

## **Расчёт АРД диаграмм для систем ультразвукового контроля с применением фазированных решёток**

Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М.

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

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

E-mail: [bazulin@echoplus.ru](mailto:bazulin@echoplus.ru)

В статье описан подход к измерению эквивалентной площади несплошностей при ультразвуковом контроле с применением фазированных решеток путем расчёта обобщенных АРД диаграмм. Приведено описание расчетной модели, экспериментальные результаты проверки точности расчётов, сведения о применении предложенной технологии в программном обеспечении систем серии АВГУР.

Ключевые слова: ФАР, ФР, АРД, антенная решётка, пространственная регулировка чувствительности, ПРЧ

### **1. Введение**

Для выполнения ультразвукового контроля (УЗК) в промышленности все чаще применяются приборы с фазированными антенными решетками (будем далее называть их ФАР-дефектоскопами). Достоинства этих приборов заключается в высокой скорости контроля, наглядности отображения сечений объектов контроля сложной формы, возможности оценки размеров и типа несплошности. В то же время действующие нормативные документы на оценку качества изделий требуют определения эквивалентной отражающей способности несплошности. Одним из способов определения эквивалентной отражающей способности является применение АРД диаграмм.

Систематическое изучение АРД диаграмм началось в начале 1960-х годов Й. и Г. Крауткремерами [1] в Германии и И.Н. Ермоловым [2] в СССР. Были построены безразмерные диаграммы для прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). Как указано в [3] использование АРД диаграмм, как экспериментальных, так и расчётных нашло свое отражение практически во всех стандартах и методиках на проведение УЗК. АРД диаграммы используются при УЗК сварных соединений и основного металла в энергетической, нефтехимической, металлургической отраслях промышленности.

Сложность применения экспериментально определенных АРД диаграмм для ФАР-дефектоскопов заключается в необходимости настройки на множестве одинаковых отражателей, выявляемых под различными углами. Документ ASME [4] позволяет выполнить настройку на боковых отверстиях (ненаправленные отражатели), что относительно легко может быть автоматизировано, но в России для настройки чувствительности приняты плоскодонные отражатели, что вызывает определенные сложности для создания АРД диаграмм. Так для настройки чувствительности даже для ограниченного числа углов из сектора от 30 до 70 градусов, например, с шагом 5 градусов потребуется 8 паспортизованных образцов, содержащих набор одинаковых плоскодонных отражателей на разных глубинах. Кроме того, сложность заключается и том, что из-за наличия фокусировки зависимость между площадью плоскодонного отражателя и его амплитудой перестает быть линейной, поэтому для достоверной оценки отражающей способности несплошностей превышающих 1-2 длины волны, потребуется еще набор образцов с плоскодонными отражателями, имеющими разные площади.

Расчётное определение АРД диаграмм для ФАР-дефектоскопов возможно по безразмерным АРД диаграммам, но такие диаграммы построены только для режима качания луча, без фокусировки. Например, в работе [5] выполнен расчёт безразмерных АРД диаграмм для прямоугольной пьезопластины, равной по площади активной области антенной решетки. Для законов фокусировки обеспечивающих качание луча достигнуто хорошее соответствие эксперименту. Вывод о целесообразности применения пространственной регулировки чувствительности (ПРЧ) в системах, поддерживающих технологию цифровой фокусировки антенны (ЦФА) сделан в статье [6].

В рамках работ по разработке методики ультразвукового контроля трубопроводов Ду800 контура многократной принудительной циркуляции реакторной установки РБМК-1000 в ООО «НПЦ «ЭХО+» был выполнен ряд исследований, позволивший рассчитывать и применять в программе анализа данных обобщенные АРД диаграммы для ФАР-дефектоскопов (ФАР-АРД). Идея заключается в построении трёхмерной функции  $A(r, d, \alpha)$ , которая устанавливает соотношения между амплитудами эхосигналов отражённых от плоскодонного отверстия диаметром  $d$  удалённого на расстояние  $r$  от точки ввода луча с углом ввода  $\alpha$  градусов для заданного закона фокусировки (Рис. 1).

После построения обобщенной АРД диаграммы достаточно выполнить привязку чувствительности по любому плоскодонному отражателю в стандартном образце предприятия (СОП). При анализе изображения S-типа (секторном скане), извлекая из матрицы  $A$  значения амплитуд, можно измерять амплитуды отражателей в эквивалентных площадях. Выполняя поточечное умножение элементов изображения S-типа на значения матри-

цы  $A$  (с учетом интерполяции), можно выполнить операцию пространственной регулировки чувствительности по всему объему проконтролированного металла для определённого диаметра плоскодонного отражателя.

В статье [7] отмечено, что допустимая в практике УЗК погрешность измерения амплитуды и расчёта АРД диаграмм составляет порядка 2 дБ, поэтому такой показатель погрешности был принят как целевой.

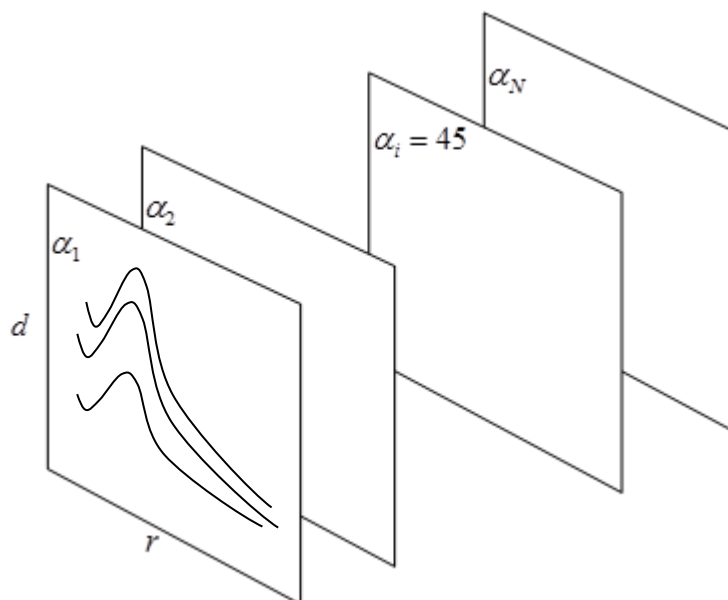


Рис. 1 Схематичное отображение обобщенных АРД диаграмм  $A(r, d, \alpha)$ .

## 2. Расчётная модель

Акустический тракт ФАР-дефектоскопа для заданных законов фокусировки можно рассчитать, используя геометрическую теорию дифракции [8] в скалярном приближении, когда продольная и поперечная волна рассматриваются независимо друг от друга. Такой подход справедлив при условии, что длина волны много меньше характерных размеров рассчитываемой модели, а скорость измерения поля, волнового вектора и коэффициента преломления на расстоянии равном длине волны намного меньше самих значений. При расчёте рассеянного поля учитывается время распространения импульса по каждому лучу, его амплитуда, зависящая как от поглощения и затухания ультразвука, так и от коэффициентов прохождения. Предполагается, что призма и объект контроля состоят из изотропных материалов.

Рассмотрим более подробно принципы расчёта ультразвуковых полей при излучении, рассеивании на несплошностях и приёме отражённых волн. На первом этапе нужно рассчитать излучённое антенной решёткой поле. Излучающая поверхность пьезоэлемента

разбивается на множество не взаимодействующих между собой точечных излучателей в узлах сетки, шаг которой зависит от скорости звука и частоты излучённого эхосигнала. Предполагается, что поверхность пьезоэлемента движется синхронно без учёта таких эффектов, как радиальные колебания пластины, дифракционное излучения её краёв. При моделировании работы антенных решёток каждый её пьезоэлемент рассматривается как абсолютно автономный, не взаимодействующий с другими пьезоэлементами. Однако поверхность  $i$ -ого пьезоэлемента может колебаться с разной амплитудой и с заданной задержкой

$$p_i(\mathbf{r}_{irm}, t) = A_i(\mathbf{r}_{irm}) \cdot s(t) \otimes \delta(t - t_{irm,i}) \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_{irm}$  – вектор на поверхности излучателя,  $s(t)$  – форма излучённого сигнала,  $t_{irm,i}$  – индивидуальная задержка  $i$ -ого пьезоэлемента,  $A_i(\mathbf{r}_{irm})$  – распределение амплитуды колебаний поверхности пьезоэлемента. Понятно, что времена задержек  $t_{irm,i}$  зависят от выбранного закона фокусировки, и поэтому при смене закона расчёты АРД диаграммы нужно провести заново.

Пусть для излучения и приёма ультразвуковых волн используется антенная решётка, установленная на призму с углом наклона  $\beta$  из материала со скоростями продольной и поперечной волны, плотностью и коэффициентом затухания продольной волны  $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w, \delta_{w,l}\}$  (см. Рис. 2). Антенная решётка состоит из  $N$  элементов размерами  $\delta x$ , расположенных на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга. Акустические свойства объекта контроля задаются списком  $\{c_l, c_s, \rho, \delta_l, \delta_s\}$ . Местоположения излучателей относительно центра переднего ребра призмы описываются векторами  $\mathbf{r}_{irm}$ , один из которых показан на Рис. 2 стрелкой синего цвета. Траектория распространения импульса описывается парой векторов  $\mathbf{r}_{irm,1}$  и  $\mathbf{r}_{irm,2}$ , которые на Рис. 2 показаны стрелками красного цвета. Ось  $y$  расположена перпендикулярно плоскости рисунка.

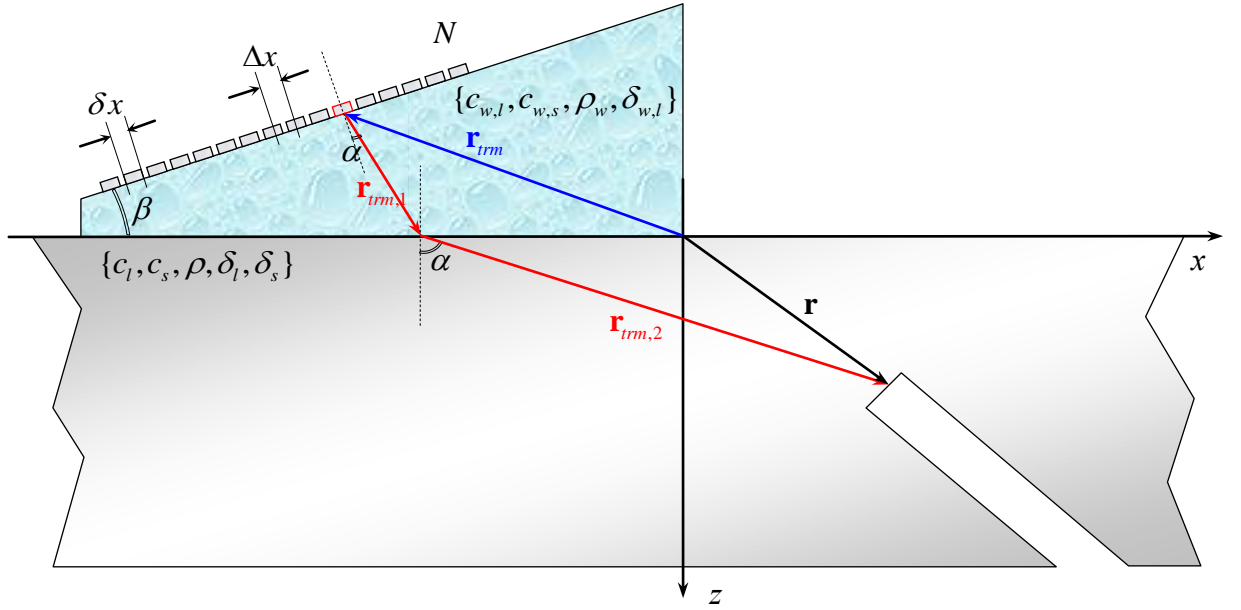


Рис. 2 К расчёту АД диаграммы для ФАР-дефектоскопа.

Затухание для каждому лучу  $\mathbf{r}_{irm,1}$  и  $\mathbf{r}_{irm,2}$  траектории учитывалось в частотно-независимом варианте как ослабление по формуле  $e^{-|\mathbf{r}_{irm,1}|\delta_{w,l}-|\mathbf{r}_{irm,2}|\delta}$ . Таким образом, излучённое  $i$ -ой пьезопластиной акустическое поле в объект контроля, используя Рэлеевское приближение общей формулы Кирхгофа, можно записать в следующем виде

$$p_i(\mathbf{r}, t) = \int_{S_{irm,i}} D_{w,o}(\alpha; c_w, l, c) \frac{A_i(\mathbf{r}_{irm}) \delta(t - t_{irm,i} - |\mathbf{r}_{irm,1}|/c_w - |\mathbf{r}_{irm,2}|/c)}{\left( |\mathbf{r}_{irm,2}| + |\mathbf{r}_{irm,1}| \frac{c_{w,l} \cdot \cos \alpha_w}{c \cdot \cos \alpha} \right)} e^{-|\mathbf{r}_{irm,1}|\delta_{w,l}-|\mathbf{r}_{irm,2}|\delta} d\mathbf{r}_{irm}, \quad (2)$$

где  $S_{irm,i}$  – поверхность  $i$ -ого пьезоэлемента,  $D_{w,o}(\alpha; c_w, c)$  – коэффициент прохождения по давлению из призмы в объект контроля,  $\alpha$  – угол преломления луча. Выражение в знаменателе подынтегрального выражения приближённо описывает уменьшение амплитуды импульса, в случае расположения плоскодонного отверстия в плоскости  $xz$ . Символы  $c$  и  $\delta$  могут принимать значения скорости или коэффициента затухания в зависимости от типа используемой волны. Коэффициент прохождения  $D_{w,o}(\alpha; c_w, c)$  имеет достаточно сложный вид [9], для того чтобы интеграл (2) можно было взять аналитически. Следует отметить, что формула (2) записана для случая  $\delta$ -подобного сигнала. Для получения итогового вида излучённого поля функцию  $p_i(\mathbf{r}, t)$  нужно свернуть с  $s(t)$ . Это позволяет учесть форму эхосигнала при расчёте АД диаграмм.

В докомпьютерную эпоху для оценки поведения сложных выражений типа (2) его упрощали, предполагая, как правило, что расчёты проводятся в дальней зоне, а после этого упрощённый интеграл (2) вычисляли, либо методом стационарной фазы, либо методом перевала. Так в работах [10, 11] проведён расчёт диаграммы направленности наклонного преобразователя в гармоническом варианте методом разложения поля на плоские волны (метод Вейеля-Бреховских) по формуле подобной формуле (2). Такой подход даёт глубокое понимание закономерностей формирования излучённого поля. В настоящее время, благодаря возросшей мощности компьютеров, прямой расчёт поля по формуле (2) можно провести численными методами, однако, тонкости формирования поля ускользают от внимания исследователя.

Если происходит расчёт поля антенной решётки состоящей из нескольких элементов, то для расчёта общего поля в точке  $\mathbf{r}$  нужно просуммировать результаты расчёта по формуле (2)

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^N p_i(\mathbf{r}, t) \quad (3)$$

Следующий шаг расчёта АРД диаграмм заключается в вычислении рассеянного отражателем поля. Так как решаемая задача требует расчёта только для плоскодонных отверстий, то можно воспользоваться теорией дифракции Кирхгофа (приближение физической оптики, высокочастотное приближение) [12], которая основана на следующих допущениях:

- учитывается только однократное рассеяние ультразвука на рассеивателях (без многократного перерассеяния);
- предполагается, что отражатели имеют гладкую границу, неровность которой в несколько раз больше длины волны;
- поле в «тенеиной зоне» отражателя приравнивается нулю;
- градиенты поля и функции Грина вычисляются с тем допущением, что в каждой точке границы отражателя падающее и отраженное поле аппроксимируется плоскими волнами;
- моделируются краевые условия только I или II рода.

При размерах моделируемого дефекта больше двух длины волн расчёты акустического тракта по приближению Кирхгофа отличаются от экспериментальных измерений менее чем на 0,5 дБ [13] для отражателей типа отверстия бокового сверления, плоскодонного отверстия, трещины с плоской поверхностью. Амплитуду вторичных источников волн на поверхности плоскодонного отверстия в точке  $\mathbf{r}$  можно записать в виде

$$p_s(\mathbf{r}, t) = B(\alpha_r, \alpha_t) \cdot p(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где  $B(\alpha_r, \alpha_i)$  – дифракционный коэффициент Кирхгофа,  $\alpha_r$  и  $\alpha_i$  – угол падения и отражения от элементарной площадки имитирующей поверхность плоскодонного отверстия.

И, наконец, воспользовавшись принципом взаимности [14] можно рассчитать принятое пьезоэлементом поле, рассматривая приёмник как излучатель формирующий поле на отражателе в виде плоскодонного отверстия. Это позволяет воспользоваться формулами (2) и (3), рассмотренной для описания излучённого поля, и оценить вид принятого эхосигнала отражённого от отверстия бокового сверления как

$$\overset{\leftrightarrow}{p}(t) = \int_{S_{FBH}} \int p(\mathbf{r}, t) \cdot p_s(\mathbf{r}, t-t') dt d\mathbf{r} = \int_{S_{FBH}} B(\alpha_r, \alpha_i) \left( \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{r}, t) \cdot p(\mathbf{r}, t-t') dt \right) d\mathbf{r}, \quad (5)$$

где  $S_{FBH}$  – поверхность плоскодонного отверстия. Окончательный вид эхосигнала отражённого от плоскодонного отверстия и принятого антенной решёткой можно записать в виде свёртки

$$p_{APD}(t) = s(t) \otimes \overset{\leftrightarrow}{p}(t). \quad (6)$$

Расчёт амплитуд эхосигналов для разных диаметров, глубин и углов наклона плоскодонного отверстия по формуле (6) позволяет сформировать искомый массив  $A(r, d, \alpha)$ .

В программе не реализован расчёт донной диаграммы, так как максимально допустимые отражатели обычно имеют эквивалентную площадь менее  $20 \text{ мм}^2$ , а для настройки чувствительности применяется плоскодонный отражатель. Однако, в случае необходимости, модель может быть модифицирована и для расчёта донной диаграммы.

### 3. Тестирование работы программы

Для тестирования работы программы были изготовлены два образца с плоскодонными отражателями разных диаметров, расположенных на разных глубинах. Эскиз первого образца с углом наклона 45 градусов приведён на Рис. 3. Образец с углом наклона 60 градусов аналогичен первому образцу. Плоскодонные отверстия изготавливались при просверливании отверстия обычным сверлом на заданную глубину, а затем перезаточенным сверлом дно отверстия делалось плоским. Как показал опыт работы с образцами, такая технология изготовления плоскодонных отверстий для точных измерений требует специального контроля формы их дна. Целесообразнее изготавливать плоскодонные отверстия с использованием электроэрозионных технологий. Точность соблюдения углов наклона плоскодонных отверстий должна быть не менее чем 0,5 градуса.

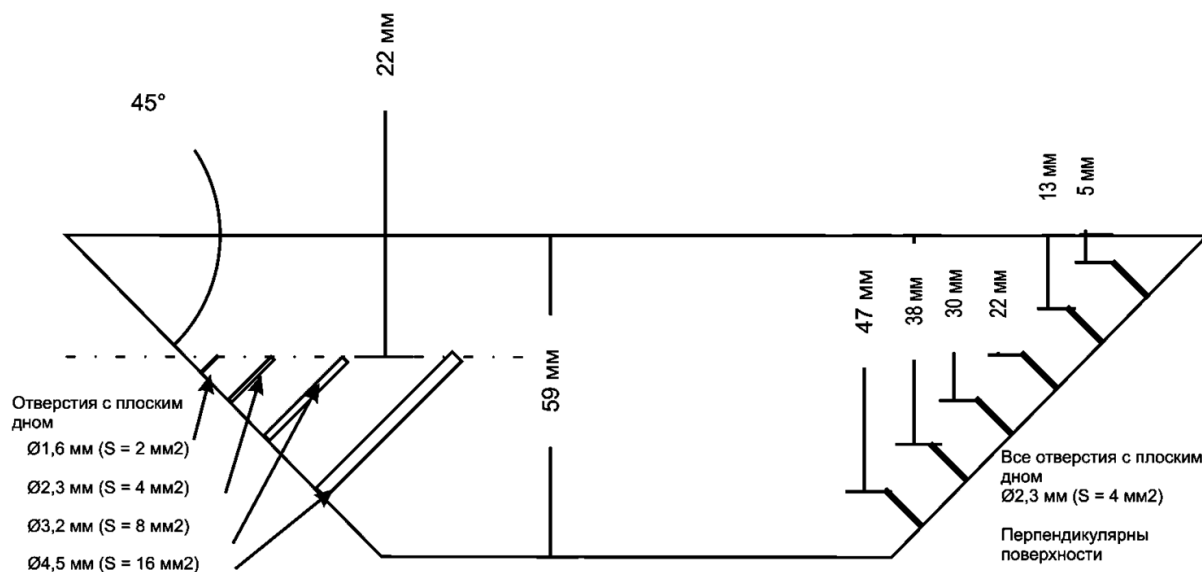


Рис. 3 Эскиз образца с углом наклона 45 градусов.

Измерения эхосигналов от плоскодонных отверстий проводилась с помощью дефектоскопа «**Omniscan MX**» с фокусировкой на глубину 30 мм, согласно требованиям разрабатываемой методики контроля. Так как результат расчёта существенно зависит от значения коэффициента затухания, то была проведена его оценка для частоты 5 МГц. Коэффициент затухания поперечной волны в образцах при расчётах считался равным  $0,005 \text{ мм}^{-1}$ , в призме SPWZ3-N55S-ИНС из рексолита полагался равным  $0,02 \text{ мм}^{-1}$ , а в призме из плексигласа полагался равным  $0,06 \text{ мм}^{-1}$ .

### 3.1. Антенная решётка типа 5L32-A11

Антенная решётка типа 5L32-A11 имела пространственную апертуру равную  $32 \times 0,6 \text{ мм}$  и была установлена на призму OM-A11-42 из плексигласа с углом наклона 42 градуса. Проверялась точность расчёта АРД диаграмм для плоскодонных отверстий площадью  $4 \text{ мм}^2$  на разных глубинах, и для плоскодонных отверстий разной площади на одной глубине 22 мм. На Рис. 4 и Рис. 5 показаны графики амплитуд эхосигналов отражённых от плоскодонных отверстий для двух образцов, измеренных как в эксперименте, так и рассчитанных по формуле (6). В качестве опорного значения использовалась амплитуда блика плоскодонного отверстия диаметром 2,3 мм расположенного на глубине 30 мм.



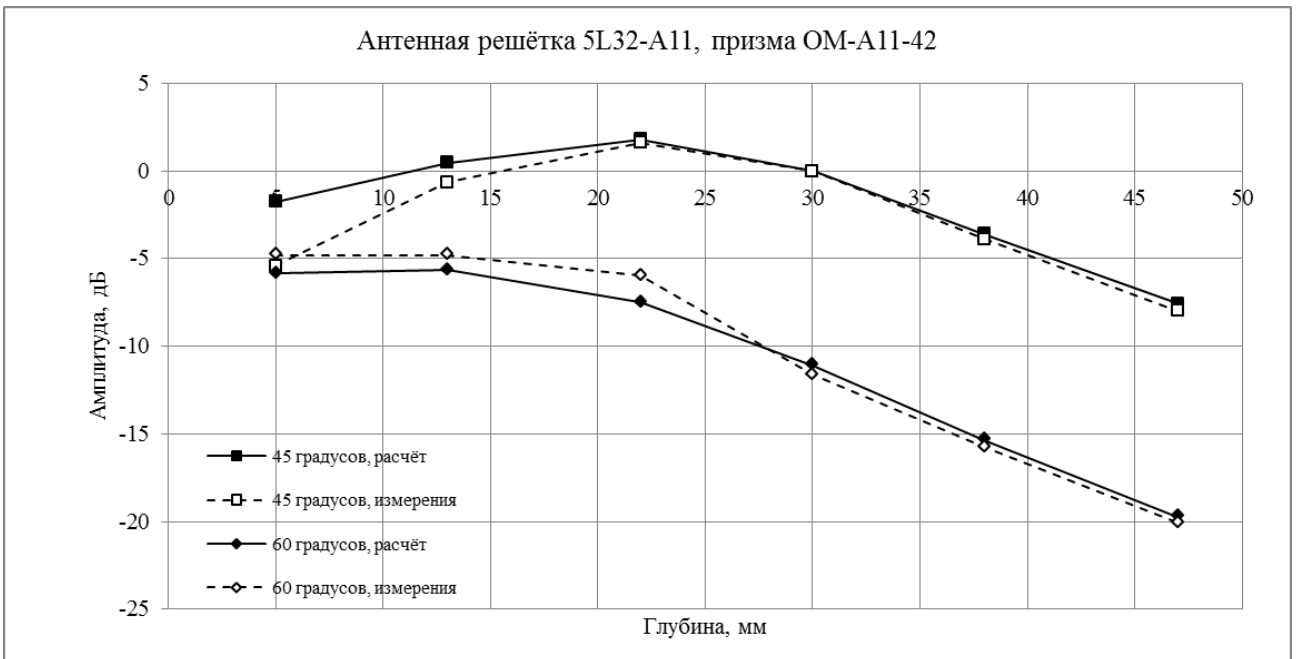


Рис. 4 Результаты сравнения расчёта и измерений АД диаграмм в зависимости от глубины залегания отверстия диаметром 2,3 мм.

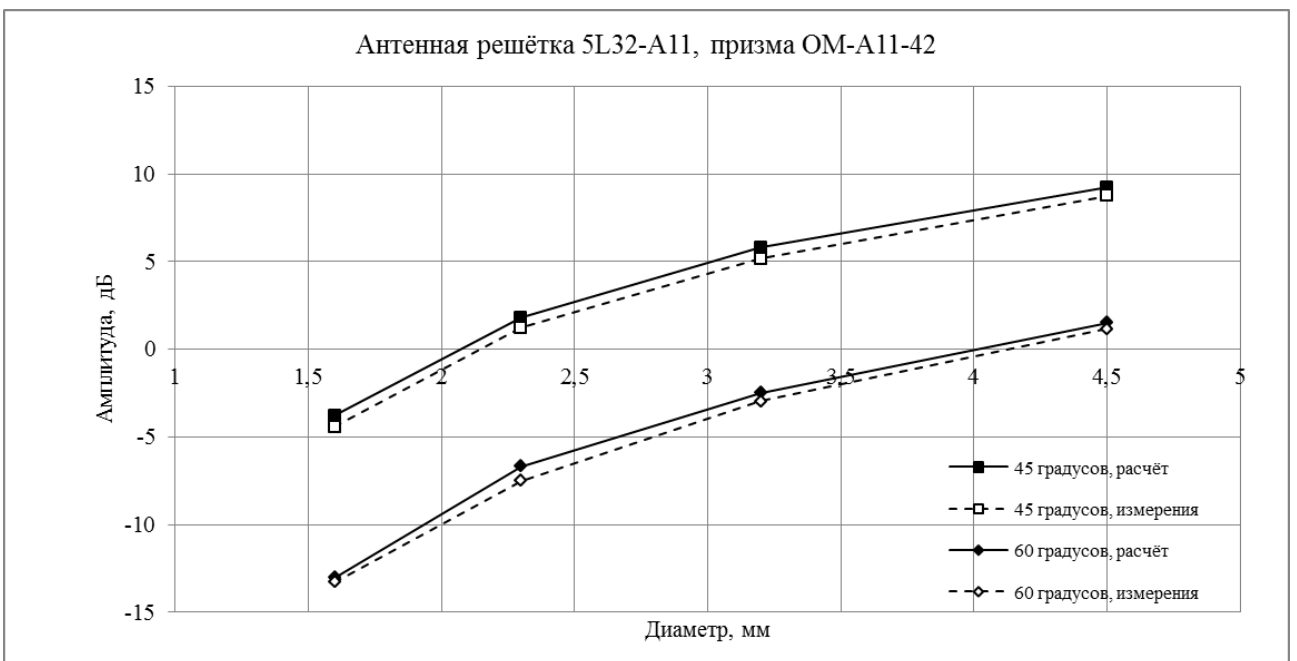


Рис. 5 Результаты сравнения расчёта и измерений АД диаграмм в зависимости от диаметра отверстия на глубине 22 мм.

Максимальная ошибка в 3,65 дБ получена при определении амплитуды от плоскостного отверстия на глубине 5 мм (см. Таблица 1). Это можно объяснить тем, что измерения амплитуды проходили при высоком уровне реверберационных шумов призмы и тем, что дно этого отверстия могло быть не достаточно плоским. Среднее отклонение по модулю равно 0,7 дБ.

Так как дно отверстия находилось на оси призмы и было перпендикулярно ей, то полагалось, что  $B(\alpha_r, \alpha_t) = 1$ . При расчётах считалось, что  $A(r_t)$  величина постоянная. Но даже эти допущения позволяют достичь точности расчётов приемлемой для практического применения АРД диаграмм для ФАР-дефектоскопа.

Таблица 1 Результаты сопоставления для антенной решетки с шагом между элементами 0,6 мм

	Максимальное отклонение модуля, дБ	Среднее отклонение, дБ	Среднее отклонение по модулю, дБ
45 градусов	3,65	-0,18	0,76
60 градусов	1,50	-0,06	0,63

### 3.2. Антенная решётка типа 5L32-PWZ3

Антенная решётка типа 5L32-PWZ3 имела пространственную апертуру равную  $32 \times 1,0$  мм и была установлена на стандартную призму SPWZ3-N55S-ИНС из рексолита с углом наклона 36 градусов. На Рис. 6 и Рис. 7 показаны графики амплитуд эхосигналов отражённых от плоскодонных отверстий для двух образцов (расчётные и экспериментально определенные).

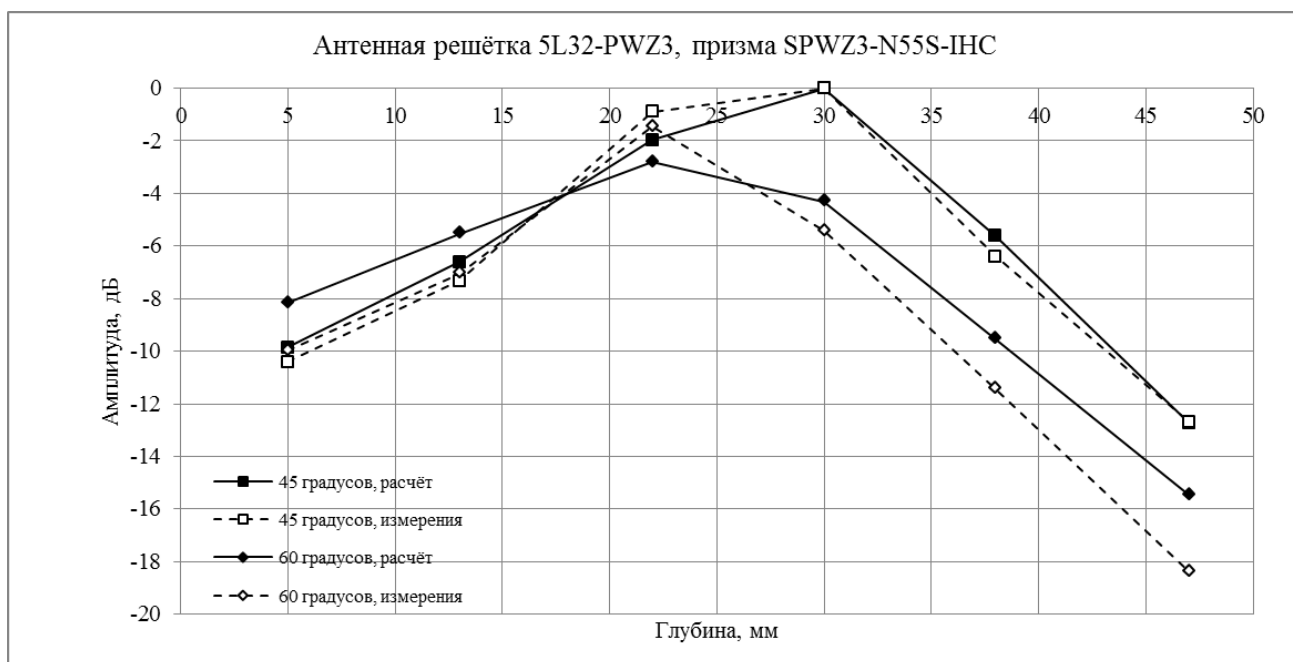


Рис. 6 Результаты сравнения расчёта и измерений АРД диаграмм в зависимости от глубины залегания отверстия диаметром 2,3 мм

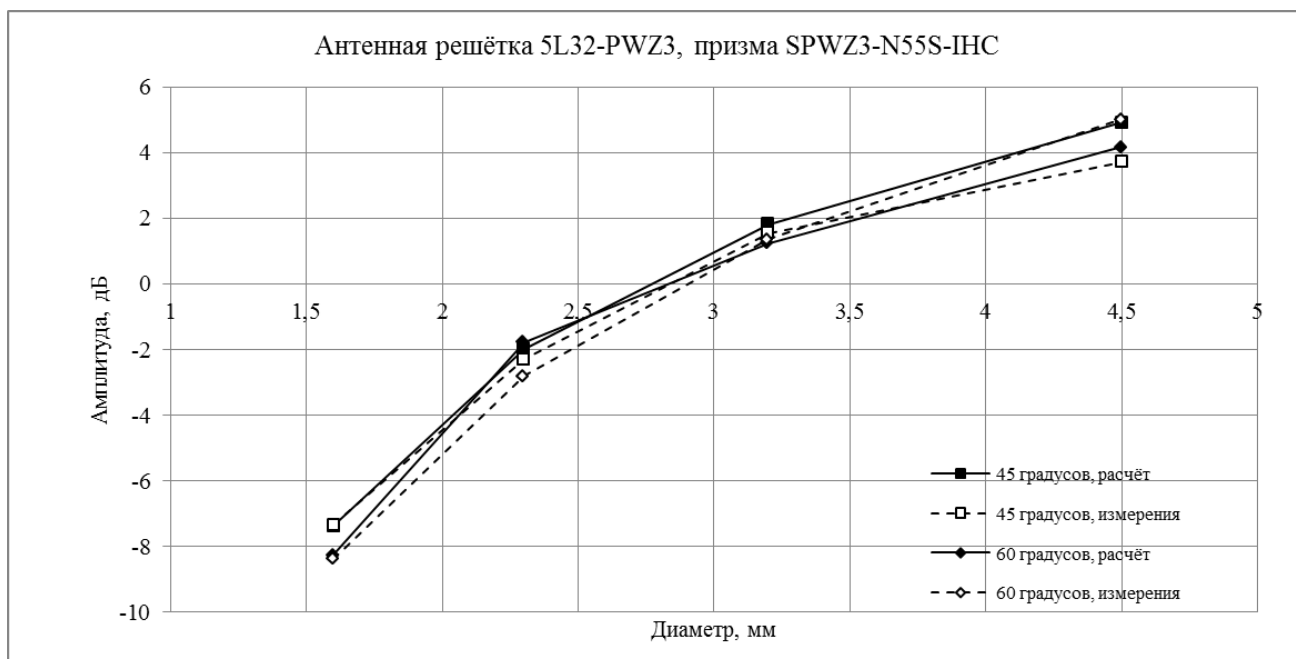


Рис. 7 Результаты сравнения расчёта и измерений АД диаграмм в зависимости от диаметра отверстия на глубине 22 мм.

Из графика на Рис. 6 видно, что измерения для плоскодонных отверстий наклонном 60 градусов и диаметром 2,3 мм дают заметно отличающую картину от расчётных данных в сравнении с измерениями для 45 градусов. Максимальная ошибка около 3 дБ, а среднее отклонение по модулю равно 0,82 дБ.

Таблица 2 Результаты сопоставления для антенной решетки с шагом между элементами 1,0 мм

	Максимальное отклонение модуля, дБ	Среднее отклонение, дБ	Среднее отклонение по модулю, дБ
45 градусов	1,19	0,14	0,49
60 градусов	2,92	-0,69	1,15

То, что графики на Рис. 7 гораздо ближе друг к другу при изменении угла наклона плоскодонного отверстия в сравнении с графиками на Рис. 5, объясняется тем, что антенная решётка 5L32-PWZ3 имеет практически вдвое большую пространственную апертуру, чем 5L32-A11, и, следовательно, обеспечивает лучшую фокусировку. По этой же причине максимум в районе 30 мм на Рис. 6 выражен более ярко в сравнении с Рис. 4.

Необходимо отметить отсутствие систематического увеличения погрешности при увеличении диаметра плоскодонного отверстия на Рис. 5 и Рис 7. Если проводить расчет отражающей способности просто по формулам акустического тракта, без учета фокусировки, то разница амплитуд между отражателями площадью 4 мм<sup>2</sup> и 16 мм<sup>2</sup> должна была

составить 12 дБ, а расчёт по предложенному алгоритму и экспериментальные данные показывают разницу 7-8 дБ.

#### 4. Применение в системе АВГУР

Для применения предложенной технологии в ООО «НПЦ «ЭХО+» были выполнены следующие работы:

- разработана программа расчёта обобщенных АРД диаграмм по заданным параметрам антенной решётки, призмы, объекта контроля; результаты расчета сохраняются в xml-файле, который может быть считан программой для выполнения анализа данных;
- разработаны конвертеры файлов с изображениями S-типа, создаваемых широко распространёнными ФАР-дефектоскопами, для записи в базу данных системы АВГУР;
- модифицировано программное обеспечение системы АВГУР, позволяющее при наличии xml-файла с записанной в него обобщенной АРД диаграммой, указанием параметров плоскостного отверстия на котором выполнялась настройка чувствительности и коэффициента усиления приемного тракта, выполнить оценку отражающей способности по S-скану; на Рис. 8 показан пример рабочего окна программы в режиме измерения эквивалентной площади.

Предложенная технология использована при разработке и аттестации ряда методов неразрушающего контроля сварных соединений АЭС с реакторными установками РБМК-1000, ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

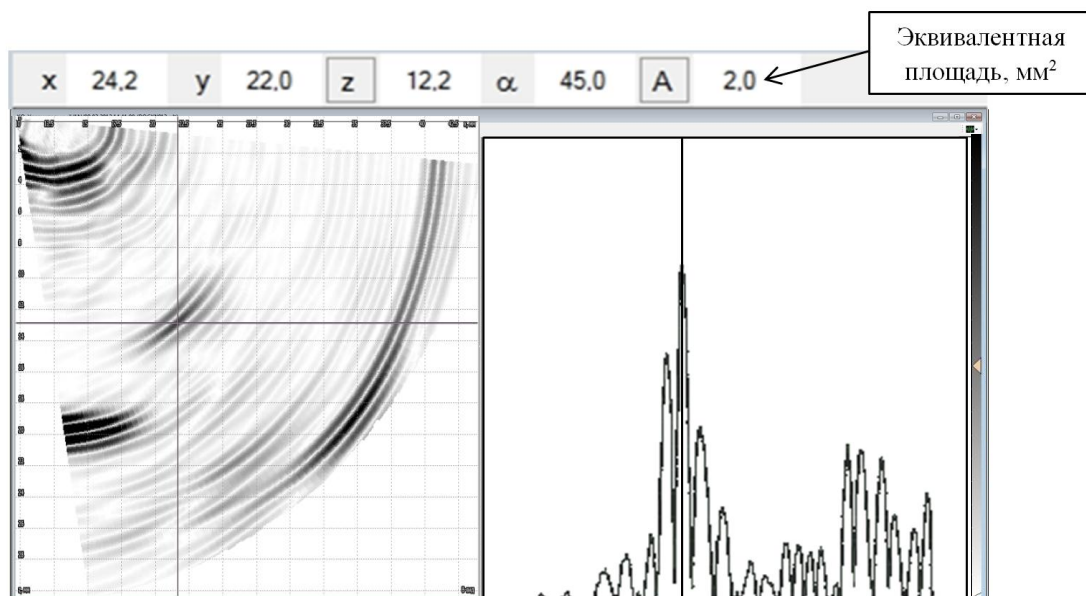


Рис. 8 Пример рабочего окна программы анализа данных АВГУР в режиме измерения эквивалентной площади.

## 5. Выводы

Таким образом, в результате проведённых исследований разработана программа расчёта АРД диаграмм  $A(r, d, \alpha)$ , которая позволяет с погрешностью не более 3 дБ проводить измерения эквивалентных площадей несплошностей по изображениям S-типа, полученным ФАР-дефектоскопом. Это означает, что ФАР-дефектоскопы могут более широко применяться при контроле тех объектов контроля, нормы оценки качества которых основаны на измерении эквивалентной отражающей способности несплошностей. При расчете ФАР-АРД диаграмм учитываются реальные параметры антенной решетки, призмы, объекта контроля, форма эхосигнала и закон фокусировки, заданный методикой контроля. Процедура измерения амплитуды отражателей по изображениям S-типа реализована в программном обеспечении системы АВГУР.

Плоскодонные отверстия в образцах должны изготавливаться с использованием электроэрозионных технологий с контролем формы поверхности дна отверстия. Углы наклона отверстий должны соблюдаться с точностью не менее 0,5 градуса.

Авторы выражают свою благодарность научному сотруднику ООО «НПЦ «ЭХО+» Коколеву С.А. за помощь при внедрении технологии в программное обеспечение системы АВГУР и при проведении экспериментальных проверок работы программы расчёта АРД диаграмм.

## 6. Список литературы

---

- 1 Krautkramer J. Determination of the size of defects by ultrasonic impulse echo method. – Br. J. Appl. Phys., 1959, № 10, p. 240-245.
- 2 Ермолов И.Н. Измерение величины дефектов изделий по амплитуде ультразвукового сигнала. – Заводская лаборатория, 1960, т. 26, № 4, с. 447-451.
- 3 Данилов В.Н., Воронков В.А. О построении АРД-диаграмм. В Мире НК, № 2 (12), 2001, с. 20-22.
- 4 ASME Boiler and Pressure Vessel Standards Committee. Case 2557. Use of Manual Phased Array S-Scan Ultrasonic.
- 5 W. Kleinert, Y. Oberdoerfer, G. Splitt. The ideal angle beam probe for DGS evaluation, 10th ECNDT, 7-11 Jun 2010, Moscow, Russia.
- 6 Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов. В мире неразрушающего контроля. – 2011, № 1, с. 64-70.
- 7 Воронков В.А. Основные закономерности поведения АРД-диаграмм в ближней и переходной зонах совмещенного преобразователя. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 41 – 48.
- 8 Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978. 248 с.
- 9 Ермолов И.Н., Басацкая Л.В. К вопросу экспериментального измерения диаграмм направленности преобразователей. – Дефектоскопия, 1989, № 4, с. 3-7.
- 10 Дианов Д.Б. Исследование направленности призматических преобразователей. – Дефектоскопия, 1965, №2, с. 8-22.
- 11 Данилов В.Н. О диаграмме направленности наклонного преобразователя в режиме приёма. – Дефектоскопия, 2011, №4, с. 36-49.
- 12 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
- 13 Raillon R., Bey S., Dubois A., Mahaut S., Darmon M. Results of the 2010 ut modeling benchmark obtained with CIVA: responses of backwall and surface breaking notches of various sizes. – Quantitative NonDestructive Evaluation, 18-23 July, 2010 San Diego, USA.
- 14 Лямшев Л. М. К вопросу о принципе взаимности в акустике. – Доклады АН СССР. 1959, т. 125, № 6, с. 1231–1234.