов, А.Е. Колесников и Е.С. Соколова. Несмотря на сложности с обеспечением электронными компонентами, энтузиазм молодых исполнителей позволил к концу 1948 г. изготовить несколько таких приборов, скомплектованных из трофейных материалов. Прибор работал только по раздельной схеме с двумя преобразователями. После сдачи образцов заказчиком С.Я. Соколов перед этим же коллективом поставил новую задачу — перевести блоки прибора на отечественные радиолампы, обеспечить возможность работы прибора на один и два щупа, улучшить его разрешающую способность, уменьшить массу и габариты. К 1950 г., когда было разработано и передано в промышленность несколько еще довольно громоздких приборов, стало известно, что созданием ультразвуковых дефектоскопов усиленно занимаются еще две группы специалистов. Во главе одной из них стоял Д.С. Шрайбер (ВИАМ), второй — С.А.

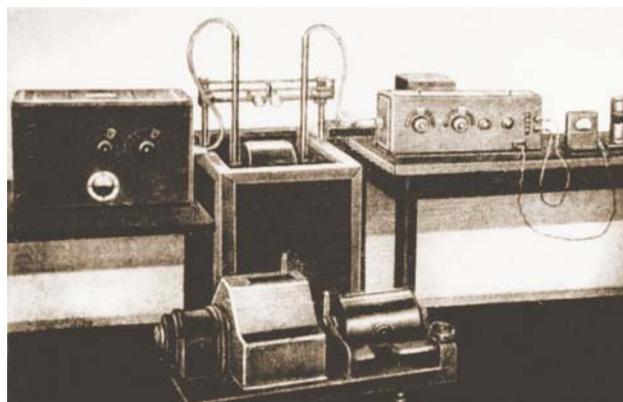


Рис. 5. Одна из первых экспериментальных установок С.Я. Соколова для «сквозного прозвучивания» изделий в масляной ванне

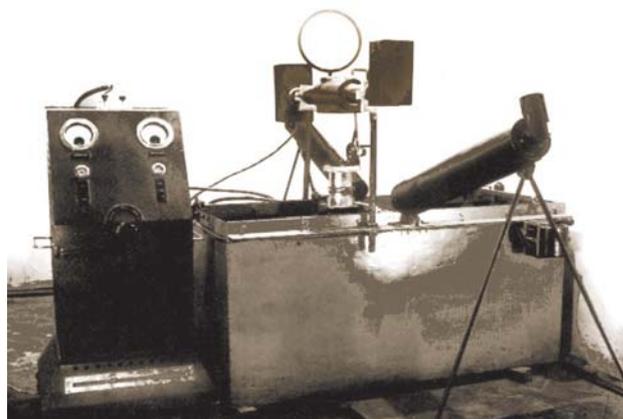


Рис. 6. Лабораторная установка звуковидения по методу поверхностного рельефа

Матвеев (ЦНИИТМАШ). Несмотря на дружеские отношения С.Я. Соколова с руководителями этих групп, дальнейшая работа по разработке дефектоскопов носила конкурентный характер. В лаборатории ЭУТ в работу одновременно были запущены три модели приборов — УЗД-10, УЗД-11, УЗД-12. Первая конструкция была относительно легкой (10 кг), с малой электронно-лучевой трубкой, УЗД-11 выпускался в блочном исполнении, а УЗД-12 — на едином шасси. Последний прибор оказался наиболее удачным и после усовершенствования и замены кварцевых преобразователей пьезокерамическими (титанат бария) стал производиться серийно под маркой УЗД-12Т. Заводских специалистов обучали работе с прибором на предприятиях, куда командировались сотрудники лаборатории, работающие дипломники и некоторые студенты.

За работы в области ультразвуковой микроскопии, разработку и внедрение в заводскую практику ультразвуковых дефектоскопов С.Я. Соколову, его сотрудникам А.Л. Давыдову, Б.Н. Машарскому, механикам Г.Е. Грачеву и И.В. Кулакову, а также



Рис. 7. Лев Григорьевич Меркулов, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой ЭУТ в 1957–1965 гг.



Рис. 8. Опытный образец высокочастотного измерителя скоростей упругих волн «Фонон»

А.С. Матвееву (ЦНИИТМАШ) и Н.И. Барышникову (завод «Электросталь») уже в 1951 г. была присуждена Государственная премия.

В 1951–1957 гг. в лаборатории ультразвуковой дефектоскопии кафедры под руководством С.Я. Соколова работали: А.Л. Давыдов, Б.Н. Машарский, Е.А. Корепин, В.М. Веревкин, А.Е. Колесников, А.С. Голубев, А.В. Гусев, В.А. Шукин, Е.Д. Пигулевский, И.Ф. Лопатко, П.Н. Петров, Ю.М. Быстров, Б.Е. Михалев, Л.А. Яковлев, А.В. Харитонов, К.С. Александров, В.В. Богородский и многие студенты. План выпуска составлял не менее 40 приборов в год, так что за этот период было изготовлено и продано заказчикам более 300 дефектоскопов УЗД-12Т, УЗД-14 и УЗД-16.

Разработка ультразвуковых дефектоскопов для контроля различных материалов требовала проработки вопросов чувствительности, исследования влияния поглощения и рассеяния звука в конструкционных материалах, оптимизации характеристик пьезопреобразователей.

Определение чувствительности контроля изделий эхометодом исследовалось Б.Н. Машарским [14]. Им же выполнен анализ уравнений акустического тракта при отражении от дефектов простой формы (сфера, диск, группа сфер). Было показано, что, измеряя величину отраженного сигнала на различных частотах, можно судить о характере дефекта в изделии.

Теоретические и экспериментальные исследования поглощения и рассеяния звука в поликристаллических средах выполнил аспирант кафедры (будущий ее заведующий, сменивший С.Я. Соколова в 1957 г.) Л.Г. Меркулов (рис. 7). Он установил количественную связь между коэффициентом затухания, средним размером зерна и их упругой анизотропией [15–17].

Эти исследования в настоящее время являются классическими и легли в основу современной спектроскопии. В дальнейшем они были использованы при разработке измерителя скорости «Фонон» (рис. 8) и ультразвукового дефектоскопа-структурометра УЗДС-18 (А.С. Голубев, А.Е. Иванов (рис. 11)).

Исследование пьезопреобразователей, предназначенных для работы на жидкие и твердые среды, начал Н.А. Евдокимов [18]. Анализ работы преобразователей для контроля твердых сред в непрерывном режиме выполнил Д.Б. Дианов [19], а для контроля в импульсном режиме без учета их электрической нагрузки – П.В. Понамарев [20]. Наиболее полные расчеты многослойных пьезопреобразователей для непрерывного режима, ставшие классическими, выполнили Л.Г. Меркулов и Л.М. Яблоник [21, 22], а отдельные аспекты этой проблемы изучались В.Е. Ивановым, А.С. Голубевым, А.И. Сафоновым и Л.А. Яковлевым [23, 24]. Исследование работы преобразователя с нагрузкой на анизотропную среду впервые освещено в статье [25]. Значительный вклад в теорию анализа пьезопреобразователей в импульсном режиме внесли Н.А. Евдокимов, Б.А. Касаткин и А.Ф. Мельканович [26–28]. Полученные ими результаты используются и в настоящее время. Исследовалась также возможность построения двухрезонансных преобразователей, позволяющих возбуждать в твердом теле продольные или поперечные волны [29] (рис. 9, 10).

Применительно к работе наклонного призматического преобразователя исследовался вопрос о прохождении упругих волн через границу раздела двух твердых сред, когда тангенциальные составляющие напряжения обращаются в ноль [30]. Полученные результаты до настоящего времени имеют практическое значение для выбора наилучшего материала призмы и оптимальных углов ввода ультразвуковых колебаний в исследуемое изде-

лие. В дальнейшем [31] были впервые получены выражения характеристики направленности такого преобразователя. Для контроля аустенитных сварных швов при работе на низких частотах, что необходимо из-за большого рассеяния ультразвука, И.Ф. Лопатко [32] была предложена новая конструкция раздельно-совмещенного преобразователя «ДУЭТ».

Одной из задач ультразвукового контроля является измерение толщины стенок объектов при одностороннем доступе. Такой прибор, изготовленный на кафедре электроакустики [33], отличался от аналогичных возможностью измерения временного интервала между любыми донными импульсами, что позволило повысить точность измерения и довести нижний предел измеряемых толщин до 2–3 мм.

Кроме этого впервые отсчет толщины осуществлялся по соответствующей шкале, отградуированной непосредственно в единицах длины (миллиметрах) (рис. 12).

Работы по созданию новых толщиномеров продолжают и в настоящее время. Был разработан, изготовлен и прошел испытания ультразвуковой толщиномер для измерения стенок (толщиной 2–200 мм) металлических объектов, находящихся в подводном положении на глубине до 100 м. Иммерсионный многоканальный внутритрубный толщиномер для инспекции труб диаметром 250–500 мм с толщиной стенки 5–20 мм разработан, изготовлен, успешно прошел натурные испытания и в настоящее время сертифицируется (С.К. Паврос, Е.Г. Пряхин, С.В. Ромашкин, А.Ф. Рыжков, рис. 13) [34].

Одним из важных начинаний С.Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии является автоматизация процесса контроля и регистрации его результа-

тов. Так, в авторском свидетельстве [35] он предложил несколько вариантов дефектоскопов с автоматическими сканирующими системами и возможностью фиксации контуров дефектов. После войны первой проработкой в этом направлении стала попытка автоматизации контроля листового проката теньвым методом на заводе им. Г.И. Петровского в г. Днепропетровске, выполненная молодыми инженерами Е.А. Корепиным, В.М. Вережкиным и Д.В. Носиковым. Десятиканальный макет аппаратуры с регистрацией дефектов на электротермической бумаге [36] прошел успешную апробацию на заводе. Однако использованный в ней механический коммутатор не позволял реализовать требуемую высокую скорость контроля.

Автоматизация контроля изделий малой толщины с высокой чувствительностью сталкивается с определенными трудностями. Они были преодолены В.М. Вережкиным и К.В. Жарковым в установке [37] для автоматического контроля заготовок поршневых колец толщиной 3 мм. Для контроля использовалось наклонное падение ультразвуковых волн под углом, близким ко второму критическому. Производительность аппаратуры 420 деталей в час, а ее чувствительность составляла 0,1 мм<sup>2</sup>. Для разбраковки изделий на годные и бракованные использовалось устройство в виде мальтийского креста.

Задача высокоскоростного автоматизированного контроля листового проката была решена после реализации предложенной Л.Г. Меркуловым, В.М. Вережкиным, Н.А. Евдокимовым и К.В. Жарковым системы прозвучивания проката группой одновременно бегущих лучей и электронной коммутации акустических каналов [38]. Эта система легла в основу первой про-



Рис. 9. Измерительная система с «двухрезонансными» датчиками

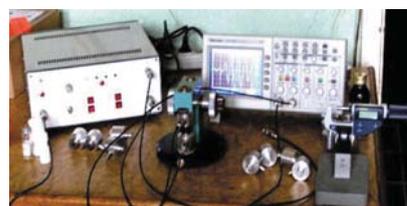


Рис. 10. Аппаратный комплекс прецизионного измерителя скоростей упругих волн типа «АИСТ»



Рис. 11. Ультразвуковой дефектоскоп-структуромер, УЗДС-18 (авторы В.Е. Иванов, А.С. Голубев)



Рис. 12. Общий вид одной из первых моделей ультразвукового толщиномера (автор И.В. Лопатко)



Рис. 13. Неавтономный ультразвуковой внутритрубный толщиномер-снаряд для контроля труб, заглубленных в грунт

мысленной установки УЗУЛ-01, внедренной в 1961 г. на Нижнетагильском металлургическом комбинате. В 1962–1964 гг. на кафедре были разработаны, изготовлены и внедрены еще три такие установки, отличавшиеся от УЗУЛ-01 рядом параметров. В работе [39] дан обзор методов и средств контроля толстолистового проката, разработанных на кафедре в 1964–1997 гг. Здесь хотелось бы выделить следующее:

- предложенный В.М. Веревкиным и Н.А. Евдокимовым новый эхосквозной метод ультразвуковой дефектоскопии [35];
- разработка, изготовление и внедрение на ряде предприятий страны четырех установок типа «ДУЭТ», в которых реализован этот метод (В.М. Веревкин, Н.А. Евдокимов, А.С. Голубев, Д.Д. Добротин, В.А. Каширин, С.К. Паврос, К.Е. Аббакумов и др.) [40];
- разработка, изготовление и внедрение на предприятиях Санкт-Петербурга трех установок с реализацией многократно-теневоего метода (А.С. Голубев, С.К. Паврос, Д.Д. Добротин, К.Е. Аббакумов, В.Е. Артемов, С.В. Мамистов, А.В. Топунов [41];
- разработка, изготовление и внедрение на Ижорском заводе установки для контроля толстых листов и плит с применением эхо- и зеркально-теневоего методов (А.С. Голубев, С.К. Паврос, К.В. Жарков, К.Е. Аббакумов, А.В. Топунов);
- разработка ГОСТ22727–88 «Сталь толстолистовая. Методы ультразвукового контроля сплошности» (А.С. Голубев, В.М. Веревкин, В.А. Каширин).

За комплекс работ по дефектоскопии листового проката, выполненных в этот период, К.Е. Аббакумов, В.М. Веревкин, А.С. Голубев, Д.Д. Добротин, В.А. Каширин, С.К. Паврос отмечены международной премией и медалью «Рентген – Соколов» за 1997 г.

Первые пять лет в начале 2000-х были годами освоения в аппаратуре ультразвукового контроля листового проката новой элементной базы на основе цифровых методов и компьютерных систем

регистрации и обработки информации. В результате была разработана, изготовлена и внедрена на заводе «Азовсталь» уникальная установка «ДУЭТ-5» для контроля проката в технологическом потоке производства со скоростью движения листов до 2 м/с, регистрации всей информации с последующей ее сортировкой по любым стандартам и нормам [42] (В.М. Веревкин, В.А. Каширин, Н.Н. Егоров, С.В. Титов, К.Э. Тоом и др. (рис. 14)).

Для Ижорского завода была разработана установка для контроля проката толщиной 20–300 мм эхоимпульсным методом с автоматическим слежением преобразователей за кривизной поверхности листа с регистрацией всей информации и отображением ее в виде разверток типа В вдоль и поперек листа и плановой развертки типа С [43] (С.К. Паврос, К.Е. Аббакумов, А.В. Топунов, А.Ф. Рыжков, Е.Г. Пряхин, Р.В. Ромашко).

Одновременно с разработкой установок для контроля толстолистового проката на кафедре продолжились исследования по распространению упругих волн в ограниченных средах и их взаимодействию с неоднородностями вещества объекта контроля. Здесь следует отметить пионерские разработки: Д.Б. Дианова по возбуждению нормальных рэлеевских волн в пластине [44, 45], Л.Г. Меркулова, Е.Д. Пигулевского и К.В. Жаркова – по исследованию затухания нормальных волн в свободной пластине и находящейся в жидкости [46, 47], Б.А. Касаткина – по анализу возбуждения и распространения различных нормальных волн в стержнях [48, 49], Л.В. Веревкиной и Л.Г. Меркулова – по теории нормальных волн в трубах [50, 51], К.В. Жаркова – в двухслойных пластинах [52, 53], Л.Г. Меркулова и С.И. Рохлина – по взаимодействию волн Лэмба с расслоениями в пластине [54, 55].

В 1965 г. Л.Г. Меркулова на посту заведующего кафедрой сменил А.Т. Прохоров (рис. 15), до этого работавший в НИИ радиовещания и акустики им. А.С. Попова. Он обладал большим опытом проектирования громкоговорительных, рупорных систем и очень широкими связями с представителями промышленных предприятий. Это нашло свое отражение в обновлении учебных планов и включении в них учебных дисциплин по теории сигналов и статистическим методам обработки информации.

В дальнейшем теоретические и экспериментальные исследования нормальных волн продолжали А.В. Харитонов (рис. 16), его ученики: Л.А. Никифоров [56], А.В. Пашутин [57], С.М. Балабаев [58], Н.Н. Егоров [59], И.В. Ильин [60] и др. В ряду этих работ следует особо отметить разработку электромагнитно-акустических преобразователей с периодической магнитной системой для воз-

буждения и приема нормальных волн различных типов (А.В. Пашутин [61]). Результаты этих работ обобщены в докторской диссертации А.В. Харитонов [62], а обширный список публикаций сотрудников кафедры, посвященных этому вопросу, приведен в статье [63].

Разработка аппаратуры неразрушающего контроля материалов и изделий невозможна без средств контроля акустических характеристик материалов (скоростей распространения продольных и поперечных волн и их коэффициентов затухания). Резонансный метод измерения скорости продольных волн использовал С.Я. Соколов [3] еще в 1929 г. при исследованиях свойств различных материалов. Для измерения скоростей распространения упругих волн в различных материалах, в том числе в кристаллах, на кафедре на основе импульсного фазового метода был разработан измеритель скорости УЗИС-6 (К.С. Александров, О.В. Носиков, рис. 17) [64], в котором величина измеряемой скорости определяется на основании сравнения времени прохождения ультразвуковых импульсов через исследуемый образец и через жидкостную эталонную линию. Этот прибор в течение длительного времени выпускался учебно-экспериментальными мастерскими при ЛЭТИ по заказам различных организаций. Одновременно был разработан прибор для измерения скорости звука в жидкости (О.И. Бабиков) [65], который использовался для измерения скорости протекания химических реакций, концентрации компонентов растворов [66]. Работы по совершенствованию такой аппаратуры [67, 68], улучшению ее метрологических характеристик [69] на кафедре осуществляются постоянно (В.Е. Иванов, В.А. Шукин, Л.А. Яковлев, М.М. Ше-



Рис. 14. Сотрудники кафедры ЭУТ, разработчики установки «ДУЭТ-5» (2005 г.), слева направо: С.В. Титов, Н.Н. Егоров, В.М. Вережкин, Н.Н. Смирнов, В.А. Каширин, В.В. Ковалев, Н.Э. Махов, А.А. Ряднов, К.Э. Тоом



Рис. 15. Анатолий Тимофеевич Прохоров, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой ЭУТ в 1965–1970 гг.



Рис. 16. Александр Владимирович Харитонов, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой ЭУТ в 1970–1991 гг.

велько). Были разработаны новые приборы УЗИС-ЛЭТИ [70], УЗИС-ГЭТУ [71], измеритель скорости и затухания звука «Фонон» [72].

Исследования распространения и затухания ультразвуковых волн в кристаллах, выполненные на кафедре, открыли перспективы их применения для микродефектоскопии кристаллической решетки, в частности дислокаций [73–75]. Глубокий интерес, проявляемый к этим вопросам,

объясняется тем, что от дислокаций и наличия примесных атомов зависят прочностные характеристики материалов. На основании этих исследований удалось разработать прибор УЗПЧ для контроля чистоты сверхчистого алюминия, полученного зонной плавкой (Е.К. Гусева, Л.А. Яковлев, рис. 18) [76, 77], разработать метод и аппаратуру для контроля ферритовых пластин (Е.К. Гусева, С.В. Титов) [78, 79].

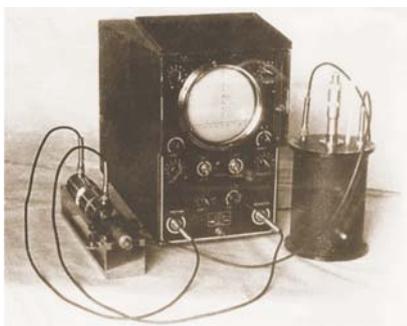


Рис. 17. Ультразвуковой измеритель скорости упругих волн типа УЗИС

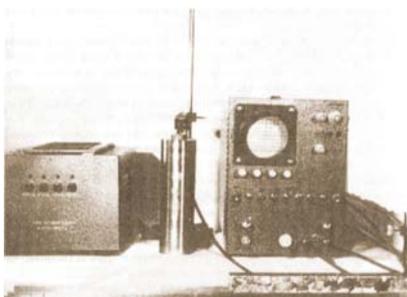


Рис. 18. Аппаратура для контроля механических свойств «сверхчистого» алюминия

В 1970 г. кафедру возглавил А.В. Харитонов, еще один ученик С.Я. Соколова. С середины 70-х до конца 80-х гг. 20-го века особенно бурное развитие получило научное направление, связанное с акустической голографией. Принимали участие в этих событиях и сотрудники кафедры ЭУТ, выполнявшие масштабную для формата страны научно-исследовательскую работу под шифром «Зона», в ходе которой научные сотрудники и преподаватели выезжали в многочисленные и длительные командировки, посетив практически все отечественные морские театры.

Следует особо отметить, что масштабные политические и экономические преобразования, происшедшие в стране в начале 90-х гг. прошлого столетия, не могли не отразиться на работе как СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в целом, так и его отдельных подразделений – кафедр, отделов и т.п.

Коренные изменения условий финансирования учебной и научной деятельности университета заострили кадровую проблему. По разным причинам за непродолжительный период кафедру покинул ряд высококвалифицированных специалистов: В.Е. Артемов, А.Н. Костюк, А.В. Осетров, В.В. Долганов, А.А. Перрен, В.И. Сенчук, Л.А. Никифоров, Н.Н. Егоров, К.Э. Тоом, С.В. Титов, Е.К. Гусева (Кирсанова) и др. Ушли из жизни опытные сотрудники: А.В. Харитонов, А.С. Голубев, Д.Б. Дианов, В.М. Веревкин. С 1991 г. кафедру возглавил доцент, канд. техн. наук С.К. Паврос (рис. 19), на плечи которого пришлось самые трудные и тяжелые годы деятельности кафедры в рамках осуществляемых преобразований.

Происходящие изменения потребовали новых подходов к организации и построению научных исследований, поиску новых заказчиков. В частности, выяснилось, что разработка и изготовление в ЛЭТИ таких высокотехнологичных и сложных устройств, как многоканальные промышленные дефектоскопы, даже с привлечением сторонних подрядчиков, является экономически неэффективным, что вынудило свернуть подобные работы как самостоятельные и переключиться на участие в них в качестве соисполнителей и консультантов. Такие изменения существенно ограничили финансовые возможности кафедры в целом и затруднили ее обновление за счет приобретения новой аппаратуры.

Однако оставшиеся в составе кафедры научно-педагогические работники продолжили исследования и проектные работы в направлении ультразвуковой дефектоскопии. Одним из таких пионерских, масштабных проектов явилось участие сотрудников кафедры в середине 90-х гг. в создании нового средства контроля ма-



Рис. 19. Сергей Константинович Паврос, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ЭУТ в 1991 – 2006 гг.



Рис. 20. Константин Евгеньевич Аббакумов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ЭУТ в 2007 – по настоящее время

гистральных нефтепроводов – дефектоскопа-снаряда [80]. Участие в подобном проекте позволило не только сохранить коллектив кафедры в трудный период, но и приобрести новый опыт в создании образцов передовой техники, разработку которой за рубежом вели самые высокотехнологичные предприятия таких стран, как Япония, Канада и др.

Как правило, в состав подобного устройства входили: секция



Рис. 21. Установка с ЭМАП для контроля листового проката («Ниппон стил», Япония)

ультразвукового контроля, секция магнитного контроля, навигационная секция и секция электропитания. Шарнирно соединенные между собой последовательно друг за другом эти секции при диаметре трубы 1400 мм образовывали внушительную конструкцию длиной в 10–12 м, которая вместе с потоком перекачиваемой жидкости перемещалась от одной перекачивающей станции до другой на расстояние 200–300 км. На этих станциях с помощью запасов очного устройства из запоминающего устройства вся служебная информация извлекалась и передавалась на служебный компьютер для расшифровки и обработки с помощью специального программного обеспечения. Полученные в процессе исследований наработки были использованы в дальнейшем при создании систем внутритрубной дефектоскопии систем водоснабжения городского водохозяйства [81].

В 2007 г., после ухода из жизни С.К. Павроса, кафедрой возглавил профессор, д-р техн. наук К.Е. Аббакумов (рис. 20).

Как известно, многие недостатки многоканальных дефектоскопических систем с иммерсионным способом создания акустического контакта связаны с необходимостью применения крупногабаритной «иммерсионной ванны», в которую должен погружаться контролируемый лист. Это связано с тем, что габариты ванны не всегда позволяют вписать это оборудование в пространство действующего металлургического цеха. Одновременно с этим возникают потери времени, связанные погрузкой и выгрузкой листа из ванны. Проблема решается переходом от пьезоэлектрических датчиков к бесконтактным, электромагнитно-акустическим, излучение и прием ультразвука с помощью которых не нуждаются в наличии переходных сред [82]. Принципиальным отличием установок с бесконтактными датчиками является возможность контроля листов с температурой поверхности до 650 °С [82]. При технической поддержке сотрудников кафедры специалисты организации «Нординкрафт»



Рис. 22. Лабораторный макет толщиномера с ЭМАП

(а впоследствии «Ультракraft» (г. Череповец, Вологодская обл.) разработали целую серию установок для контроля листового проката типа «Север» (рис. 21) [82], одна из которых была внедрена в листопрокатном цехе на Ижорских заводах (г. Колпино, Ленинградская обл.). Кроме отечественных металлургических заводов, многоканальные дефектоскопы такого типа поставлялись за рубеж в страны Азии и Японию. Помимо чисто дефектоскопических задач с помощью подобных установок решалась и задача определения физико-механических характеристик металлов, что оказалось возможным также благодаря особенностям работы бесконтактных датчиков [82]. Для обеспечения условий повышения параметров контроля были решены также несколько теоретических задач, связанных с особенностями расчетов электроакустических трактов установок с бесконтактными датчиками, что позволило перейти к более рациональному конструированию акустических систем многоканальных установок (рис. 22) [82]. По указанным вопросам А.В. Кириковым была защищена кандидатская диссертация. Творческое сотрудничество со специалистами АО «Ультракraft» (генеральный директор В.А. Бритвин) продолжается и по настоящее время в направлении исследования сверхдальнего распространения крутильных волн в однородных и композиционных металлических волноводах и разработкой новых типов преобразователей для дефектоскопии цилиндрических изделий [83].

Другая актуальная область теоретических исследований связана с изучением влияния граничных условий в приближении «линейного скольжения» на характеристики волновых процессов в сложноструктурированных средах [84–88]. Кандидатские диссертации при выполнении исследований в данном и смежных направлениях защитили: С.В. Ромашкин, С.В. Реука, А.В. Теплякова, Р.С. Коновалов, А.В. Курков, К.С. Паврос.

Работы в направлении акустоэлектроники связаны с деятельностью научной группы, возглавляе-

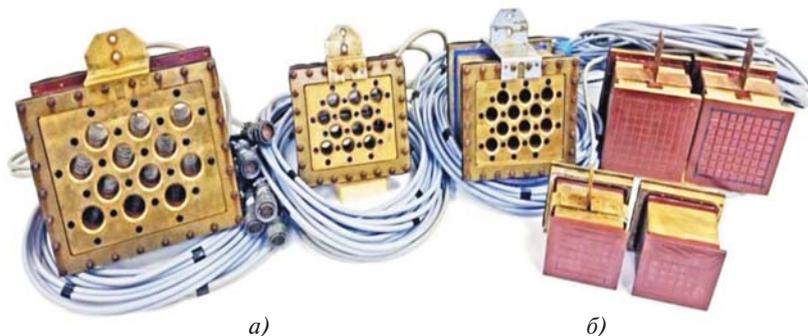


Рис. 23. Макеты гидроакустических антенн, составленных из широкополосных ПВТ (а) и ПАВФ (б)

мой доцентом, канд. техн. наук М.М. Шевелько [89]. Усилиями сотрудников группы разработаны макеты малогабаритных измерителей параметров вращения, использующих чувствительные элементы на поверхностных и объемных волнах [89]. Такое оригинальное исполнение акустоэлектронных компонентов делает их чрезвычайно перспективными при построении малогабаритных виброустойчивых гироскопических систем [89]. Кандидатские диссертации по данному направлению защитили Е.С. Попкова, А.И. Лутовинов. Подготовлены материалы для защиты диссертации аспиранткой Я. Дурукан.

В рабочей группе гидроакустического профиля под руководством доцента, канд. техн. наук Б.Г. Степанова продолжаются исследования по созданию высокоэнергетических сверхширокополосных электроакустических преобразователей [90]. Так, при выполнении одной из работ, заказчиками которой выступали организации РАН и СПбГУ, направленной на моделирование устройств, способных воспроизводить сигналы информационного обмена между морскими млекопитающими (дельфинами, китообразными и др.), были не только разработаны новые конструкции пьезоэлектриче-

ских датчиков волноводного типа (ПВТ) и стержневого типа с фазированным возбуждением (ПАВФ) (рис. 23) [91], но и существенно улучшена лабораторная база кафедры. Был построен и оформлен «акустически» новый измерительный гидроакустический бассейн. Процедуры измерений в нем актуальных характеристик исследуемых подводных антенн полностью автоматизированы и управляются программным способом с помощью персонального компьютера [90]. На основе материалов данного исследования аспирант И.С. Пестерев защитил в 2021 г. кандидатскую диссертацию [91]. Подготовлены материалы для защиты докторской диссертации Б.Г. Степановым.

Профессором, д-ром техн. наук В.М. Цаплевым на кафедре продолжены исследования в области нелинейных методов акустического контроля и измерений [92, 93]. На основании результатов этих исследований были разработаны учебные курсы для подготовки магистров и аспирантов. Значительные результаты получены его сотрудниками при проектировании малогабаритных пьезоэлектрических возобновляемых источников электрической энергии [94]. В области нелинейной акустики для решения гидроакустических задач также ведут-



Рис. 24. Награды кафедры ЭУТ и издания научной и научно-методической литературы, подготовленные сотрудниками кафедры ЭУТ

ся исследования под руководством профессора, д-ра техн. наук Д.Б. Островского [95].

Профессором, д-ром техн. наук С.В. Попковым в содружестве со специалистами Крыловского научного центра ведутся работы по созданию новых поколений средств виброизмерений и виброзащиты [96].

В 2018 г. в ознаменование 90-летия ультразвуковой дефектоскопии коллектив кафедры был награжден почетной грамотой РОНКТД [97].

За рассматриваемый период докторские диссертации защитили: Е.К. Кирсанова (Гусева), С.К. Паврос, А.В. Осетров, К.Е. Аббакумов., С.В. Попков, Е.Л. Шейнман. Всего сотрудниками кафедры получено несколько десятков авторских свидетельств, написано несколько десятков монографий, подготовлено несколько сотен научных статей и докладов (рис. 24). Всего подготовлено более 5000 высококвалифицированных специалистов, бакалавров, магистров [98].

В настоящее время коллектив кафедры продолжает успешно работать над исследованиями и разработкой методов и средств ультразвукового контроля материалов и изделий и акустических измерений.

В учебном процессе заняты: профессора К.Е. Аббакумов, В.С. Давыдов, Д.Б. Островский, С.В. Попков, Е.Л. Шейнман, доценты Д.Д. Добротин, Р.С. Коновалов, С.И. Коновалов, А.А. Вьюгинова, Б.Г. Степанов, А.Н. Перегудов, А.В. Теплякова, Е.С. Попкова, М.М. Шевелько, старший преподаватель К.С. Паврос, ассистенты Н.А. Зайцева, Я. Дурукан, И.Г. Сидоренко и учебно-вспомогательный персонал – зав. лаб. С.В. Баташова, А.Н. Максимов, А.Ф. Рыжков, Р.Г. Львов, И.И. Каземирова.

## Библиографический список

1. Пат. СССР № 11371. Способ и устройство для испытаний металлов / С.Я. Соколов. Опубл. 30.09.1929. Вест. Комитета по делам изобретений № 6.
2. Sokoloff S. Zur Frage der Fortpflanzung ultra-akustischer Schwingungen in verschiedenem Körper // *Electron. Techn.* 1929. Bd. 6, N. 11. S. 450–460.
3. Соколов С.Я. Избранные труды / СПбГЭТУ. СПб., 1997.
4. Паврос С.К. Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // *Изв. ГЭТУ.* 1997. Вып. 505. С. 5–11.
5. Соколов С.Я. Ультразвуковые колебания и их применение // *Заводская лаборатория.* 1935. № 5. С. 527–538.
6. Пигулевский Е.Д. О чувствительности и разрешающей способности акустооптического преобразователя на поверхности жидкости // *Акуст. журн.* 1958. Т. 4, № 4. С. 348–354.
7. Прохоров В.Г. Электронно-акустический преобразователь // *Акуст. журн.* 1957. Т. 3, № 3. С. 348–354.
8. Пономарев П.В. Опытная установка для видения ультразвукового поля // *Изв. ЛЭТИ.* 1958. Вып. 34. С. 224–228.
9. Уэйд Г. Системы акустического изображения / под ред. В.Г. Прохорова. Л.: Судостроение, 1981.
10. Качанов Е.И., Пигулевский Е.Д., Ярыгин Е.М. Методы и средства гидроакустической голографии. Л.: Судостроение, 1989.
11. Осетров А.В. Акустическая томография // *Зарубежная радиоэлектроника.* 1991. № 5. С. 3–29.
12. Долганов В.В., Осетров А.В. Использование нелинейного нормирования в методах синтезированной апертуры при реконструкции ультразвуковых изображений // *Дефектоскопия.* 1995. № 8. С. 13–23.
13. Белов Б.М., Осетров А.В., Яковлев В.А. Идентификация дефектов путем анализа и реконструкции ультразвуковых изображений // *Сб. докл. XVII Петербургской конференции «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» УЗДМ-2001, Санкт-Петербург, 6–8 июня 2001 г. СПб., 2001. С. 14–18.*
14. Машарский Б.Н. Исследование однородности изделий из спечсплавов ультразвуковым методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1953. 24 с.
15. Меркулов Л.Г. Исследование рассеяния ультразвука в металлах // *ЖТФ.* 1956. Т. 26. С. 64–75.
16. Меркулов Л.Г. Поглощение и диффузное рассеяние ультразвука в металлах // *ЖТФ.* 1957. Т. 27. С. 1045–1050.
17. Меркулов Л.Г. Применение ультразвука для исследования структуры сталей // *ЖТФ.* 1957. Т. 27. С. 1386–1391.
18. Евдокимов Н.А. Исследование пьезоэлектрических кварцевых излучателей ультразвука: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1952. 22 с.
19. Дианов Д.Б. О работе плоского пьезовибратора в условиях одностороннего излучения // *Изв. ЛЭТИ.* 1957. Вып. 31. С. 46–59.
20. Пономарев П.В. Переходные процессы в пьезовибраторах // *Акуст. журн.* 1957. Т. 27, № 3. С. 243–253.
21. Меркулов Л.Г., Яблоник Л.М. Работа демпфированного пьезопреобразователя при наличии нескольких промежуточных слоев // *Акуст. журн.* 1963. Т. 9, № 4. С. 449–453.
22. Меркулов Л.Г., Яблоник Л.М. Теория акустически согласованного многослойного пьезопреобразователя // *Дефектоскопия.* 1966. № 5. С. 3–11.
23. Голубев А.С., Иванов В.Е., Сафонов В.И. О влиянии электрической нагрузки на частотную характеристику искателя ультразвукового дефектоскопа // *Дефектоскопия.* 1966. № 5. С. 40–46.
24. Яковлев Л.А. О возможности построения приближенно согласованного пьезокерамического преобразователя // *Изв. ЛЭТИ.* 1970. Вып. 89. С. 163–167.
25. Меркулов Л.Г., Федоров В.А., Яковлев Л.А. Работа пьезопреобразователя, нагруженного на твердую упруго-анизотропную среду // *Акуст. журн.* 1973. Т. 9, № 1. С. 53–59.
26. Евдокимов Н.А., Касаткин Б.А., Мельканович А.Ф. Импульсный режим работы пьезовибратора // *Дефектоскопия.* 1969. № 6. С. 31–38.
27. Евдокимов Н.А., Касаткин Б.А., Мельканович А.Ф. Исследование импульсного возбуждения пьезовибратора при иммерсионном способе контроля // *Дефектоскопия.* 1969. № 5. С. 36–40.
28. Евдокимов Н. А., Касаткин Б. А., Мельканович А.Ф. Работа пьезовибратора через промежуточный слой в

- импульсном режиме // Дефектоскопия. 1971. № 5. С. 80–86.
29. Яковлев Л.А. Работы кафедры ЭУТ в области высокочастотных пластинчатых преобразователей // Изв. ЛЭТИ. 1997. Вып. 505. С. 54–65.
  30. Дианов Д.Б. Некоторые вопросы ультразвуковой оптики: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1956. 18 с.
  31. Дианов Д.Б. Исследование направленности призматических преобразователей // Дефектоскопия. 1965. № 1. С. 3–22.
  32. А.с. № 107832 СССР. Призматический шуп к ультразвуковому дефектоскопу / И.Ф. Лопатко, Д.Б. Дианов (СССР). Опул. 12.09.57, Бюл. № 10.
  33. Лопатко И.Ф. Ультразвуковой импульсный толщиномер и прибор для измерения скорости ультразвука в образцах малых размеров / Московский дом науч.-техн. пропаганды. М., 1957.
  34. Паврос С.К., Пряхин Е.Г., Ромашкин С.В., Рыжков А.Ф. Ультразвуковой многоканальный внутритрубный толщиномер // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2003. № 2. С. 29–32.
  35. А.с. № 58423 СССР. Устройство для обнаружения и регистрации скрытых дефектов в металлических изделиях / С.Я. Соколов (СССР). Опул. 16.10.40. Вест. Комитета по делам изобретений № 11.
  36. Корепин Е.А., Качнельсон Г.М. Ультразвуковой контроль внутренних дефектов в толстых листах // Заводская лаборатория. 1953. № 10. С. 1172–1177.
  37. Вережкин В.М., Жарков К.В. Ультразвуковой иммерсионный дефектоскоп-автомат // Заводская лаборатория. 1956. № 5. С. 3–7.
  38. А.с. № 133667 СССР. Устройство для ультразвуковой дефектоскопии листовых материалов / Л.Г. Меркулов, В.М. Вережкин, Н.А. Евдокимов, К.В. Жарков (СССР). Опул. 27.04.59, Бюл. № 7.
  39. Вережкин В.М., Паврос С.К. Развитие ультразвуковых методов и средств автоматизированного контроля толстолистового проката // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 505. С. 11–31.
  40. А.с. № 216354 СССР. Способ ультразвукового обнаружения дефектов в изделиях / В.М. Вережкин, Н.А. Евдокимов (СССР). Опул. 19.05.68, Бюл. № 14.
  41. А.с. № 1355925 СССР. Способ ультразвуковой дефектоскопии / А.С. Голубев, С.К. Паврос, А.В. Топунов. Опул. 25.11.87, Бюл. № 44.
  42. Вережкин В.М. Высокоэффективный ультразвуковой контроль листового проката для машиностроения и судостроения // В мире неразрушающего контроля. 1999. № 4. С. 18–21.
  43. Паврос С.К., Пряхин Е.Г., Ромашко Р.В. и др. Результаты опытной эксплуатации установки УЗУП-М2 для ультразвукового контроля толстолистового проката на ОАО «Ижорские заводы» // Сб. докл. XVII Петербургской конф. «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» УЗДМ-2001, Санкт-Петербург, 6–8 июня 2001 г. СПб., 2001. С. 153–157.
  44. Дианов Д.Б., Жарков К.В. Возбуждение нормальных волн в пластинах методом наклонно падающего звукового пучка // Акуст. журн. 1964. Т. 13, № 5. С. 761–765.
  45. Дианов Д.Б., Серебренникова Н.П. К вопросу возбуждения рэлеевских волн с помощью призматического преобразователя // Дефектоскопия. 1965. № 2. С. 22–27.
  46. Жарков К.В., Меркулов Л.Г., Пигулевский Е.Д. Затухание нормальных волн в пластине со свободными границами // Акуст. журн. 1964. Т. 10, № 2. С. 163–166.
  47. Меркулов Л.Г. Затухание нормальных волн в пластинах, находящихся в жидкости // Акуст. журн. 1964. Т. 10, № 2. С. 206–212.
  48. Касаткин Б.А. Расчет ультразвукового поля в стержне при осесимметричном возбуждении // Дефектоскопия. 1966. № 4. С. 3–9.
  49. Касаткин Б.А. Антисимметричные колебания бесконечного стержня // Дефектоскопия. 1966. № 4. С. 9–15.
  50. Меркулов Л.Г., Вережкин Л.В. Задачи ультразвуковой дефектоскопии труб // Изв. ЛЭТИ. 1967. Вып. 5–6. С. 50–53.
  51. Вережкин Л.В., Меркулов Л.Г. Фазовые скорости ультразвуковых волн, распространяющихся по окружности трубы // Дефектоскопия. 1967. № 5. С. 39–46.
  52. Жарков К.В. Дисперсионное уравнение интерференционных волн в двухслойной пластине // Изв. ЛЭТИ. 1971. Вып. 95. С. 38–45.
  53. Жарков К.В. Групповые скорости сдвиговых нормальных волн в двухслойной пластине // Изв. ЛЭТИ. 1987. Вып. 385. С. 72–75.
  54. Меркулов Л.Г., Рохлин С.И. Дифракция волн Лэмба в пластине на полубесконечном разрезе // Дефектоскопия. 1969. № 4. С. 24–36.
  55. Меркулов Л.Г., Рохлин С.И. Прохождение волн Лэмба через участок с расслоением // Дефектоскопия. 1970. № 3. С. 19–22.
  56. Никифоров Л.А. Исследование возбуждения и приема волн Рэля и Лэмба клиновыми преобразователями: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / ЛЭТИ. Л., 1971. 20 с.
  57. Пашутин А.В. Исследование и разработка электромагнитно-акустических преобразователей с периодическим магнитным полем: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1976. 21 с.
  58. Балабаев С.М. Исследование импульсного режима работы клиновых преобразователей для волн Рэля и Лэмба: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1976. 18 с.
  59. Егоров Н.Н. Исследование дифракции нормальных волн на неоднородностях пластины и характеристик электроакустических трактов ультразвуковых дефектоскопов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1978. 22 с.
  60. Ильин В.В. Исследование электромагнитно-акустического метода возбуждения и приема волн Рэля в ферромагнетиках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1979. 19 с.
  61. А.с. № 380364 СССР. Электромагнитно-акустический преобразователь / А.В. Пашутин, А.В. Харитонов (СССР). Опул. 13.05.73, Бюл. № 21.
  62. Харитонов А.В. Возбуждение, прием и рассеяние ультразвуковых нормальных волн в пластинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Акустический ин-т. Л., 1982. 18 с.
  63. Егоров Н.Н., Никифоров Л.А. Развитие теории и техники поверхностных и нормальных волн // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 505. С. 32–43.
  64. Александров К.С., Носиков О.В. Прибор для измерения упругих модулей кристаллов // Акуст. журн. 1956. № 2. С. 244–247.

65. **Бабиков О.И.** Импульсные ультразвуковые методы исследования физико-химических процессов // Заводская лаборатория. 1953. № 7. С. 811–814.
66. **Бабиков О.И.** Ультразвук и его применение в промышленности. М.: Физматлит, 1958.
67. **Иванов В.Е., Меркулов Л.Г., Шукин В.А.** Метод прецизионного измерения скорости ультразвуковых волн в твердых телах // Ультразвуковая техника. 1965. Вып. 2. С. 3–12.
68. **Иванов В.Е.** Разработка прецизионных методов измерения скорости распространения ультразвука в твердых телах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1970. 20 с.
69. **Шукин В.А., Яковлев Л.А.** Влияние контактирующих слоев на точность измерения ультразвука в твердых телах // Акуст. журн. 1963. № 9. С. 3.
70. **Яковлев Л.А., Шевелько М.М., Несмашная О.М.** Ультразвуковой прибор для определения характеристики пьезокерамики // Дефектоскопия. 1979. № 5. С. 70–74.
71. **А.с. № 1442838 СССР.** Устройство для измерения скорости звука в материалах / С.К. Паврос, М.М. Шевелько, Л.А. Яковлев, А.Н. Ленков (СССР). Опубл. 22.10.88, Бюл. № 45.
72. **Иванов В.Е., Меркулов Л.Г.** Прибор «Фонон-1» для прецизионных измерений скоростей распространения ультразвуковых волн в твердых телах // Тр. Всесоюз. конф. по вопросам ультразвуковой спектроскопии, Каунас, 24–26 июня 1969 г. Каунас, 1969. С. 56–57.
73. **Меркулов Л.Г., Яковлев Л.А.** Ультразвуковые исследования деформированных кристаллов NaCl // Акуст. журн. 1960. Т. 6, № 2. С. 244–251.
74. **Яковлев Л.А.** Исследование частотной и амплитудной зависимостей дислокационного поглощения ультразвука в алюминии // Акуст. журн. 1965. Т. 11, Вып. 2. С. 239–242.
75. **Гусева Е.К.** Зависящее от времени поглощение ультразвука // Акуст. журн. 1966. Т. 12, № 2. С. 185–187.
76. **Пат. Франции № 1457437 G01n.** Procédé de dosage des impuretés dans les matériaux cristallins et dispositif pure ou mise ou acure / Л.Г. Меркулов, Е.К. Гусева, Л.А. Яковлев // Bulletin officiel de la Propriété industrielle. 1966. No. 45.
77. **Меркулов Л.Г., Яковлев Л.А., Гусева Е.К.** Новый способ ультразвукового контроля чистоты слитков, очищенных зонной плавкой // Производство алюминия. Вып. 71. М.: Металлургия, 1970. С. 128–134.
78. **Гусева Е.К., Титов С.В., Тоом К.Э.** Автоматизированная ультразвуковая установка для контроля ферритовых пластин // Дефектоскопия. 1990. № 12. С. 25–27.
79. **Титов С.В.** Разработка акустических методов исследования и контроля ферритов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1988. 22 с.
80. **Аббакумов К.Е., Добротин Д.Д., Мамистов С.В. и др.** Ультразвуковая секция дефектоскопа – снаряда для контроля магистральных трубопроводов // Тез. докл. XIV науч.-техн. конф. по ультразвуковому контролю сварных металлоконструкций, Санкт-Петербург, 30 мая–2 июня 1992 г. СПб., 1992. С. 80–81.
81. **Аббакумов К.Е., Добротин Д.Д., Паврос С.К. и др.** Исследование способов и разработка аппаратуры измерения толщины стенки трубы нефтепровода со стороны внутренней поверхности // Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций – 95: Сб. тр. 15-й Петербургск. конф. Репино, 12–14 сентября 1995 г. СПб., 1995. С. 82–83.
82. **Аббакумов К.Е., Добротин Д.Д.** Многоканальные ультразвуковые дефектоскопы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 446 с.
83. **Аббакумов К.Е., Степаненко Н.В.** Распространение крутильных волн в двухслойной трубе // Тр. XIV Всерос. науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства». Ижевск, 12–14 дек. 2018 г. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2018. С. 98–104.
84. **Аббакумов К.Е.** Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред // Дефектоскопия. 2017. Вып. 7. С. 3–13
85. **Abbakumov K.E.** Influence of non-rigid connection on the scattering properties of a cylindrical inclusion // Proc. of the IV Intern. Forum «Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2018», December 12–14, 2018, Izhevsk, Russia. Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2018. P. 6–10.
86. **Аббакумов К.Е., Вагин А.В.** Волновые процессы в мелкослоистой среде // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 8. С. 87–90.
87. **Аббакумов К.Е., Вагин А.В.** Дисперсионное уравнение для продольной волны в слоистой среде с неоднородными граничными условиями при различных направлениях распространения // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 7–13.
88. **Аббакумов К.Е., Цаплев В.М.** Волновые задачи акустических методов неразрушающего контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 336 с.
89. **Дурукан Я., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** Эффекты объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 2. С. 17–26.
90. **Степанов Б.Г.** Пьезоэлектрические преобразователи волноводного типа. Задачи анализа и синтеза. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 180 с.
91. **Степанов Б.Г., Пестерев И.С., Сосновский Н.Н.** Излучение преобразователя волноводного типа в соносные с ним конусные полупространства // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. С. 70–82.
92. **Koynalov S., Koynalov R., Tsaplev V., Nikolaev S.** Impregnation of Porous Constructions and Natural Materials Using Ultrasound // International Journal of Geomate. 2020. V.18, Is. 69. P. 104–110.
93. **Цаплев В.М.** Нелинейная акустоупругость пьезокерамических материалов. Часть II. Акустические методы измерений. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
94. **Цаплев В.М., Аббакумов К.Е., Коновалов Р.С.** Нелинейные пьезокерамические материалы и малогабаритные генераторы энергии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 215 с.
95. **Островский Д.Б.** Введение в нелинейную гидроакустику: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2020. 140 с.
96. **Попков С.В.** Колебания и излучение сферических и полисферических конструкций. СПб.: Изд-во ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2020. 192 с.
97. **Аббакумов К.Е.** К 90-летию ультразвуковой дефектоскопии. Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // Территория NDT. 2018. № 3. С. 10–19.
98. **Выпускники** кафедры электроакустики и ультразвуковой техники 1931 – 2021 гг. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 228 с.