

Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Часть I. Описание системы и методики калибровки.

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин, Д.С. Тихонов

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, г. Москва, ул. Твардовского д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: android@echoplus.ru

В статье приведено описание системы калибровки пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4, разработанной в НПЦ «ЭХО+». Подробно описана методика расчета всех параметров преобразователей в соответствии с ГОСТ 23702-90 и EN 12668-2. Приведены примеры паспортов пьезопреобразователей.

Введение

Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) являются важнейшей частью ультразвуковых дефектоскопов и в значительной степени определяют эффективность выполнения неразрушающего ультразвукового контроля (УЗК) по определённой методике. Одним из важных разделов такой методики является описание требований к параметрам используемых ПЭП. Ключевыми параметрами ПЭП, которые указываются в методиках, являются: эхоимпульсная чувствительность, эффективная рабочая частота, угол ввода, ширина основного лепестка диаграммы направленности, функция шумов и другие. Методики измерения основных параметров ПЭП определены в ГОСТ 23702-90 «Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний» [1], европейском стандарте EN 12668-2 «Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи» [2] и стандарте американского общества по испытаниям и материалам ASTM-E 1065 [3]. Калибровка ПЭП является необходимой процедурой при проведении автоматизированного ультразвукового контроля системами серии АВГУР [4].

Для решения задачи оперативного определения параметров ПЭП на практике возникает необходимость иметь аппаратуру и стандартные образцы, представляющие собой средство измерения, позволяющее быстро получить индивидуальный паспорт

конкретного ПЭП. При этом ГОСТ 23702 рекомендует использование 19 приборов и образцов для выполнения процедуры измерения параметров ПЭП.

Ранее в НПЦ «ЭХО+» были разработаны системы калибровки ПЭП АВГУР 2.2 [5] и АВГУР 4.4. Данные системы уже много лет применяют в различных промышленных и научных организациях России. Важной целью создания новой системы калибровки являлось удовлетворение требованиям стандарта EN 12688-2 в части перечня определяемых характеристик, с тем, чтобы экспортная продукция Российских предприятий подвергалась УЗК с применением ПЭП прошедшими паспортизацию в соответствии с международными стандартами. Применение новой элементной базы и технических решений, должны расширить список измеряемых характеристик ПЭП, повысить точность измеряемых величин, увеличить быстродействие системы.

Сопоставление российских (ГОСТ 23702-90 и ГОСТ 26266-90 [7]) и европейского (EN 12668-2) стандартов было сделано И.Н. Ермолов на круглом столе на XIV российской конференции по неразрушающему контролю. В его докладе было отмечено, что ГОСТ 26266-90 дает определения 69 параметрам преобразователей из которых рекомендовано использовать при проверке основных параметров 42, в EN 12668-2 определены 23 параметра и все они используются при проверке. К сожалению, доклад не был опубликован, но его материалы были использованы при подготовке методики калибровки, описываемой в данной статье, объединяющей требования российских и европейских стандартов.

Рис. 1

Описание системы АВГУР 5.4

Краткое сообщение о системе АВГУР 5.4 было сделано на конференции NDT-LAB 2008 [6]. В настоящей статье приведено описание системы и подробно изложена методика измерения параметров ПЭП при использовании системы АВГУР 5.4.

Система состоит из *блока системного*, представляющего собой цифровой ультразвуковой дефектоскоп, содержащий платы аналого-цифрового преобразователя, управления приемно-передающим трактом и шаговыми двигателями; *прецизионного сканирующего устройства*, обеспечивающего перемещение ПЭП по поверхности *стандартного образца* или в одной плоскости в пределах *иммерсионной ванны*.

Система предназначена для определения параметров контактных и иммерсионных пьезоэлектрических преобразователей. Поддерживается калибровка прямых и наклонных, совмещенных и раздельно-совмещенных, фокусирующих и не фокусирующих ПЭП с эффективными частотами от 0,8 до 10 МГц.

Система может комплектоваться однокоординатным сканером для обеспечения измерения большей части параметров контактных ПЭП за исключением параметров

трёхмерной диаграммы направленности и стрелы в дополнительной плоскости. При комплектации двухкоординатным планшетным сканером и специально разработанным полусферическим образцом система позволяет измерять параметры и в дополнительной плоскости. При комплектации компактной иммерсионной ванной и двухкоординатным сканером, возможна калибровка иммерсионных ПЭП. На Рис. 1 показана система в трёх вариантах комплектации.

Набор прижимов и держателей, входящих в состав системы позволяет проводить калибровку ПЭП в круглых и прямоугольных корпусах различных типоразмеров. На блоке системном установлены коаксиальные разъемы типа CP-50.

Система предназначена для эксплуатации в помещениях при значениях рабочих температур от +10 °С до +35 °С и относительной влажности воздуха 80% при температуре плюс 25 °С, однако калибровку рекомендуется проводить в соответствии с ГОСТ 23702 при температуре (20 ± 5) °С.

Основные отличия системы калибровки АВГУР 5.4 от систем предыдущего поколения:

- поддерживается двухкоординатный сканер и иммерсионный режим калибровки ПЭП;
- значительно расширен перечень определяемых параметров, выполнено обоснование возможности калибровки ПЭП в соответствии с европейским стандартом EN 12668-2;
- система позволяет осуществлять автоматическую выдачу паспортов ПЭП, прошедших калибровку с указанием выхода фактических параметров за пределы допустимого диапазона;
- обоснована возможность выполнять калибровку контактных ПЭП при выполнении единственного измерения набора эхосигналов на стандартном образце СО-3 (СО-3Р) или полусферическом образце СОП-СФ-55;
- наличие настраиваемой амплитуды ударного генератора и демпфирующих сопротивлений приемного тракта, расширенный диапазон усиления приёмного тракта, позволяют калибровать разнообразные ПЭП, предназначенные для работы с различными дефектоскопами;
- применение метода акустической голографии позволяет рассчитать поле иммерсионного ПЭП по эхосигналам от точечного отражателя, измеренным в ближней зоне и определить трёхмерную диаграмму направленности и параметры фокуса ПЭП, не увеличивая размеров иммерсионной ванны и ограничившись двумя шаговыми двигателями сканирующего устройства.

В Таблице 1 приведены основные технические характеристики системы АВГУР 5.4

Таблица 1 Основные технические характеристики системы АВГУР 5.4

Наименование технической характеристики	Значение
Длительность зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и при максимальной амплитуде, нс	не более 100
Длительность переднего фронта зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и максимальной амплитуде, нс	не более 10
Максимальная амплитуда зондирующего импульса, В	200±20
Максимальное значение эффективного выходного импеданса генератора зондирующего сигнала, измеренное при максимальной амплитуде, Ом	не более 5
Диапазон регулировки усиления, дБ	не менее 70
Предел допускаемой абсолютной погрешности установки коэффициента усиления, дБ	±0,5
Максимальное измеряемое значение амплитуды входного сигнала (при минимальном значении коэффициента усиления), В	10±0,1
Полоса пропускания приемного тракта по уровню -3 дБ (при неравномерности ±1 дБ), МГц	0,5-15
Динамический диапазон ВРЧ, дБ	не менее 40
Банк демпфирующих сопротивлений приемного тракта, Ом	от 50 до 500 с шагом 50
Эквивалентное среднеквадратичное значение напряжения шумов, приведенное к входу усилителя в полной полосе пропускания, мкВ	не более 80
Минимальный шаг сканирования по осям X и Y, мм	не более 0,02
Предел допускаемой абсолютной погрешности перемещения ПЭП на апертуре 200 мм, мм	±1
Габариты (Д×Ш×В): двухкоординатного сканирующего устройства, мм однокоординатного сканирующего устройства, мм блока системного, мм	560×430×394 570×240×250 160×270×230

Методика калибровки

В Таблице 2 приведены измеряемые и рассчитываемые параметры ПЭП, наименования и обозначения параметров приведены в соответствии с ГОСТ 26266-90 «Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования» [7].

Таблица 2 Определяемые параметры ПЭП

Обозначение	Параметр (в соответствии с ГОСТ 26266-90)
U	Форма эхоимпульса (эхоимпульс)
t_{\max}	Длительность импульсной характеристики
$K_{UU}(\omega)$	Амплитудно-частотная характеристика (спектральная характеристика)
f_s	Эффективная частота эхоимпульса, МГц
Δf_{UU}	Полоса пропускания (полоса частот), МГц
K_{UU}^I	Импульсный коэффициент двойного преобразования (эхо-импульсная чувствительность), дБ
АРД	АРД диаграмма
$A(z)$	Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика)
$A_{\Delta\tau}$	Уровень шума, мВ
H_M	Мертвая зона (по ГОСТ 23667-85), мм
l	Стрела, мм
τ_{np}	Время распространения (задержки) в призме (акустической задержке), мкс
α	Угол ввода в основной плоскости, °
θ_1	Ширина диаграммы направленности в основной плоскости, °
α'	Угол ввода в дополнительной плоскости, °
θ_2	Ширина диаграммы направленности в дополнительной плоскости, °
N, F	Величина ближней зоны (фокусное расстояние), мм
χ_1, χ_2, χ_3	Протяженность фокальной области (длина фокуса, ширина фокуса в основной и дополнительной плоскости)
e	Смещение оси луча*, мм
a_{eff}, b_{eff}	Эффективные размеры пьезоэлемента*, мм
A_{CT}	Подавление помех излучатель-приемник (для раздельно-совмещенных ПЭП)*, дБ

* Обозначение и наименование дано в соответствии с EN 12668-2.

Система координат

Ось X системы координат образца направлена вдоль оси сканирования X . Ось Y системы координат образца направлена вдоль оси сканирования Y . Ось Z системы координат образца направлена от внешней поверхности образца (для контактных ПЭП)

или от плоскости, соответствующей рабочей грани ПЭП (для иммерсионных ПЭП), см Рис. 2. Ось X системы координат ПЭП направлена вдоль акустической оси. Ось Y системы координат ПЭП направлена вдоль оси сканирования Y . Ось Z системы координат ПЭП направлена вверх плоскости, соответствующей рабочей грани ПЭП.

Рис. 2

Параметры импульса

В соответствии с ГОСТ 23702 и EN 12668-2 для определения параметров эхоимпульса контактного ПЭП используется отражение от полуцилиндрических поверхностей, находящихся в дальней зоне ПЭП. Для иммерсионного ПЭП используется эхосигнал от плоского отражателя в дальней зоне (дна иммерсионной ванны).

Форма эхоимпульса (эхоимпульс, импульсная характеристика) фиксируется как эхосигнал от отражателя, имеющий максимальную амплитуду. Эхосигнал может быть получен как при ручном или автоматизированном сканировании ПЭП под управлением оператора с фиксацией эхосигнала, имеющего максимальную амплитуду, так и при автоматическом сканировании ПЭП по заданной траектории.

Длительность эхоимпульса определяется по огибающей эхоимпульса по уровню 10% от максимума огибающей; огибающая вычисляется путём дополнения действительной части эхосигнала мнимой частью посредством преобразования Гильберта и взятием модуля полученных комплексных чисел.

Амплитудно-частотная характеристика (спектральная характеристика) рассчитывается как преобразование Фурье от импульсной характеристики. Шаг дискретизации при расчете спектральной характеристики составляет не менее 0,05 МГц.

Полоса пропускания (полоса частот) определяется по уровню минус 6 дБ от максимума спектральной характеристики.

Эффективная частота (центральная частота) рассчитывается как частота, при которой спектральная характеристика имеет максимальное значение (в соответствии с ГОСТ 23702) или как среднее геометрическое от значений нижней и верхней границ полосы пропускания (в соответствии с EN 12668-2).

Относительная полоса частот рассчитывается как отношение центральной частоты к полосе пропускания и выражается в процентах.

Импульсный коэффициент двойного преобразования (эхо-импульсная чувствительность) рассчитывается как

$$K_{UU}'' = 20 \lg \left| k \frac{U_m}{U_u} \right|,$$

где U_m – размах амплитуды донного эхосигнала от плоского отражателя в дальней зоне; U_u – размах амплитуды зондирующего импульса, в Вольтах. Измерение амплитуд происходит в автоматическом режиме. При вычислении коэффициента двойного преобразования учитывается коэффициент $k = \Delta f_u / \Delta f$ равный отношению полосы частот зондирующего импульса по уровню минус 6 дБ и полосы пропускания ПЭП. Данный коэффициент учитывает независимость коэффициента двойного преобразования, измеряемого системой от формы зондирующего импульса.

При задании коэффициента затухания ультразвука в акустической нагрузке δ (дБ/мм), вычисляется поправка к коэффициенту двойного преобразования $\gamma = \delta \cdot z$, где z – расстояние до отражателя.

Подавление помех излучатель-приемник (для раздельно-совмещенных ПЭП) измеряется в автоматическом или ручном режиме как отношение амплитуды эхосигнала от поверхности ввода к амплитуде донного эхосигнала. Данный параметр должен составлять не менее 30 дБ по EN 12668-2.

В соответствии с требованием методик проверки штатных средств дефектоскопии рельсов, в число определяемых параметров ПЭП был введен **опорный уровень** – коэффициент усиления приемного тракта при выявлении отверстия диаметром 6 мм в СО-2 или СО-3Р на глубине 44 мм. Расчет выполняется путем умножения амплитуды донного сигнала на коэффициент, рассчитанный по формулам акустического тракта [10]:

$$k = \sqrt{\frac{\lambda}{S} \frac{4}{rd} \left(\frac{h}{\cos \alpha} \right)^3},$$

где r – расстояние до донной поверхности (полуцилиндрической), h, d – глубина и диаметр отверстия бокового сверления, α – угол ввода, S – площадь пьезоэлемента (многого), λ – длина волны.

Параметры призмы

Стрела в основной плоскости (по оси X) автоматически определяется как координата точки относительно передней грани, в которой наблюдается максимальное значение амплитуды эхосигнала от цилиндрической или полусферической поверхности образца при перемещении ПЭП вдоль оси X. Данный метод не соответствует приведенному в ГОСТ 23702 методу измерения по двум отверстиям бокового сверления на разной глубине, однако соответствует EN 12668-2 и сложившейся практике, в частности, отраженной в ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые» [8].

Стрела в дополнительной плоскости (по оси Y) автоматически определяется как координата точки относительно центра передней грани, в которой наблюдается максимальное значение амплитуды эхосигнала от полусферической поверхности образца при перемещении ПЭП вдоль оси Y. Для определения стрелы наклонного ПЭП привязка выполняется к центру передней грани ПЭП, для прямого ПЭП предпочтительно выполнять привязку к геометрическому центру ПЭП. Таким образом, для прямого ПЭП может быть вычислено **смещение луча** (параметр, измеряемый по EN 12668-2) как $e = \sqrt{l_x^2 + l_y^2}$, где l_x, l_y стрелы по осям X и Y измеренные на полусферическом образце при осуществлении привязки к геометрическому центру ПЭП.

Точка выхода луча может быть отмечена на корпусе ПЭП с использованием измеренного значения стрелы по оси X или нанесена оператором на стадии получения ручной настройки максимальной амплитуды эхосигнала от цилиндрической или полусферической поверхности образца по риску в геометрическом центре стандартного образца.

Время распространения (задержки) в призме (акустической задержке) автоматически вычисляется по времени прихода эхосигнала от отражателя, заданному расстоянию до отражателя и скорости звука в образце. Рассчитывается время, соответствующее пробегу импульса в одном направлении. По величине времени задержки в призме целесообразно оценивать степень износа протектора.

Координаты центра пьезоэлемента по осям X и Z рассчитываются через стрелу по оси X и время задержки в призме. Корректное определение этих параметров возможно только при задании правильной скорости звука в призме.

Параметры диаграммы направленности и поля

Для расчета **диаграммы направленности (ДН) в основной плоскости (угол ввода, ширина диаграммы направленности)** возможно использование двух различных алгоритмов, что определяет ход всей процедуры калибровки.

Рис. 3

В **одноэтапном режиме** калибровки диаграмма направленности рассчитывается по набору эхосигналов от цилиндрической поверхности стандартного образца (например, СО-3, СО-3Р, V1), что эквивалентно измерению эхосигналов от отверстия бокового сверления на глубине 15 или 44 мм. Это позволяет применить стандартную методику определения диаграммы направленности в соответствии с ГОСТ 23702. Таким образом, при одноэтапном режиме калибровки требуется регистрация единственного В-скана. Подробное обоснование данного метода измерения диаграммы направленности,

основанного на методе акустической голографии, будет изложено в отдельной статье. Здесь же ограничимся демонстрацией сопоставления экспериментально измеренных эхосигналов от отверстия в СО-2 и эхосигналов, пересчитанных по результатам измерения эхосигналов от цилиндрической поверхности образца СО-3 (см. Рис. 3). Среднеквадратическое отклонение амплитуд пространственных эхосигналов не превосходит 5%.

В *двухэтапном режиме* калибровки на первом этапе при отражении от цилиндрической поверхности стандартного образца СО-3 определяется стрела ПЭП и все параметры импульса. На втором этапе по измеренным в автоматическом режиме эхосигналам, отраженным от отверстия бокового сверления в образце СО-2 на глубине 15 или 44 мм, с учетом расстояния от точки выхода луча до проекции центра отверстия на поверхность ввода ультразвука автоматически определяется диаграмма направленности.

В обоих случаях угол ввода определяется как угол, отвечающий максимуму диаграммы направленности, верхняя и нижняя границы диаграммы направленности определяются по уровню минус 6 дБ от максимума диаграммы направленности.

В результате экспериментов, выполненных на двенадцати ПЭП разных типов с многократным повторением измерений, было показано, что среднеквадратическая погрешность измерения угла ввода при одноэтапном режиме калибровки не превышает погрешности при двухэтапном режиме калибровки и почти **в два раза меньше** среднеквадратической погрешности традиционной ручной методики измерения угла ввода. В соответствии с ГОСТ 23702 допускается применять методы и средства измерений параметров ПЭП, отличные от указанных в стандарте, если это не увеличивает погрешность измерений, но при этом трудоемкость одноэтапного режима значительно меньше, поэтому этот режим рекомендуется в качестве основного.

Кроме того, определение угла ввода на СО-3 более предпочтительно в силу следующих обстоятельств:

- отсутствует необходимость отстройки от сигналов обегания и соскальзывания, трансформированных импульсов, реверберационных шумов;
- снижаются требования к постоянству акустического контакта за счет существенного сокращения зоны сканирования (до величины сопоставимой с шириной пьезопластины);

При калибровке иммерсионных ПЭП в качестве отражателя выступает ненаправленный отражатель – стержень с полусферическим концом в иммерсионной ванне, который может находиться в ближней или дальней зоне ПЭП. Диаграмма направленности рассчитывается по алгоритму, реализованному в системе АВГУР 4.4

путем разложения многочастотных голограмм от ненаправленного отражателя в пространственный спектр плоских волн (метод угловых спектров [9]).

При использовании полусферического образца (или в иммерсионном режиме) и при обеспечении сканирования по координате Y , возможен расчет **диаграммы направленности в дополнительной плоскости** по тем же принципам, что и ДН в основной плоскости с переходом от одномерного пространственного преобразования Фурье к двумерному. Отметим, что в терминологии EN 12668-2 угол ввода в дополнительной плоскости называется «угол скоса». Далее изложено описание алгоритма, позволяющего рассчитать произвольное сечение трехмерной диаграммы направленности:

1. Выполняется регистрация эхосигналов $p(x, y, t)$, где x, y – координаты точки ввода ПЭП при сканировании относительно центра отражателя в мм, t – время прихода эхосигнала в мкс.

2. Через преобразование Фурье во времени из эхосигналов рассчитываются многочастотные голограммы:

$$h(x, y, f) = \mathfrak{F}_t(p(x, y, t)), f \in (f_{\min}, f_{\max}),$$

где f частота в МГц, f_{\min} и f_{\max} границы частотной характеристики ПЭП.

3. Через двумерное пространственное преобразование Фурье рассчитывается пространственный спектр голограмм:

$$H(k_x, k_y, f) = \mathfrak{F}_{xy}(h(x, y, f)), f \in (f_{\min}, f_{\max})$$

4. Из двумерного спектра голограмм на частоте f может быть извлечено любое сечение диаграммы направленности. Частоте f соответствует волновое число $k = 2 \cdot 2\pi / \lambda$, где $\lambda = c / f$ длина волны, умножение на двойку учитывает совмещенный режим регистрации, то есть соответствует расчету диаграммы направленности излучения-приема. Сечение диаграммы направленности излучения-приема $\Theta^2(\alpha, \beta, f)$ на частоте f может быть вычислено следующим образом.

Определяется угол азимутального разворота диаграммы направленности относительно оси X сканирующего устройства (в случае если ось X сканирующего устройства и ось X системы координат ПЭП совпадают, то этот угол является углом ввода в дополнительной плоскости):

$$\beta^* = \arctan 2(k_{y_{\max}}, -k_{x_{\max}}),$$

где $k_{x_{\max}}, k_{y_{\max}}$ – волновые числа, соответствующие точке спектра $H(k_x, k_y, f_y)$ с максимальным значением амплитуды, где f_y эффективная частота эхоимпульса (см. Рис. 4 с пояснением обозначений).

Для диаграммы направленности в основной плоскости при фиксированном азимутальном угле разворота β^* :

Рис. 4

$$\Theta^2(\alpha, \beta^*, f) = H(k_x^\alpha, k_y^\alpha, f), \text{ где } \begin{cases} k_x^\alpha = -k \sin \alpha \cos \beta^* \\ k_y^\alpha = k \sin \alpha \sin \beta^* \end{cases}$$

Для диаграммы направленности в дополнительной плоскости при фиксированном угле ввода в основной плоскости α^* и фиксированном азимутальном угле β^* (см. Рис. 7 с пояснениями):

$$\Theta^2(\alpha^*, \beta, f) = H(k_x^\beta, k_y^\beta, f), \text{ где } \begin{cases} k_x^\beta = k(\sin \alpha^* \cos \beta^* + \sin \beta^* \sin \beta) \\ k_y^\beta = k(\sin \alpha^* \sin \beta^* + \cos \beta^* \sin \beta) \end{cases}$$

Рис. 5

5. Сумма парциальных диаграмм направленности по всем частотам составляет импульсную диаграмму направленности:

Рис. 6

$$\Theta^2(\alpha, \beta) = \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \Theta^2(\alpha, \beta, f)$$

На Рис. 6 представлен пример рассчитанных диаграмм направленности в основной и дополнительной плоскости для ПЭП типа П-121-2,5-70.

Эффективный размер пьезоэлемента рассчитывается по другим известным параметрам ПЭП: ширине диаграммы направленности, центральной частоте и скорости звука в среде. Расчет проводится либо в соответствии с формулами, рекомендованными EN 12668-2 либо по формулам, принятым в практике УЗК в России [10].

Величина ближней зоны (расчетная) определяется по эффективным размерам пьезопластины, центральной частоте, углу наклона призмы и скорости звука в среде. Расчет проводится в соответствии с формулами, принятыми в практике УЗК. Расчетное значение соответствует величине ближней зоны вдоль акустической оси ПЭП, без учета угла ввода. Сравнение способов расчета эффективных размеров пьезоэлементов и величины ближней зоны, изложенных в российском и европейском стандартах представлено в статье В.Н. Данилова и И.Н. Ермолова [11].

АРД-диаграммы рассчитываются автоматически на основании следующих предположений:

- реальный излучатель (приемник) акустических колебаний можно заменить на набор точечных излучателей (приемников);
- протяженный отражатель можно заменить на набор точечных отражателей;
- акустические колебания распространяются в полупространстве однородной жидкой среды со скоростью распространения волн соответствующей скорости продольных или поперечных волн в твердом образце.

Алгоритм расчета АРД-диаграмм заключается в выполнении следующих шагов:

- для точечного источника на границе полупространства однородной жидкой среды вычисляются таблицы значений диаграмм направленности;
- дефект (модель плоскодонного отверстия на требуемой глубине) заменяется на набор точечных отражателей;
- для каждого отражателя вычисляются передаточные функции излучателя и приемника;
- после операции свертки полученных значений функций с эталонным эхоимпульсом рассчитывается результирующий эхосигнал, эквивалентный эхосигналу от плоскодонного отверстия.
- все АРД-диаграммы нормируются по амплитуде эхосигнала от опорного отражателя (в предлагаемой методике по донному сигналу).

Входными данными для расчета АРД-диаграмм являются реальные, определенные на предыдущем этапе калибровки, параметры преобразователя: эффективная частота, эффективные размеры пьезопластины, угол ввода, длительность эхоимпульса. В ближней зоне преобразователя необходимо учитывать сложную структуру акустического поля, поэтому в каждом рассчитываемом сечении определяется максимальный сигнал от «пробного» отражателя. Такой метод расчета повторяет реальную методику экспериментального определения АРД-диаграмм. Алгоритм поддерживает расчет АРД-диаграмм совмещенных и раздельно-совмещенных ПЭП. Пример рассчитанного набора АРД-диаграмм для ПЭП поперечных волн типа П-121-2,5-50 с круглой пластиной радиусом 6 мм приведен на Рис. 8.

Набор эквивалентных площадей, для которых по умолчанию рассчитываются АРД-диаграммы составляет ряд $1 - 2 - 3 - 3.5 - 5 - 7 - 10 \text{ мм}^2$, но возможно задание и иного ряда эквивалентных площадей. Более подробное обоснование метода расчета АРД-диаграмм содержится в статье [12]. Планируется публикация с анализом точности предлагаемого алгоритма расчета АРД-диаграмм для различных типов ПЭП.

Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика, РШХ) сохраняется и отображается вместе с АРД диаграммами. Усиление приемного тракта при записи РШХ рекомендуется устанавливать таким, чтобы шумы были видны на экране, то есть допускается увеличивать усиление в сравнении с усилением, соответствующим определению чувствительности ПЭП. В момент записи РШХ в соответствии с ГОСТ 3702 ПЭП должен быть нагружен на акустическую нагрузку, но в случае если у ненагруженного ПЭП амплитуда шума увеличивается, допускается записывать РШХ ненагруженного ПЭП. В соответствии с EN 12668 ПЭП не должен быть нагружен и его

рабочая поверхность должна быть насухо вытерта. По функции шумов в указанном диапазоне (по умолчанию 10-100 мкс) рассчитывается *уровень шума* в мВ.

Мертвая зона согласно ГОСТ 23829-85 [13], определяется как часть объекта, прилегающая к поверхности ввода, в которой не обнаруживаются несплошности. Методика определения мертвой зоны, реализованная в системе заключается в автоматическом определении глубины, при которой АРД-диаграмма, соответствующая эквивалентной площади отражателя 3 мм² на 6 дБ превышает амплитуду шумов, хранящуюся в РШХ. В результате определяется принадлежность величины мертвой зоны одному из стандартных диапазонов «3-6 мм», «6-8 мм», «8-12 мм», «12-24 мм» или «более 24 мм». Необходимо учитывать, что мертвая зона – это параметр системы «*дефектоскоп + ПЭП*», поэтому результат измерения мертвой зоны системой может не быть воспроизведен на определенном дефектоскопе.

Рис. 7

Фокусное расстояние фокусирующего иммерсионного ПЭП рассчитывается как глубина максимума амплитуды поля излучения, восстановленного методом угловых спектров [14. 15] по эхосигналам от точечного отражателя в ближней зоне. Так на Рис. 7 показано поле иммерсионного ПЭП с эффективной частотой 4 МГц и с пластиной диаметром 10 мм, рассчитанное по эхосигналам, измеренным от отражателя в ближней зоне. При необходимости фокусное расстояние может быть измерено как глубина, соответствующая максимуму экспериментально полученной АРД-диаграммы.

Для нефокусирующего ПЭП в качестве фокуса принимается максимум рассчитанной АРД-диаграммы, то есть величина ближней зоны.

Протяженность фокальной области (длина фокуса, ширина фокуса в основной и дополнительной плоскости) измеряется как разница координат соответственно z, x и y , при которых амплитуда от отражателя превышает уровень минус 6 дБ от максимума, соответствующего фокусному расстоянию. Здесь также могут быть использованы либо АРД-диаграммы, либо восстановленное поле ПЭП.

Рис. 8

Заключение

В итоге процедура калибровки ПЭП с применением системы калибровки АВГУР 5.4 сведена к измерению единственного файла с эхосигналами, записи реверберационно-шумовой характеристики и дальнейшему автоматическому расчету параметров.

Время выполнения измерений и определения основных параметров одного серийного ПЭП до выдачи паспорта при использовании однокоординатного сканера не превышает 2 минут. При использовании двухкоординатного сканера и определении

параметров в дополнительной плоскости время на калибровку одного ПЭП составляет около 15 минут. Таким образом, система позволяет кардинально сократить время проведения калибровки и значительно упростить процедуру калибровки, что позволяет снизить требования к квалификации оператора, проводящего калибровку.

Параметры и характеристики ПЭП, указанные в ГОСТ 23702-90 и не определяемые системой при поставке в стандартной комплектации:

- передаточные функции по току и по акустическому давлению;
- электрический импеданс (предлагается использовать отдельный прибор, являющийся средством измерения);
- функция влияния шероховатости и кривизны (требуются специальные образцы);
- функция влияния акустического контакта (требуется несложная доработка программного обеспечения).

Система АВГУР 5.4 прошла испытания типа средств измерений, внесена в Государственный реестр средств измерений (под номером 36623-07) и поэтому может использоваться как средство для метрологической поверки ПЭП. Система прошла ведомственные испытания в Департаменте пути и сооружений ОАО «РЖД», на которых была показана пригодность системы для выполнения поверки ПЭП, входящих в состав штатных средств дефектоскопии рельсов. На Рис. 9 представлен пример паспорта ПЭП, входящего с комплект рельсового дефектоскопа.

Рис. 9

Анализ погрешностей измерения параметров ПЭП будет выполнен во второй части статьи, но следует отметить, что предел допустимой погрешности измерений параметров ПЭП не превышает требований, указанных в ГОСТ 23702.

В заключение авторы выражают признательность И.Н. Ермолову, инициировавшему работу по сопоставлению российских и европейских стандартов на методы испытаний ПЭП и предложившему создание системы, определяющей параметры ПЭП по обоим стандартам.

Базулин Андрей Евгеньевич

Базулин Евгений Геннадиевич

Вопилкин Алексей Харитонович

Тихонов Дмитрий Сергеевич

11 марта 2009 года

Рисунки

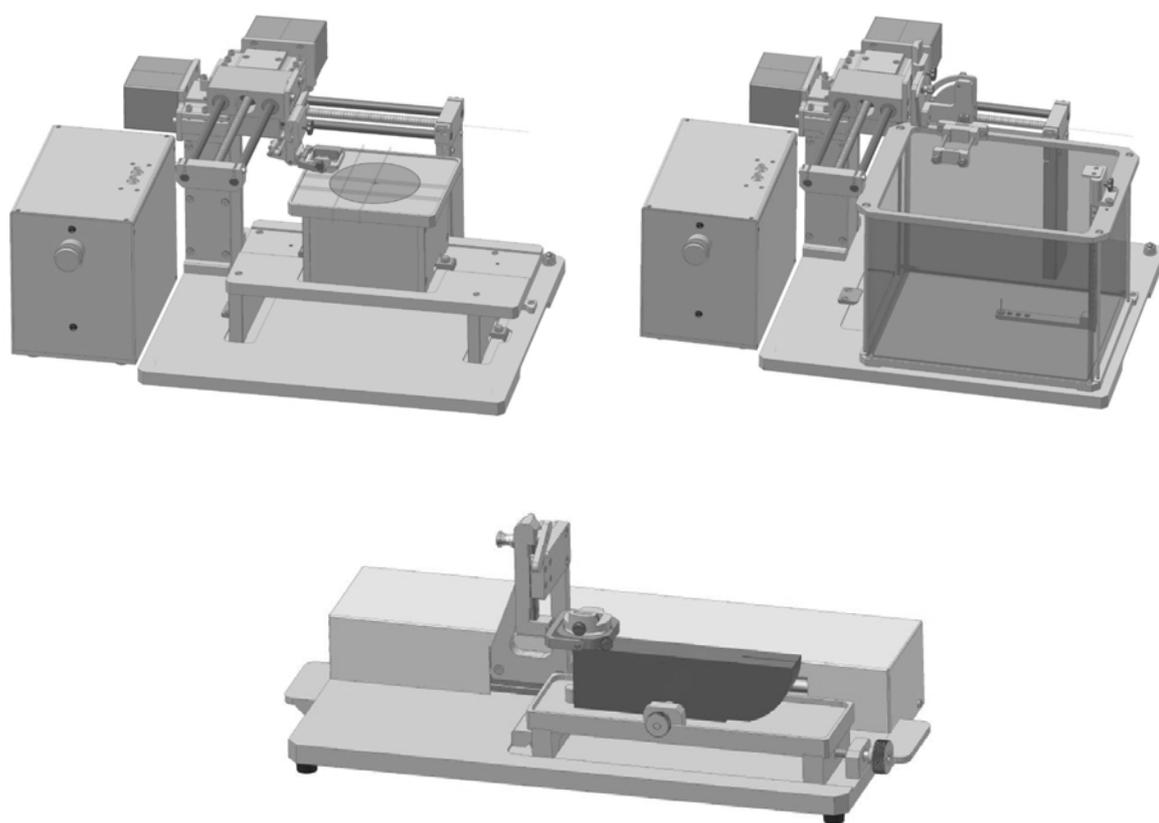


Рис. 1 Общий вид системы калибровки АВГУР 5.4. Вверху с двухкоординатным сканером, с иммерсионной ванной, внизу с однокоординатным сканером и стандартным образцом СО-3Р.

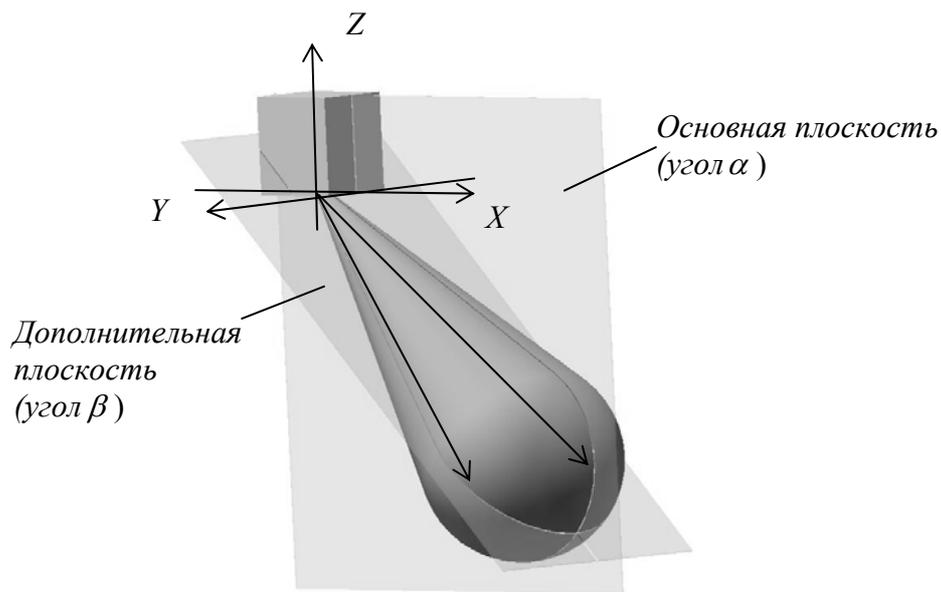


Рис. 2 Система координат и обозначения

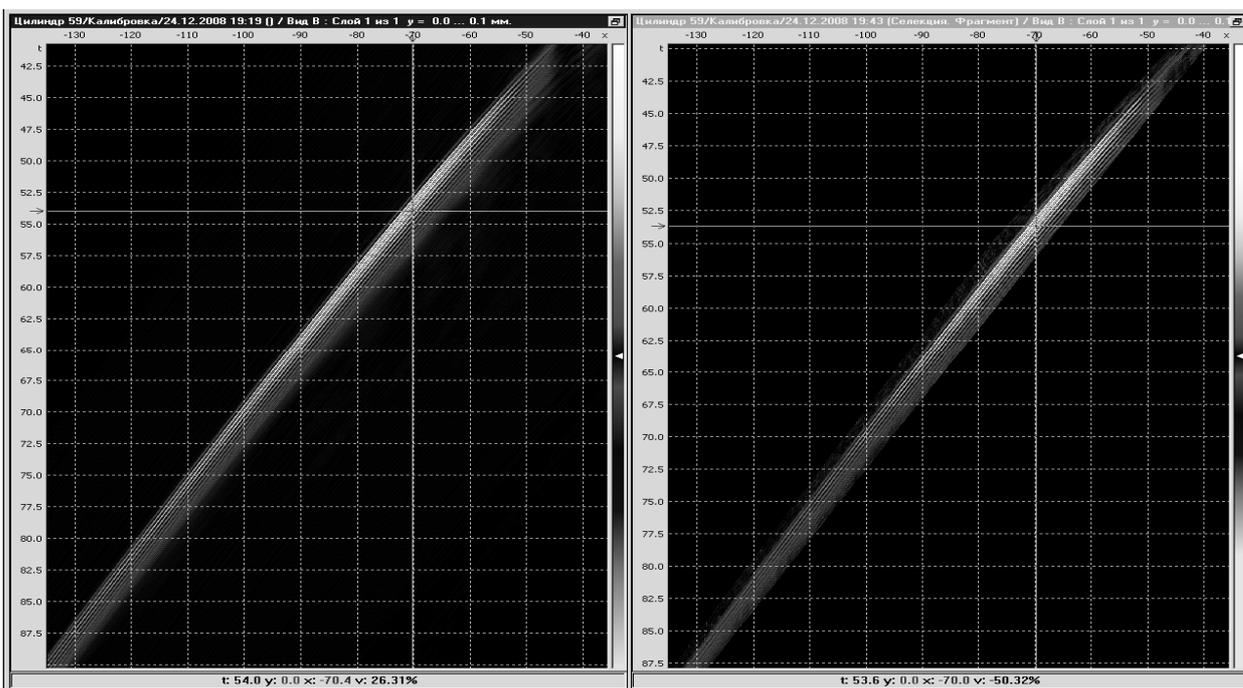


Рис. 3 В-сканы от отверстия в СО-2 на глубине 44 мм: слева рассчитанные по В-скану от цилиндрической поверхности СО-3, справа экспериментальный В-скан. Можно видеть хорошее совпадение В-сканов и, следовательно, рассчитанных диаграмм направленности.

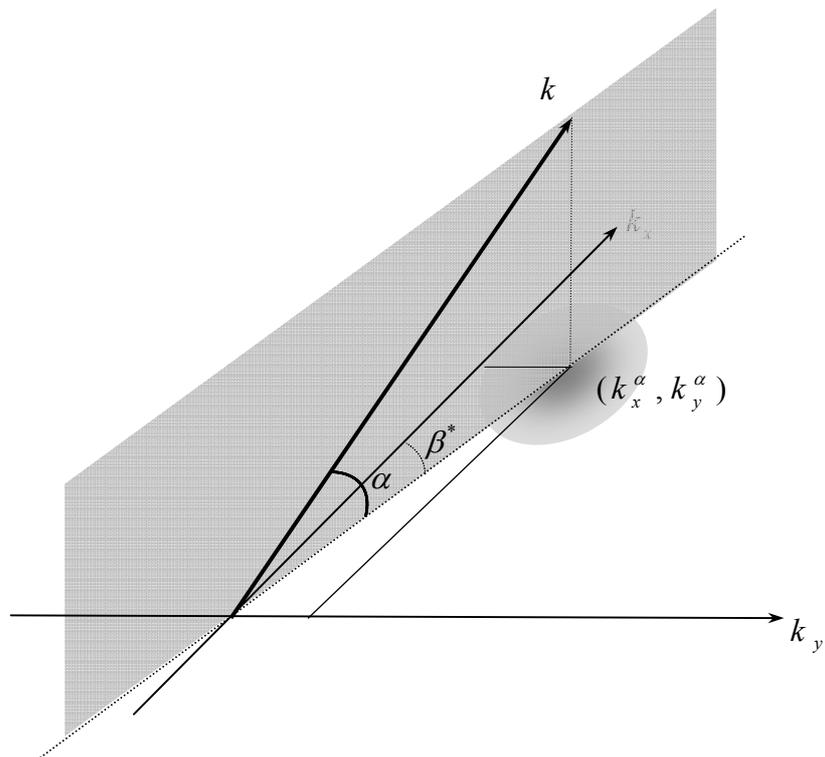


Рис. 4 Пояснение к расчету сечения трехмерной диаграммы направленности основной плоскостью. Схематично в виде залитого градиентом эллипса показана амплитуда двухмерного спектра голограмм в плоскости $k_x k_y$ на эффективной частоте f_0 . Вращая волновой вектор k под различными углами α в основной плоскости, заданной углом β^* и показанной серым цветом, вычисляя проекцию k как точку с координатами k_x^α, k_y^α , можно получить множество точек спектра, отвечающих диаграмме направленности в основной плоскости. В данном случае показано положение, соответствующее максимуму спектра, то есть максимуму диаграммы направленности в основной плоскости (α^*).

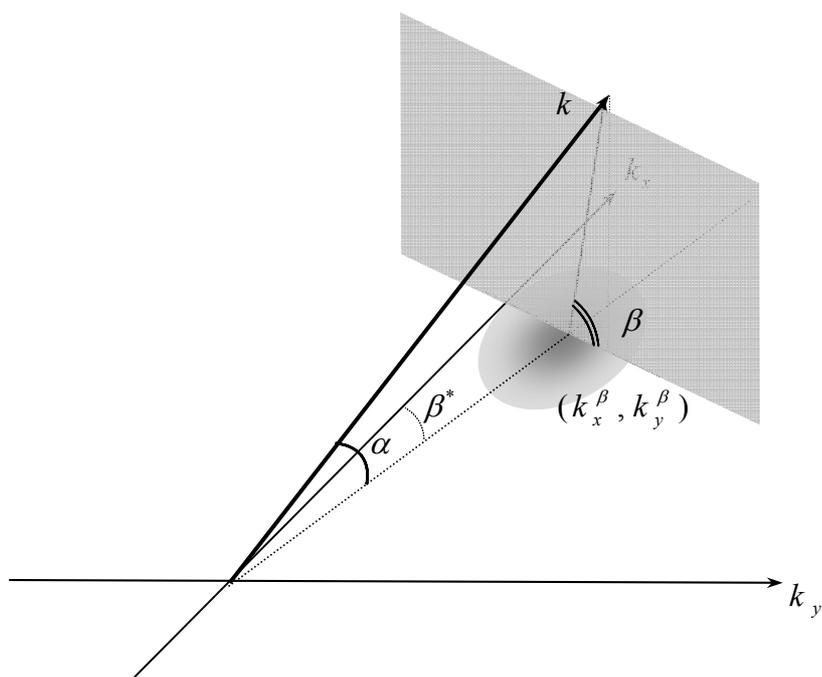


Рис. 5 Пояснение к расчету сечения трехмерной диаграммы направленности дополнительной плоскостью. Схематично в виде залитого градиентом эллипса показана амплитуда двухмерного спектра голограмм в плоскости $k_x k_y$ на эффективной частоте f_s . Перемещая конец волнового вектора k в дополнительной плоскости, перпендикулярной к основной (соответствующей углу α^*) так, что его проекция на дополнительную плоскость проходит различные углы β ; вычисляя проекцию k как точку с координатами k_x^β, k_y^β , можно получить множество точек спектра, отвечающих диаграмме направленности в дополнительной плоскости.

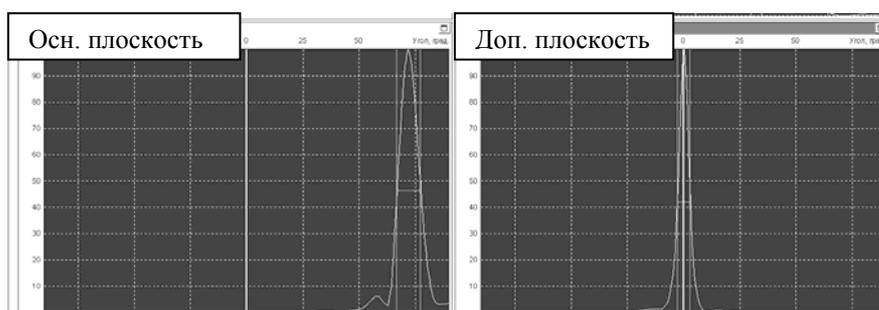


Рис. 6 Пример результатов расчета диаграммы направленности в основной и в дополнительной плоскости

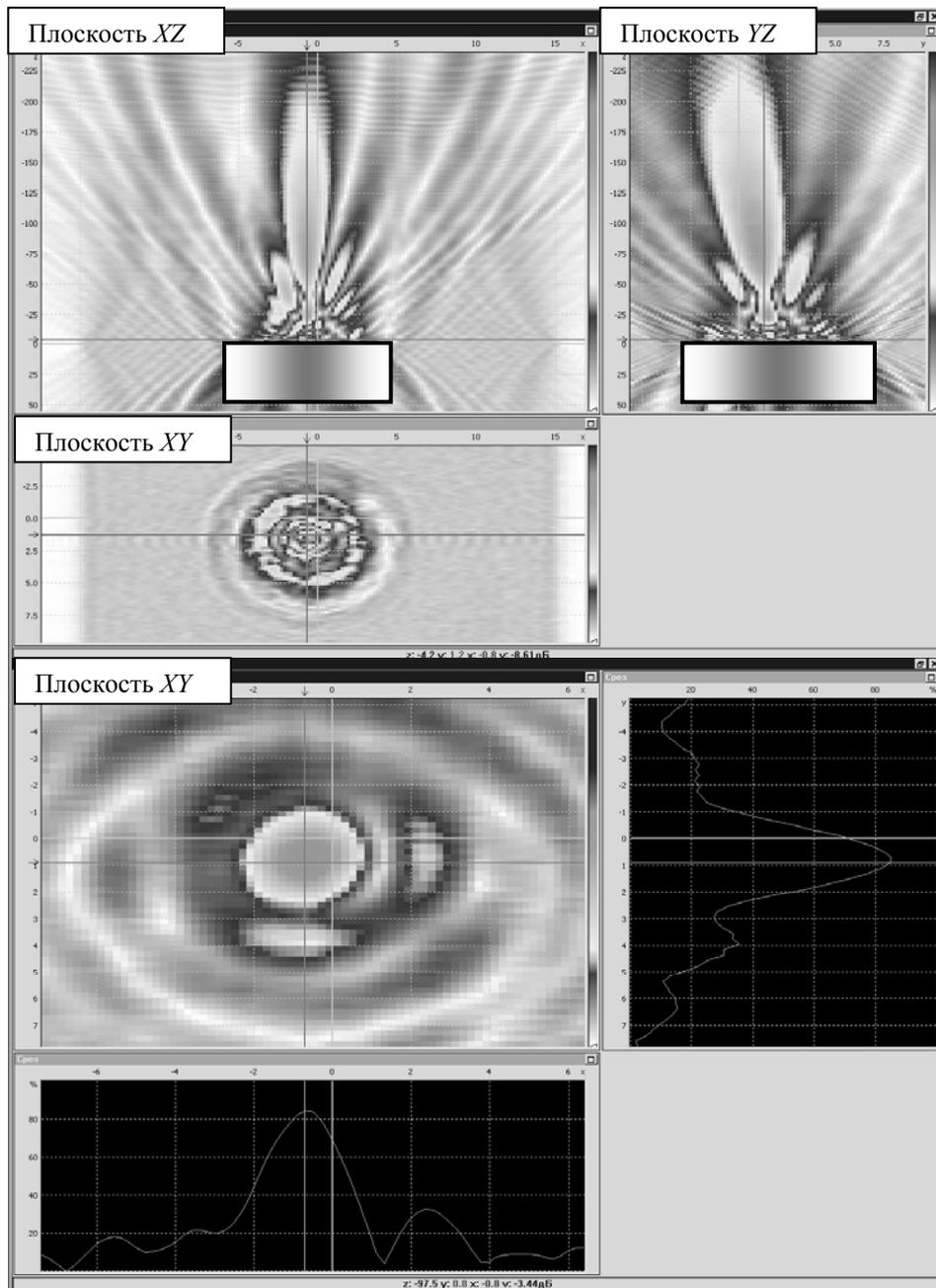


Рис. 7 Трехмерные сечения поля иммерсионного ПЭП с центральной частотой 4 МГц и диаметром пластины 10 мм. Поле восстановлено на эффективной частоте. Схематично показано расположение ПЭП. Вверху – сечение поля при $Z = 0$, восстанавливается изображение пьезопластины. Внизу при Z соответствующем фокусному расстоянию определяется диаметр фокусного пятна по уровню минус 6 дБ как 2,5 мм.

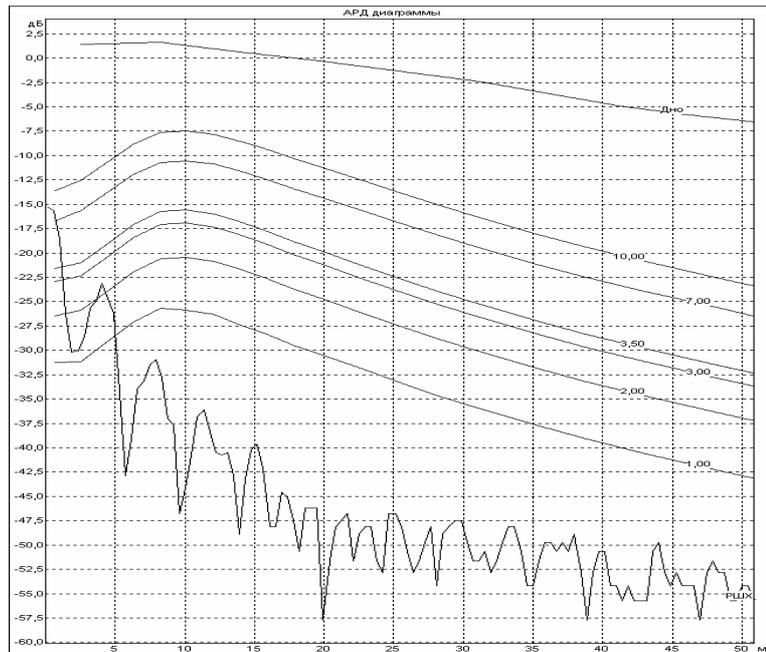


Рис. 8 Пример АРД диаграмм ПЭП типа П-121-2,5-50, рассчитанных до глубины 50 мм с наложением реверберационно-шумовой характеристики.

Система калибровки пьезоэлектрических преобразователей АБИУР 5.4 №0801

Паспорт преобразователя: П-121-65-РДМ1113

Изготовитель: РДМ
 Номер пьезоэлемента приемника: 1 Номер пьезоэлемента излучателя: 1
 Контрольный образец: СО-ЗР № 273-06
 Результат калибровки: ГОДЕН

Параметр	Фактическое значение	Допустимые значения
Угол ввода, °	65.5	63.0 ... 67.0
Ширина диаграммы направленности, °	12.0	8.0 ... 18.0
Стрела по оси X, мм	11.1	8.0 ... 13.0
Эффективная частота, МГц	2.50	2.25 ... 2.75
Коэффициент двойного преобразования, дБ	-44.0	не менее -53.0
Уровень шума, мВ	52.6	не более 100.0
Мертвая зона, мм	3.0	не более 3.0
Опорный уровень чувствительности для отверстия на глубине 44 мм, дБ*	36	

Калибровка выполнена оператором: Базулин Андрей Евгеньевич; Дата выполнения калибровки: 24.09.2008

* Уровень чувствительности для проведения контроля должен устанавливаться в соответствии с эксплуатационной документацией на штатные средства дефектоскопии.

Рис. 9 Пример паспорта ПЭП типа П-121-2,5-65, выданный в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на штатные средства дефектоскопии рельсов

Список литературы

- [1] ГОСТ 23702-90 «Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний»
- [2] ЕВРОПЕЙСКИЙ СТАНДАРТ. EN 12668-2:2001. Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи.
- [3] ASTM-E 1065. “Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units”.
- [4] *Тихонов Д.С.* Основные этапы автоматизированного УЗК с определением размеров дефектов системами серии «АВГУР» // В мире неразрушающего контроля. 2006. № 3 (33). С. 24-28.
- [5] *Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Бычков И.В., Вопилкин А.Х., Каплун С.М., Ломакин А.В., Пентюк М.В., Рубен Е.А., Тихонов Д.С., Штерн А.М.* Компьютерная система для исследования и паспортизации пьезопреобразователей ультразвукового неразрушающего контроля «Авгур 2.2» // Дефектоскопия. 1993. № 2. с. 43-49.
- [6] *Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С.* Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4 // Тезисы 7-ой международной конференции НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Москва, 2008, С. 113-114.
- [7] ГОСТ 26266-90 «Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования»
- [8] ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»
- [9] *Качанов Е.И., Пигулевский Е.Д., Яричин Е.М.* Методы и средства гидроакустической голографии. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [10] Неразрушающий контроль: Справочник. в 7.т. под общ. Ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль/И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
- [11] *Данилов В.Н., Ермолов И.Н.* К оценке протяженности ближней зоны прямоугольного преобразователя // Дефектоскопия, 2003, № 5, С. 3 – 8.
- [12] *Гусаров В.Р., Перлатов В.Г. Антипин В.Е.* Структурная схема дефектоскопа общего назначения // Дефектоскопия. 1984. № 12. С. 55-67.

[13] ГОСТ 23829-85 «Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения»

[14] *Ermert, H, Karg, R.* Multifrequency acoustical holography. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1979, Vol. 26, Issue 4, pp. 279-285.

[15] *Сапожников О.А., Пономарев А.Е., Смагин М.А.* Нестационарная акустическая голография для реконструкции колебательной скорости поверхности акустических излучателей // Акуст. журнал. 2006. Т52. №3. с. 385-392.