

6  
14-43  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
— ЦНИИТМАШ —

Инженер С. А. ФИЛИМОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО  
ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО  
ТОЛЩИНОМЕРА И РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК  
КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ В МЕСТАХ ГИБОВ

260 — приборы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 1969

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

— ЦНИИТМАШ —

Инженер С. А. ФИЛИМОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО  
ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО  
ТОЛЩИНОМЕРА И РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК  
КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ В МЕСТАХ ГИБОВ

260 — приборы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 1969

## ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из важнейших современных технических проблем является повышение надежности и долговечности энергетического оборудования, эксплуатируемого при повышенных температурах и высоких давлениях. Успешное решение этой проблемы связано с применением стопроцентного неразрушающего контроля деталей и узлов энергетических агрегатов.

Неразрушающие методы контроля получают широкое распространение, становясь необходимым и равноправным звеном технологического цикла. В частности, важное значение приобретает неразрушающий контроль толщины стенок труб котлов и других изделий ответственного назначения.

Современные котлы мощных энергоблоков представляют собой конструкции, состоящие в основном из участков прямых и изогнутых труб. Изогнутые участки труб изготавливают на котлозаводах из стандартных прямых труб на гибочных машинах. При этом происходит уменьшение толщины стенки трубы с наружной (внешней) частигиба там, где участок трубы подвергается растягивающим усилиям. Указанное утонение стенки трубы на наружном участкегиба может превысить допустимые нормы, несоблюдение которых снижает надежность котлоагрегата и может привести к аварии, выводящей из строя весь энергоблок. Поэтому в практике котлостроения проблема контроля толщины стенки труб в местахгибов является весьма актуальной.

Для контролягибов котельных труб наиболее подходят ультразвуковые методы, поскольку они обеспечивают высокую точность и оперативность измерения и позволяют проверять трубы как из ферромагнитных (перлитных), так и неферромагнитных (аустенитных) сталей. Особенностью труб в местахгибов является наличие кривизны и клинообразности в осевом и азимутальном сечениях, что вызывает значительные трудности при контроле. Искатель ультразвукового прибора соприкасается с выпуклым участкомгиба трубы по малой площади («точечный контакт»). Вследствие этого акустиче-

ская связь между поверхностью трубы и искателем является слабой. Все это вызывает необходимость применения ультразвуковой аппаратуры с повышенной чувствительностью.

Из существующих ультразвуковых методов контроля для измерения толщины стенок котельных труб в местах гибов наиболее перспективен резонансный метод.

Применение контактного варианта резонансного метода дает возможность обеспечить необходимую точность и локальность измерений. Но существующие отечественные и зарубежные резонансные толщиномеры типа В4-8Р, УРТ-6, ТУК-3, Visigauge и другие не обладают достаточной чувствительностью для проведения измерений толщины стенок котельных труб в местах гибов. Кроме того, существенным недостатком эксплуатируемых ультразвуковых резонансных толщиномеров является наличие таких систем отсчета толщины, которые требуют выполнения оператором ряда манипуляций или проведения перед началом измерений сложной настройки.

Расширение возможностей ультразвукового резонансного метода и совершенствование аппаратуры затрудняется недостаточной проработкой ряда теоретических и практических вопросов. Существенный вклад в развитие теории и практики резонансного метода контроля внесли советские и зарубежные исследователи: Д. С. Шрайбер, Ю. В. Ланге, И. Н. Ермолов, М. Ф. Краковяк, В. С. Гребенник, В. С. Эрвин, Г. М. Расвейлер, Е. Г. Кук, Х. Е. Ван-Валькенбург, Р. В. Харрис и другие. Наибольшие успехи в развитии теории были достигнуты в работах ЦНИИТМАШ, где была сформулирована и решена в общем виде задача электроакустического тракта резонансного толщиномера. Однако практическое использование полученных зависимостей осложнялось серьезными математическими трудностями, поэтому результаты исследования могли быть применены лишь для решения наиболее простых задач и не позволяли производить анализ практически важных случаев.

В соответствии с изложенным при выполнении данной работы были выдвинуты и решены следующие задачи:

1. Исследование электроакустического тракта резонансного толщиномера со сложной акустической нагрузкой и разработка методики его расчета на основе применения электронно-вычислительной техники.

2. Исследование влияния параметров электроакустического тракта на чувствительность и точность толщиномера.

3. Разработка системы прямого отсчета толщины, не требующей дополнительных манипуляций, кроме установки искателя на контролируемый участок трубы.

4. Создание на основе теоретических и экспериментальных исследований опытного образца прибора, обеспечивающего измерение толщины стенок котельных труб в местах гибов.

Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе приведен критический обзор существующей аппаратуры и теоретических работ. Последующие главы посвящены решению поставленных выше задач.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО ТОЛЩИНОМЕРА

Ультразвуковой резонансный толщиномер, как и другие ультразвуковые дефектоскопические приборы, состоит из электронной и акустической частей. К акустической части прибора относится искатель, состоящий в общем случае из демпфера, пьезопластины и протектора. Искатель связан через слой контактной жидкости с контролируемым изделием. Величина акустической связи зависит от акустических свойств и толщины контактного слоя и от площади соприкосновения искателя с контролируемым изделием. Искатель, контактный слой и контролируемое изделие образуют акустический тракт ультразвукового резонансного толщиномера\*.

Резонансный метод контроля основывается на возбуждении в акустическом тракте ультразвуковых колебаний и регистрации в нем на определенных (резонансных) частотах резонансных явлений. В этом случае акустический тракт представляет собой акустическую колебательную систему. Чем сильнее выражены резонансные явления в акустическом тракте прибора, тем их легче обнаружить и проще обработать полученную информацию. При малой интенсивности резонансных явлений требуется более высокая чувствительность электронной части прибора, чтобы получить необходимый уровень несущих полезную информацию сигналов для проведения отсчета толщины. При этом уровень этих сигналов должен превышать уровень помех различного происхождения.

Акустический тракт ультразвукового резонансного прибора представляет собой в простейшем случае колебательную систему из трех плоскопараллельных слоев: пьезопластина — контактный слой — контролируемый слой. При контроле труб в местах гибов акустический тракт усложняется, так как в этом случае следует учитывать кривизну и клинообразность контролируемого участка. Однако ряд наблюдающихся явлений в этих двух случаях имеет общий характер. Это дает основание в первом приближении исследовать акустический

\*В некоторых работах этот участок называется электроакустическим трактом.

тракта проводить в упрощенном виде, рассматривая систему плоскопараллельных слоев, что значительно облегчает задачу.

Основным узлом современного ультразвукового резонансного прибора является автогенератор качающейся частоты, в колебательный контур которого включен пьезопреобразователь, возбуждающий ультразвуковые колебания и фиксирующий резонансы в акустической колебательной системе. Автогенераторы качающейся частоты выполняются по различным схемам: транзитронной (УРТ-6), с индуктивной обратной связью (Visigauge) и др. Электронную лампу автогенератора можно рассматривать как некоторую комплексную проводимость, активная часть которой в режиме генерации является отрицательной. Поэтому для удобства анализа любую схему автогенератора можно свести к обобщенной эквивалентной схеме с отрицательной проводимостью. Входящий в эту схему пьезопреобразователь (пьезопластина) акустически несимметрично нагружен с обеих сторон и работает в режиме излучения. В этом случае пьезопреобразователь потребляет электрическую энергию, являясь пассивным элементом в эквивалентной электрической схеме, и представляется в виде проводимости  $Y_n$ . Такую схему можно рассматривать в первом приближении как линейную и применять к ней методы расчета линейных цепей.

Для нахождения выражения для проводимости  $Y_n$  в работе применен метод Н. Н. Андреева по расчету пьезопреобразователей при любых акустических нагрузках в сочетании со способом Л. М. Бреховских последовательного нахождения входного импеданса акустической системы с любым числом пассивных слоев. Использование такого сочетания позволяет рассчитывать многослойные акустические системы с активным слоем (пьезопластина) при учете затухания в системе.

Исходя из граничных условий и уравнений пьезоэффекта в одномерном приближении, получено общее выражение для проводимости пьезопреобразователя  $Y_n$  (из различных пьезоматериалов) при любых акустических нагрузках с учетом частотнозависимого затухания

$$Y_n = i\omega C_n + \frac{e^2 S}{Z_1 l_1^2} \frac{F}{1 + ig_1 F}, \quad (1)$$

где

$$F = \frac{2(\operatorname{ch} \psi_1 - 1) + (\zeta_1 + \zeta_2) \operatorname{sh} \psi_1}{(\zeta_1 + \zeta_2) \operatorname{ch} \psi_1 + (1 + \zeta_1 \zeta_2) \operatorname{sh} \psi_1};$$

$$g_1 = \frac{e^2 S}{Z_1 l_1 \omega C_n}, \quad \psi_1 = (\beta_1 + iq_1) l_1.$$

Здесь  $\omega$  — круговая частота;  $\beta_1, C_n, S, Z_1, l_1, q_1$  — соответ-

ственно частотнозависимый коэффициент затухания в пьезоматериале, физическая емкость, площадь, акустическое сопротивление, толщина и волновое число пьезопластины,  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  — нормированные, т. е. отнесенные к акустическому сопротивлению пьезопластины  $Z_1$ , удельные акустические импедансы.

Первое слагаемое в выражении (1) представляет собой проводимость, обусловленную физической емкостью пьезопластины  $C_n$ . Второе слагаемое — проводимость, обусловленную пьезоэффектом. Оба слагаемых являются комплексными величинами. Проводимость, обусловленную пьезоэффектом, можно разложить на активную и реактивную составляющие. Реактивная проводимость изменяется по знаку и величине в зависимости от частоты, т. е. имеет емкостной или индуктивный характер. Она складывается с другими реактивными проводимостями колебательного контура и оказывает влияние на частоту автогенератора. Однако, как показывают расчеты, для кварца это влияние незначительно.

Активная проводимость, также изменяясь по величине в зависимости от частоты, принимает максимальные значения на резонансных частотах акустической колебательной системы. Увеличение активной проводимости и соответственно пьезотока обусловлено на этих частотах наличием резонанса в акустической колебательной системе и эквивалентно уменьшению добротности электрического колебательного контура, что приводит к уменьшению напряжения на контуре. Величина активной проводимости зависит от разности смещения граней пьезопластины. На резонансных частотах разность смещения граней и соответственно проводимость достигают максимальных значений. Вместе с тем на разных резонансных частотах разность смещения граней имеет различную величину и зависит от волновой толщины пьезопластины.

В работе предложено исследование электроакустического тракта ультразвукового резонансного толщиномера производить с помощью анализа величины активной проводимости (обусловленной пьезоэффектом) пьезопреобразователя, входящего в различные многослойные акустические системы. Однако исследование полученных выражений с помощью математического анализа сложно и дает сравнительно мало информации. Поэтому исследование проводилось путем расчета различных практически наиболее важных случаев с привлечением электронно-вычислительной техники и дальнейшего анализа полученного графического материала. Для этого полученные выражения были приведены к виду, удобному для программирования на ЭВМ БЭСМ-2. При составлении программы для вычисления функций (активной и реактивной проводимости) в зависимости от частоты особое внимание было

обращено на отыскание их экстремальных значений. Своеобразное поведение функций (наличие острых пиков) обусловило при расчете использование переменного (функционально меняющегося) шага. На печать выдавались значения в экстремальных точках и ряд значений на склонах пиков. По составленной программе рассчитывались активная и реактивная проводимости пьезопреобразователя, входящего в пятислойную систему: демпфер — активный слой — слой клея — защитный слой — контактный слой — контролируемый слой — среда. При этом  $Z_j, C_j, l_j, q_j, \beta_j$  — соответственно акустическое сопротивление, скорость УЗК, толщина, волновое число и частотнозависимый коэффициент затухания  $j$ -слоя. Нумерация слоев велась от активного слоя, которому приписывался индекс 1. Частотнозависимые коэффициенты для клеевого и контактного слоев вычислялись по формуле

$$\beta_j = B_j f^2, \quad (2)$$

а для защитного и контролируемого слоев по формуле

$$\beta_j = B_{j1} f + B_{j2} f^4. \quad (3)$$

Получены и проанализированы аналитически выражения для активной и реактивной проводимости для некоторых наиболее важных случаев, когда затухание не оказывает значительного влияния на рассматриваемые процессы, но усложняет выкладки и им можно пренебречь. Для пьезоматериалов с малой электромеханической связью (кварц) получены уравнения резонансных частот соответственно для однослойной (активный слой), двухслойной (активный и контролируемый слои), трехслойной (активный, контактный и контролируемый слои), четырехслойной (активный, защитный контактный и контролируемый слои) систем со свободными границами

$$\operatorname{ctg} \frac{q_1 l_1}{2} = 0; \quad (4)$$

$$Z_1 \delta_1 + Z_5 \delta_5 = 0; \quad (5)$$

$$Z_1 Z_4 \delta_1 + Z_4^2 \delta_4 + Z_4 Z_5 \delta_5 - Z_1 Z_5 \delta_1 \delta_4 \delta_5 = 0; \quad (6)$$

$$Z_1 Z_3 Z_4 \delta_1 + Z_3^2 Z_4 \delta_3 + Z_3 Z_4^2 \delta_4 + Z_3 Z_4 Z_5 \delta_5 - Z_1 Z_3 Z_5 \delta_1 \delta_4 \delta_5 - Z_1 Z_4 Z_5 \delta_1 \delta_3 \delta_5 - Z_1 Z_4^2 \delta_1 \delta_3 \delta_4 - Z_3^2 Z_5 \delta_3 \delta_4 \delta_5 = 0. \quad (7)$$

Здесь  $\delta_j = \operatorname{tg} q_j l_j$ , где  $j = 1, 3, 4, 5$ .

#### РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ПРИБОРА

На основании выражений, описывающих волновые процессы в акустических колебательных системах в одномерном приближении, в работе проведено рассмотрение резонансных яв-

лений отдельно в пассивном (контролируемом) и активном слоях, а также в многослойной системе. В отличие от представления Е. Скучиком волнового поля в полуволновом слое при прохождении через него гармонической волны в виде стоячих волн давления и колебательной скорости предложено рассматривать волновое поле в слое как комбинацию двух стоячих волн давления и колебательной скорости с разными амплитудами, сдвинутыми на четверть периода во времени и на четверть длины волны в пространстве, или как распространяющиеся волны давления и колебательной скорости с переменными амплитудами и с переменным фазовым сдвигом между ними в зависимости от координаты.

При наличии затухания в слое подводимая энергия УЗК не проходит полностью через полуволновой слой, а частично отражается и тратится на покрытие потерь в нем. Из общих формул для коэффициентов отражения и пропускания Л. М. Бреховских получены приближенные выражения (с погрешностью менее 1% (при  $2\beta_5 l_5 < 0,1$ ) при нормальном падении волны для двух частных случаев:

- 1) слой окружен однородной средой;
- 2) одна из сторон слоя свободна.

В первом случае, при отсутствии в слое диссипативных потерь, полученные выражения приводятся к известным формулам для коэффициентов отражения и пропускания при нормальном падении волны, выведенным Релеем. На основании закона сохранения энергии получено выражение для энергии диссипативных потерь за единицу времени в объеме с единичной площадкой, ориентированной нормально к направлению распространения ультразвуковой волны, и длиной, равной толщине слоя (удельная мощность потерь). Величина потерь в слое возрастает с увеличением толщины, коэффициента затухания слоя и разницы значений акустических сопротивлений слоя и окружающей среды.

Наличие определенного затухания в слое во втором случае является необходимым условием осуществления иммерсионного варианта резонансного метода контроля. С этой же точки зрения наличие затухания в первом случае является нежелательным.

Рассмотрены резонансные явления в полуволновом активном слое при односторонней и двухсторонней нагрузках в режиме излучения, причем режим односторонней нагрузки соответствует акустической системе демпфер — пьезопластина.

Исследование влияния параметров электроакустического тракта толщиномеров на интенсивность резонансных явлений и чувствительность резонансного прибора проводилось на базе графиков частотных зависимостей активной проводимости,

обусловленной пьезоэффектом. При рассмотрении акустической системы: эпоксидная смола — кварц — масло — сталь при отсутствии внутреннего затухания в системе выяснено, что величина резонансных пиков проводимости не зависит от количества и толщины пассивных слоев (контактного и контролируемого). Это становится понятным, если учесть, что величина активной проводимости пьезопреобразователя характеризует величину акустической энергии, излучаемую в полупространство (демпфер). Эта величина при постоянных  $S$ ,  $e$  и  $l_1$  зависит только от частоты и от отношения акустических сопротивлений демпфера и пьезопластины, но не зависит от того, сколько и каких слоев имеется с другой стороны пьезопластины. Однако наличие пассивных слоев с другой стороны пьезопластины увеличивает количество запасаемой энергии в акустической колебательной системе. При этом количество энергии, излучаемое в демпфер, не меняется. Это означает увеличение добротности акустической колебательной системы, а следовательно, остроты резонансных пиков.

Наличие жидкого контактного слоя с относительно малым акустическим сопротивлением между пьезопластиной и контролируемым слоем обеспечивает высокую добротность системы. С уменьшением акустического сопротивления контактного слоя акустическая связь между искателем и контролируемым слоем уменьшается, что наряду со сдвигом резонансных частот (пиков) в сторону низких частот повышает добротность системы.

Исследования показали, что добротность системы также повышается при уменьшении акустического сопротивления демпфера. При этом интенсивность резонансных явлений в системе возрастает. Последнее приводит к увеличению активного тока через пьезопреобразователь и, следовательно, к ухудшению добротности электрического колебательного контура на резонансных частотах акустической колебательной системы. Поэтому чем добротнее акустическая колебательная система, тем сильнее будет шунтироваться электрический колебательный контур на резонансных частотах системы. Это показывает, что для повышения чувствительности прибора желательно незначительно демпфировать акустическую колебательную систему. Однако с уменьшением демпфирования возрастает влияние внутренних акустических шумов в пьезопластине. Это приводит к понижению реальной чувствительности прибора. Оптимальное демпфирование искателя определяется требованием наибольшего отношения величины полезного сигнала к уровню помех.

В реальных условиях акустические системы обладают внутренним затуханием, т. е. затуханием в слоях, входящих в си-

стему. Наличие внутреннего затухания приводит к уменьшению колебаний граней пьезопластины, а следовательно, к уменьшению пьезотока и проводимости, обусловленной пьезоэффектом. Общая акустическая энергия в системе при этом уменьшается, причем часть ее тратится на покрытие внутренних потерь в системе, а другая — на излучение. На резонансных частотах как излучаемая, так и расходуемая на покрытие внутренних потерь части энергии достигают максимальных значений. Однако, если с ростом потерь на излучение активная проводимость возрастает, то с ростом внутренних потерь — падает.

Проведены исследования частотной зависимости активной проводимости преобразователя, входящего в систему: эпоксидная смола — кварц — масло — сталь в высокочастотном диапазоне (1—20 мГц) при различном затухании в контролируемом слое толщиной 3 мм, и разных толщинах контактного слоя (0,5—20 мк). В кварцевой пластине с собственной частотой  $f_0=10$  мГц затухание не учитывалось. Частотнозависимый коэффициент затухания для слоя масла вычислялся по формуле (2) при  $B_4=10^{-12}$  сек<sup>2</sup>/м. Затухание в стали вычислялось по формуле (3). Коэффициенты  $B_{51}$  и  $B_{52}$  определялись из графиков зависимости затухания от частоты в различных сталях, приведенных Л. Г. Меркуловым. Для стали со средней величиной зерна  $\bar{D}=0,025$  мм были использованы коэффициенты  $B_{51}=4,44 \cdot 10^{-7}$  сек/м и  $B_{52}=2,56 \cdot 10^{-28}$  сек<sup>4</sup>/м, а для стали со средней величиной зерна  $\bar{D}=0,16$  мм —  $B_{51}=18 \cdot 10^{-7}$  сек/м и  $B_{52}=32 \cdot 10^{-28}$  сек<sup>4</sup>/м. Исследования показали, что с ростом средней величины зерна, толщины контактного слоя и частоты затухание в системе увеличивается и, начиная с определенных частот, резонансные пики исчезают, так как в этом случае акустическая система не в состоянии запасать в себе энергию и, следовательно, резонансные явления в системе становятся невозможными. Затухание в слое масла не оказывает существенного влияния на резонансные явления в системе.

Интенсивность резонансных явлений при наличии затухания зависит от свойств контактной жидкости. Теоретическое и экспериментальное исследование систем: эпоксидная смола — кварц — глицерин — сталь и эпоксидная смола — кварц — спирт — сталь с затуханием (для спирта  $B_4=5,5 \cdot 10^{-15}$  сек<sup>2</sup>/м, для глицерина  $B_4=2,7 \cdot 10^{-12}$  сек<sup>2</sup>/м, для стали  $B_{51}=4,44 \cdot 10^{-7}$  сек/м и  $B_{52}=2,56 \cdot 10^{-28}$  сек<sup>4</sup>/м) при толщине контактного слоя 20 мк и толщине контролируемого слоя 3 мм в высокочастотном диапазоне показало, что величина резонансных пиков в случае применения спирта меньше, а острота — больше,

чем в случае применения глицерина. Применение спирта с малым акустическим сопротивлением обуславливает с одной стороны обострение резонансных пиков, а с другой стороны вызывает увеличение затухания в контролируемом слое из-за большей разницы величин акустических сопротивлений контактной жидкости и контролируемого слоя, чем в случае применения глицерина. Поэтому применение глицерина с целью увеличения чувствительности предпочтительнее. Это совпадает с рекомендацией Л. Г. Меркулова и Л. М. Яблоника по использованию контактных жидкостей с большим акустическим сопротивлением для повышения чувствительности преобразователя при эхо-методе ультразвуковой дефектоскопии.

Аналогичные исследования были проведены в низкочастотном диапазоне (0,15—3 мГц) с собственной частотой искателя  $f_0 = 1,5$  мГц.

Чувствительность прибора определяется не только величиной активной проводимости, обусловленной пьезоэффектом, но и активной проводимостью, учитывающей электрические потери в колебательном контуре автогенератора, т. е. суммарной активной проводимостью. Она зависит от разницы между максимальным и минимальным значениями суммарной активной проводимости. Величина добротности электрического контура (без учета влияния активной проводимости, обусловленной пьезоэффектом) оказывает большее влияние на чувствительность прибора при более высокой добротности акустической системы. Однако, как это отмечено и Д. С. Шрайбером, повышение добротности электрического контура с целью увеличения чувствительности прибора всегда желательно.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что выбор высокочастотного диапазона с применением кварцевого искателя с собственной частотой  $f_0 = 10$  мГц дает большой выигрыш в чувствительности прибора применительно к контролю толщины стенок котельных труб в местах гибов.

Для оценки возможности защиты пьезоэлемента от износа с помощью протектора были проведены исследования более сложных систем: эпоксидная смола — кварц — клей — кварц — масло — сталь и эпоксидная смола — кварц — клей — сталь — масло — сталь. Исследования показали, что применение в качестве протектора кварцевой пластины толщиной 0,3 мм и стальной пластины толщиной 0,1 мм в значительной степени уменьшает чувствительность прибора и не обеспечивает возможность контроля толщины стенок котельных труб в местах гибов.

При рассмотрении иммерсионного варианта резонансного метода контроля подчеркнуто, что резонансные пики активной проводимости пьезопреобразователя (резонансные импульсы на экране электронно-лучевой трубки), входящего в акустические колебательные системы: эпоксидная смола — кварц — вода — сталь — вода и эпоксидная смола — кварц — вода — сталь, обусловлены резонансными явлениями во всей акустической системе, а не резонансами столба жидкости, как это обычно принято считать.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРИБОРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ

Изучение распределения резонансных частот многослойной акустической колебательной системы позволяет правильно производить градуировку резонансных толщиномеров, давать обоснованные рекомендации по методике проведения измерений и тем самым повышать точность прибора. Резонансные частоты системы зависят от акустических свойств, толщины и взаимного расположения всех входящих в систему слоев, а также от граничащих со слоями сред. Каждый из входящих в систему пассивных слоев может резонировать на своей резонансной частоте или гармониках независимо от других слоев. Активный слой может также резонировать на своей основной резонансной частоте и нечетных гармониках только в том случае, когда резонирует вся система, т. е. пассивные слои резонируют порознь или совместно. Обычно в практике толщинометрии резонансные частоты активного, защитного и контактного слоев выходят за пределы диапазона используемых частот. Основная же резонансная частота контролируемого слоя и ее гармоники входят в этот диапазон. Однако несмотря на то, что в принципе интерес представляют именно резонансные частоты контролируемого слоя, прибором регистрируются резонансные частоты системы, а не слоя.

Правильные результаты при измерении резонансными приборами получаются только благодаря применению приемов сравнения, осуществляемых калибровкой приборов по образцам с известной толщиной.

Исследование влияния параметров акустического тракта резонансного толщиномера на распределение резонансных частот производилось с помощью графиков резонансных частот различных многослойных акустических систем: кварц — масло — сталь, кварц — глицерин — сталь, эпоксидная смола — кварц — масло — сталь, эпоксидная смола — кварц — клей — кварц — масло — сталь и других в высокочастотном (1—



20 мГц) и низкочастотном (0,15—3,0 мГц) диапазонах. Графики резонансных частот акустических систем построены по конкретным данным на базе известных графиков резонансных частот для отдельного слоя, выполненных в логарифмическом масштабе и отражающих связь его толщины с гармоническими резонансными частотами в виде параллельных прямых линий, наклоненных к осям координат под определенным углом. В случае многослойной системы связь между толщиной контролируемого слоя и резонансными частотами системы при фиксированных толщинах активного и защитного слоев и различной толщине контактного слоя изображаются в виде семейства резонансных кривых. Изучение поведения хода этих кривых позволяет проводить исследование влияния параметров акустического тракта на распределение резонансных частот системы.

В результате проведенного анализа установлено, что демпфирование кварцевой пластины эпоксидной смолой и внутреннее затухание оказывают слабое влияние на распределение резонансных частот акустической системы. Поэтому уравнения (5—7), справедливые для систем со свободными границами без затухания, можно применять для нахождения резонансных частот демпфированных систем с затуханием. Однако графики резонансных частот для систем при наличии внутреннего затухания отличаются тем, что резонансные кривые обрываются в высокочастотной части из-за отсутствия в системе резонансных явлений. Исследование системы: эпоксидная смола — кварц — масло — сталь в высокочастотном диапазоне (1—20 мГц) с резонансной частотой пьезопластины  $f_0 = 10$  мГц показало, что в рабочем диапазоне частот (3—9 мГц) изменение эквивалентной толщины слоя масла в пределах 10—35 мк практически мало влияет на значения резонансных частот системы, а следовательно, на отсчет толщины контролируемого слоя. Причем это влияние тем меньше, чем ближе расположен диапазон рабочих частот к резонансной частоте пьезопластины. Поэтому на практике, если обеспечивается взаимно-однозначное соответствие между измеряемой толщиной и показанием прибора, диапазон рабочих частот выбирается в размере одной октавы несколько ниже и вблизи резонансной частоты пьезопластины.

Исследования показали, что использование в качестве контактной жидкости спирта или легких масел, обладающих малым акустическим сопротивлением и скоростью УКЗ по сравнению с глицерином, предпочтительнее с точки зрения уменьшения влияния от изменения толщины контактного слоя на значения резонансных частот системы, а следовательно, на точность измерений. Этому способствует также обеспечение

постоянного давления на пьезопластину путем рациональной конструкции искателя.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, в высокочастотном рабочем диапазоне распределение резонансных частот при эквивалентной толщине слоя масла 10—35 мк близко к гармоническому закону. Это подтверждается также многолетней практикой использования в высокочастотном диапазоне известных отсчетных устройств с применением прямочастотного конденсатора, системы из трех контуров и других.

Исследование системы эпоксидная смола — кварц — масло — сталь в низкочастотном диапазоне (0,15—3,0 мГц) с резонансной частотой пьезопластины  $f_0 = 1,5$  мГц показало, что в рабочем диапазоне частот (0,5—1,3 мГц) изменение эквивалентной толщины слоя масла в этих же пределах (10—35 мк) в значительной степени влияет на значения резонансных частот системы. В этом случае распределение резонансных частот системы носит ярко выраженный негармонический характер. Это обусловлено меньшим влиянием контактного слоя на значения резонансных частот системы в низкочастотном диапазоне по сравнению с высокочастотным ввиду меньшего фазового набега в контактном слое на низких частотах. В низкочастотном диапазоне при ярко выраженном негармоническом распределении резонансных частот системы применение отсчетных устройств, основанных на гармоническом законе, приводит к значительной погрешности. В этом случае высокая точность может быть получена с помощью градуировочных кривых для каждого номера резонансных частот акустической системы, как это выполнено в приборе типа Visigauge.

Результаты экспериментальных исследований в низкочастотном диапазоне подтверждают негармонический характер распределения резонансных частот и согласуются с данными Кука и Ван-Валькенбурга, полученными только для второй резонансной частоты акустической системы в более узком диапазоне частот. При исследовании были использованы образцы из стали разной толщины с разной шероховатостью поверхности. В качестве примера в табл. 1 приводятся значения резонансных частот акустической колебательной системы: эпоксидная смола — кварц — масло — сталь при использовании пьезопластины с собственной резонансной частотой  $f_0 = 1,5$  мГц. Шероховатость поверхности образцов  $\nabla 6$ . В табл. 2 приводятся значения двух соседних резонансных частот этой системы, а в табл. 3 — расчетные значения основных резонансных частот самих образцов.

Резонансные частоты системы:  
эпоксидная смола — кварц — масло — сталь, кгц.  $f_0 = 1,5$  мгц.  
Шероховатость поверхности  $\nabla 6$

Таблица 1

| Номер резонансной частоты системы | Толщина образца, мм |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                   | 2                   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 1                                 | 550                 | 510  | 460  | 440  | 400  |      |      |      |      |
| 2                                 | 1510                | 1030 | 760  | 720  | 610  | 560  |      |      | 500  |
| 3                                 | 1820                | 1700 | 1520 | 1240 | 1025 | 880  | 775  | 720  | 650  |
| 4                                 |                     | 2070 | 1700 | 1670 | 1500 | 1280 | 1130 | 1000 | 900  |
| 5                                 |                     |      | 2250 | 1880 | 1700 | 1680 | 1470 | 1320 | 1200 |
| 6                                 |                     |      |      | 2440 | 2040 | 1780 | 1700 | 1630 | 1480 |
| 7                                 |                     |      |      |      |      | 2170 | 1880 | 1780 | 1710 |
| 8                                 |                     |      |      |      |      |      | 2250 | 2000 | 1830 |
| 9                                 |                     |      |      |      |      |      |      | 2320 | 2100 |

Разность двух соседних резонансных частот системы:  
эпоксидная смола — кварц — масло — сталь, кгц

Таблица 2

| Разность номеров резонансных частот системы | Толщина образца, мм |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | 2                   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1—2   | 960                 | 520 | 300 | 280 | 210 |     |     |     |     |
| 2—3   | 310                 | 670 | 760 | 520 | 415 | 320 |     |     | 150 |
| 3—4   |                     | 370 | 180 | 430 | 475 | 400 | 355 | 280 | 250 |
| 4—5   |                     |     | 550 | 190 | 200 | 400 | 340 | 320 | 300 |
| 5—6   |                     |     |     | 580 | 340 | 100 | 230 | 310 | 280 |
| 6—7   |                     |     |     |     |     | 390 | 180 | 150 | 230 |
| 7—8   |                     |     |     |     |     |     | 370 | 220 | 120 |
| 8—9   |                     |     |     |     |     |     |     | 320 | 270 |

Основные расчетные резонансные частоты образца, кгц

Таблица 3

| Толщина образца, мм |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2                   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1450                | 970 | 726 | 582 | 485 | 416 | 364 | 324 | 291 |

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблицах, показывает, что для образца определенной толщины разности двух соседних резонансных частот значительно

отличаются друг от друга в зависимости от того, между какими номерами резонансных частот берутся эти разности. Кроме того, эти разности отличаются от основной резонансной частоты данного образца. Сопоставление теоретических резонансных кривых и характера распределения экспериментальных точек позволяет косвенным образом определять эквивалентную толщину контактного слоя при измерении толщины изделий с различной чистотой обработки поверхности.

В частности, при шероховатости поверхности  $\nabla 8$  эквивалентная толщина контактного слоя составляет 10 мк, а при  $\nabla 6$ —20 мк

Исследование распределения резонансных частот пятислойных систем (например, система: эпоксидная смола — кварц — клей — кварц — масло — сталь) показало, что общая картина хода резонансных кривых в сравнении с трехслойной сохраняется, но происходит сдвиг в сторону низких частот. Собственная резонансная частота искателя из-за влияния клеевого и защитного слоя становится ниже основной резонансной частоты активного слоя. Кроме того, начиная с определенного значения затухания в системе, на некоторых участках семейства резонансных кривых имеют место разрывы резонансных кривых из-за отсутствия в системе резонансных явлений. Изучение факторов, влияющих на распределение резонансных частот акустической колебательной системы, позволяет давать обоснованные рекомендации по градуировке резонансных толщиномеров.

1. Градуировку следует выполнять по эталонным образцам, а не с помощью частотомера и градуировочных таблиц, рассчитанных по известным формулам для отдельного слоя. При этом желательно, чтобы состояние поверхности эталонных образцов и контролируемых изделий было примерно одинаковым.

2. Градуировку для различных материалов или групп материалов, обладающих близкими акустическими свойствами, и для различных пьезопреобразователей следует производить отдельно с определенным видом контактной смазки.

3. Градуировку для низших номеров резонансных частот системы нужно осуществлять отдельно для каждого отдельного номера.

4. В случае, когда шероховатость поверхности изделия или конструкция искателя обеспечивают наличие контактного слоя при эквивалентной толщине 10—40 мк, градуировку прибора в диапазоне частот 5—10 мгц можно выполнять на основе простого гармонического закона.

Введено понятие — разрешающая способность резонансного метода, равное отношению приращения  $\nu$ -ой резонансной

частоты системы  $\Delta f/\nu$  к приращению толщины контролируемого слоя  $\Delta l_5$ . При предельном переходе это отношение принимает вид  $df/\nu/dl_5$ . На основании анализа графиков резонансных частот с помощью этого понятия сделано предположение о возможности выполнения отсчетного устройства прибора с высокой разрешающей способностью и повышенной точностью.

Показано, что влияние приведенных Р. В. Харрисом факторов (материал контролируемого слоя, шероховатость поверхности, контактная жидкость, материал и толщина протектора и т. д.) на распределение резонансных частот является вполне закономерным и вытекает из теории, рассматривающей акустический тракт прибора как единую акустическую колебательную систему при учете резонансных явлений во всех входящих в систему слоях.

#### РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ТОЛЩИНОМЕРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СТенок КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ В МЕСТАХ ГИБОВ

При разработке опытного образца толщиномера УРТ-10 были использованы результаты теоретических и экспериментальных исследований. Кроме того, были проведены исследования по снижению уровня помех в электронно-акустическом тракте прибора. При контроле котельных труб резонансные импульсы имеют малую амплитуду, соизмеримую с уровнем помех, вследствие чего их регистрация затруднена. Особое значение в этом случае приобретает повышение чувствительности резонансного прибора, зависящее от отношения уровня сигнала и помехи. Помехи имеют различный характер и происхождение. Они ограничивают не только чувствительность прибора, но и точность измерений. Ряд видов помех является специфическим для данного класса приборов. Согласно предположенной в работе классификации помехи можно разделить на электрические и акустические. В свою очередь, оба вида помех подразделяются на внутренние (возникающие в самом приборе) и внешние. Так, к электрическим внешним помехам относятся сетевые и электромагнитные, а к внутренним — помехи из-за паразитных связей, флюктуационные, коммутационные, помехи автогенератора, магнитострикционные шумы модулятора. К внутренним акустическим помехам относятся шумы искателя, а к внешним — ударные, ложные отражения и другие типы волн. Проведенные исследования по изучению природы и источников помех позволили разработать эффективные меры борьбы с некоторыми из них, что дало возможность повысить реальную чувствительность прибора.

В результате исследований было предложено и практически опробовано отсчетное устройство, позволяющее произво-

дить абсолютный отсчет толщины по шкале стрелочного прибора, отградуированного в миллиметрах. Его действие основано на гармоническом законе распределения резонансных частот, что приблизительно имеет место, как показано, при использовании высокочастотного диапазона. В этом случае при линейности модуляции во времени разность двух соседних резонансных частот будет пропорциональна интервалу времени  $T$ . Между контролируемой толщиной и  $T$  будет иметь место гиперболическая зависимость. Если за время  $T$  через стрелочный прибор пропускать прямоугольный импульс тока, то каждому значению  $T$  будет соответствовать определенное положение стрелки и, следовательно, определенное значение толщины. Способ отсчета толщины с применением прямочастотного конденсатора и описываемый способ основываются на одинаковой закономерности. В первом случае точность прибора в основном зависит от прямочастотности конденсатора, а во втором — от линейности частотной модуляции во времени. В обоих случаях шкала получается неравномерной. В приборе имеется два диапазона измерений: от 2 до 7 мм и от 4 до 15 мм.

Прибор выполнен на лампах пальчиковой серии. При его разработке было использовано ряд узлов и схемных решений серийно выпускаемого резонансного толщиномера ТУК-3, электрическая схема которого была разработана автором ранее. Индикатором акустического контакта и работоспособности прибора служит электронно-лучевая трубка, что в достаточной мере гарантирует достоверность показаний стрелочного прибора.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПРИБОРА УРТ-10

1. Диапазон измеряемых толщин, мм . . . . . 2—14 (для стали).
2. Погрешность измерения . . . . . не более  $\pm 3\%$  от контролируемой толщины
3. Диаметр труб, мм . . . . . 25 и более
4. Радиус гибов (внутренний) . . . . . не менее диаметра трубы
5. Шероховатость поверхности контролируемых деталей . . . . . не грубее  $\nabla 4$ .
6. Отсчет толщины производится по стрелочному прибору с одновременной индикацией наличия акустического контакта по электронно-лучевой трубке.
7. Искатель кварцевый с собственной резонансной частотой 10 мгц (от серийного прибора ТУК-3).
8. Питание прибора осуществляется переменным током частотой 50 гц, напряжением 220 в.
9. Потребляемая мощность, ва . . . . . не более 100
10. Вес прибора, кг . . . . . не более 12
11. Габариты прибора, мм . . . . . 200×260×400

С целью определения возможности контроля толщины стенки котельных труб в местах гибов и уточнения погрешности измерений были проведены испытания прибора на конвективном пароперегревателе низкого давления с трубами  $\varnothing 42 \times 4,5$  мм в трубном цехе № 1 завода «Красный котельщик» (г. Таганрог) и в лаборатории завода на трубах с разными диаметрами, толщинами стенок и марками сталей по определенной программе.

При испытаниях маркировалась каждая точка на трубе, в которой проводилось измерение толщины. Результаты контроля прибором УРТ-10 после разрезки труб сверялись с результатами контроля механическим способом. Относительная погрешность измерения определялась при сопоставлении с результатами измерения механическим способом, которые принимались за действительные. Некоторые результаты измерений представлены в приводимых ниже таблицах.

Таблица 4

Данные по контролю котельных труб в местах гибов. (Диаметр трубы 32 мм, номинальная толщина стенки трубы 4 мм, сталь 12Х1МФ)

| № образца | Ультразвуковой контроль толщины, мм | Механический контроль толщины, мм | Погрешность, % |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 0         | 3,45                                | 3,50                              | -1,4           |
| 1         | 3,65                                | 3,75                              | -2,8           |
| 2         | 3,60                                | 3,65                              | -1,4           |
| 3         | 3,70                                | 3,65                              | +1,4           |
| 4         | 3,60                                | 3,65                              | -1,4           |
| 5         | 3,70                                | 3,75                              | -1,3           |
| 6         | 3,45                                | 3,50                              | -1,4           |
| 7         | 3,80                                | 3,75                              | +1,3           |
| 8         | 3,80                                | 3,75                              | +1,3           |
| 9         | 3,55                                | 3,55                              | 0              |
| 10        | 3,60                                | 3,60                              | 0              |
| 11        | 3,75                                | 3,75                              | 0              |
| 12        | 3,75                                | 3,70                              | +1,3           |
| 13        | 3,85                                | 3,80                              | +1,3           |
| 14        | 3,60                                | 3,55                              | +1,4           |
| 15        | 3,80                                | 3,75                              | +1,3           |
| 16        | 3,65                                | 3,70                              | -1,3           |
| 17        | 3,80                                | 3,75                              | +1,3           |
| 18        | 3,50                                | 3,50                              | 0              |
| 19        | 3,65                                | 3,60                              | +1,4           |
| 20        | 3,70                                | 3,70                              | 0              |

Таблица 5

Данные по контролю котельных труб в местах гибов. (Диаметр трубы 25 мм, номинальная толщина стенки трубы 3,5 мм, сталь 20)

| № образца | Ультразвуковой контроль толщины, мм | Механический контроль толщины, мм | Погрешность, % |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 0         | 3,25                                | 3,30                              | -1,5           |
| 1         | 3,10                                | 3,15                              | -1,6           |
| 2         | 3,30                                | 3,35                              | -1,5           |
| 3         | 3,35                                | 3,40                              | -1,5           |
| 4         | 3,15                                | 3,20                              | -1,6           |
| 5         | 3,10                                | 3,20                              | -3,0           |
| 6         | 3,15                                | 3,15                              | 0              |
| 7         | 3,25                                | 3,30                              | -1,5           |

Найденная таким образом относительная погрешность измерения не превышает 3% от измеряемой величины. При этом следует отметить, что погрешность измерения определяется в основном погрешностью ультразвукового резонансного прибора, поскольку погрешность, обусловленная случайными ошибками, незначительна.

Во всех случаях контроля наблюдалась четкая картина резонансных импульсов с прямоугольной ступенькой на экране электронно-лучевой трубки и стабильность показаний стрелочного прибора при многократных замерах. Таким образом, испытания показали, что прибор обладает высокой чувствительностью, позволившей впервые решить задачу неразрушающего контроля гибов котельных труб с приемлемой для практики точностью. Возможность отсчета толщины по стрелочному прибору создает удобство в работе и позволяет повысить производительность контроля, так как не требует дополнительных ручных операций, кроме установки искателя на контролируемый участок трубы.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод теоретического исследования электроакустического тракта ультразвукового резонансного толщиномеров с помощью анализа частотной зависимости величины активной проводимости пьезопреобразователя, входящего в многослойную акустическую систему. Получено в одномерном приближении общее выражение для проводимости пьезопреобразователя (из различных пьезоактивных материалов) при

любых акустических нагрузках с учетом частотнозависимого затухания. Найденное выражение позволяет рассчитывать электроакустический тракт толщиномер в контактном и иммерсионном вариантах резонансного метода контроля.

Проведено исследование практически важного случая акустической системы: демпфер — пьезопластина — слой клея — протектор — контактный слой — контролируемый слой — среда. Показано, что из результатов исследования как частные случаи вытекают некоторые соотношения и выводы, полученные ранее другими авторами.

2. Произведены на ЭВМ численные расчеты и построены графики частотных зависимостей активной проводимости пьезопреобразователя, входящего в различные акустические системы. На базе этих расчетов исследовано в высокочастотном (1—20 мГц) и низкочастотном (0,15—3 мГц) диапазонах влияние параметров электроакустического тракта на интенсивность резонансных явлений, добротность акустической системы и чувствительность резонансного толщиномера. В результате проведенного анализа установлено, что добротность акустической системы, определяющая ширину резонансных пиков и влияющая на точность измерений, обуславливается степенью ее демпфирования, структурой, акустическими свойствами и толщиной входящих в нее слоев, а также значениями резонансных частот системы. В частности, уменьшение демпфирования, внутреннего затухания системы, акустического сопротивления и скорости УЗК в жидком контактном слое, а также увеличение толщины контактного и контролируемого слоев приводит к возрастанию добротности системы. Исследовано влияние акустических свойств и толщины элементов искателя (демпера, пьезопластины, протектора) и выбора диапазона рабочих частот на чувствительность резонансного толщиномера. Оптимальное демпфирование искателя определяется требованием наибольшего отношения величины полезного сигнала к уровню помех. Применение защитного слоя (протектора) приводит к уменьшению чувствительности резонансного прибора. Установлено, что использование контактных жидкостей с большими акустическим сопротивлением и скоростью УЗК (например, глицерина) при значительном затухании в контролируемом слое дает выигрыш в величине амплитуды резонансных импульсов.

3. Построены графики резонансных частот для различных акустических систем, с помощью которых проведено исследование распределения резонансных частот в зависимости от акустических свойств и толщин, входящих в систему слоев, а также от демпфирования и внутреннего затухания системы. При этом установлено, что демпфирование кварцевой пласти-

ны эпоксидной смолой и внутреннее затухание оказывают слабое влияние на распределение резонансных частот акустической системы. Выяснено, что влияние контактного слоя на резонансные частоты системы и, следовательно, на точность измерения, уменьшается при выполнении следующих условий:

- а) проведение измерений в высокочастотном диапазоне;
- б) использование контактных жидкостей с малыми акустическим сопротивлением и скоростью УЗК;
- в) обеспечение постоянного давления на пьезопластину путем рациональной конструкции искателя;
- г) использование при измерении резонансных импульсов, расположенных вблизи резонансной частоты искателя.

Установлено, что при использовании высокочастотного диапазона в ультразвуковых резонансных толщиномерах можно применять с достаточной для практики точностью системы прямого отсчета, основанные на гармоническом законе распределения резонансных частот, если обеспечить эквивалентную толщину слоя контактной жидкости 10—40 мк. В низкочастотном диапазоне при той же эквивалентной толщине контактного слоя такие системы отсчета из-за ярко выраженного негармонического распределения резонансных частот применять не рекомендуется. Даны рекомендации по градуировке резонансных толщиномеров и методике проведения контроля.

4. Полученные путем теоретического анализа данные о влиянии параметров электроакустического тракта на интенсивность резонансных явлений и распределение резонансных частот акустической системы были подвергнуты экспериментальной проверке. Результаты экспериментальных исследований достаточно хорошо согласуются с теоретическими положениями и выводами, полученными в настоящей работе.

5. Результаты проведенных исследований использованы при разработке опытного образца ультразвукового резонансного толщиномера типа УРТ-10. Принятые меры по увеличению чувствительности толщиномера и снижению уровня помех дали возможность впервые решить задачу неразрушающего контроля толщины стенок котельных труб в местах гибов.

В толщиномере применена система отсчета толщины по стрелочному прибору, что позволило повысить производительность контроля и обеспечило удобство в работе, так как в этом случае не требуется дополнительных ручных операций, кроме установки искателя на контролируемый участок трубы.

6. Проведены промышленные испытания толщиномера УРТ-10 на заводе «Красный котельщик». Испытания показали, что разработанный толщиномер позволяет надежно проводить контроль толщины стенок котельных труб разного типоразмера из стали различных марок как на прямолинейных

участках, так и в местах гибов с относительной погрешностью не более 3%. Опытный образец прибора УРТ-10 передан в сентябре 1968г. заводу для промышленной эксплуатации. Широкое внедрение толщиномера УРТ-10 на котлостроительных заводах позволит повысить надежность и долговечность энергетического оборудования благодаря своевременному обнаружению недопустимо тонких стенок наиболее опасных участков котельных труб в местах гибов.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Филимонов С. А. Ультразвуковой резонансный толщиномер ТУК-3. «Бюллетень технико-экономической информации», 1964, № 1, ГОСИНТИ.

2. Филимонов С. А. Повышение чувствительности ультразвукового резонансного толщиномера ТУК-3. «Ультразвуковая техника», 1966, № 2.

3. Филимонов С. А. Прохождение и отражение ультразвука при нормальном падении на плоскопараллельный слой при учете затухания. «Ультразвуковая техника», 1966, № 6.

4. Филимонов С. А. и Ермолов И. Н. Некоторые вопросы теории и практики ультразвукового резонансного метода. Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции по методам контроля качества материалов и изделий без разрушения. Свердловск, 1967.

5. Филимонов С. А. Исследование акустического тракта ультразвукового резонансного прибора. Доклады VI Всесоюзной акустической конференции. Секция С. Москва, 1968.

6. Филимонов С. А. К вопросу о прохождении упругой волны через плоский полуволновой слой. «Акустический журнал», № 14, вып. 1, 1968.

7. Филимонов С. А. и Ермолов И. Н. К вопросу о градуировке ультразвуковых резонансных толщиномеров. «Дефектоскопия», 1968, № 2.

8. Филимонов С. А. и Ермолов И. Н. Исследование электроакустического тракта ультразвукового резонансного толщиномера при сложной акустической нагрузке. «Дефектоскопия», 1968, № 6.

\*\*  
\*!

Основные положения диссертации доложены и обсуждены:

1. На совещании по квантовой акустике и ультразвуковой интерферометрии (г. Вильнюс, 1967 г.).

2. На V Всесоюзной научно-технической конференции по методам контроля качества материалов и изделий без разрушения (г. Свердловск, 1967 г.).

3. На VI Всесоюзной акустической конференции (г. Москва, 1968 г.).

4. На XIII межвузовской научной конференции по применению ультраакустики и исследованию вещества (г. Москва, 1969 г.).

Техн. редактор Л. А. Дунаева

Корректор С. И. Гольдберг

Сдано в набор 6/II 1969 г.

Подписано к печати 3/III 1969 г.

Формат бум. 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,5 печ. л. Л-79252. Зак. 99. Тир. 180.

Группа полиграф. работ ОНТИ ЦНИИТМАШ. Шарикоподшипниковская, 4.