

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ В УЗ ДЕФЕКТОМЕТРИИ.

Бадалян В.Г. (НПЦ»ЭХО+»)

ВВЕДЕНИЕ

Количественная оценка надежности систем неразрушающего контроля является важным фактором при риск – ориентированном подходе в диагностике. Для этого обычно используются кривые выявляемости дефектов (PoD–кривые) и кривые достоверности (ROC–кривые) при неразрушающем контроле (НК). Кривая PoD (Probability of Detection) описывает распределение вероятности обнаружения дефектов по их размерам. Эта кривая отражает возможности используемого метода и аппаратуры контроля на выбранной чувствительности системы и позволяет прогнозировать выявляемость дефектов различных размеров в объекте за счет известной функциональной зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров (например, высоты) [1].

Для оценки достоверности данных, полученных при контроле объекта с применением методов и средств ультразвукового контроля (УЗК), необходимо учитывать не только вероятность обнаружения дефектов при контроле, но и вероятность их пропуска и фиксации ложных дефектов [2]. Для этих целей часто используются ROC–диаграммы и ROC–кривые (Receiver Operating Characteristic curve), которые отражают взаимную зависимость количества ложных и правильно найденных дефектов. Выполняемые для их построения действия называют ROC–анализом. ROC–анализ был разработан и применяется в теории обработки сигналов и радиолокации для описания соотношения между событиями верного обнаружения цели и ложными срабатываниями. В неразрушающем контроле ROC–анализ начал применяться для анализа достоверности контроля методик, аппаратуры и персонала как средство для быстрой оценки методов и приборов УЗК [3,4]. Ниже мы рассмотрим особенности применения ROC– анализа для приборов УЗ дефектометрии и УЗ дефектоскопии. Для этого мы используем базу данных УЗК, полученную на аустенитных кольцевых сварных соединениях (СС), содержащих трещины различной высоты. Измерения выполнялись с применением двух методов УЗ дефектометрии (ФАР и SAFT–обработка), в которых анализ данных контроля выполнялся по акустическим фокусированным изображениям, и традиционного метода УЗ дефектоскопии, в котором анализ данных контроля выполнялся по амплитуде УЗ сигнала.

ROC – анализ

Для выполнения ROC – анализа все полученные данные НК представляются в виде матрицы данных [5].

Табл. 1. Матрица данных НК

ИСТИННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПРИ НК	РЕЗУЛЬТАТЫ НК	
	НАЙДЕН ДЕФЕКТ	ДЕФЕКТА НЕТ
массив данных «ДЕФЕКТЫ»	<i>ДП</i>	<i>ПрД</i>
массив данных «НЕТ ДЕФЕКТОВ»	<i>ЛД</i>	<i>ДН</i>

Здесь:

ДП – количество правильных решений «Дефект»,

ДН – количество правильных решений «Дефекта нет»,

ЛД – количество неправильных решений «Дефект», там, где его нет (**обнаружение ложных дефектов**),

ПрД – количество неправильных решений «Дефекта нет», там, где он есть (**пропуск дефекта**).

По данным таблицы определяют характеристики PoD и $PoD_{лож}$.

Вероятность выявления дефектов

$$PoD = \frac{ДП}{ДП+ПрД} = n/N, \quad (1)$$

где n -число выявленных дефектов, N – общее число дефектов, участвующих в НК.

Вероятность обнаружения ложных дефектов

$$PoD_{лож} = \frac{ЛД}{ДН+ЛД} = \nu/M, \quad (2)$$

где ν - число ложных дефектов, M – общее число бездефектных мест.

ROC–диаграммы.

Результат серии испытаний по выявлению дефектов в объектах с использованием какого-либо метода НК отображается одной точкой на диаграмме (PoD – по оси ординат, $PoD_{лож}$ – по оси абсцисс). Диаграммы этого типа называются **ROC–диаграммами** (Рис. 1).

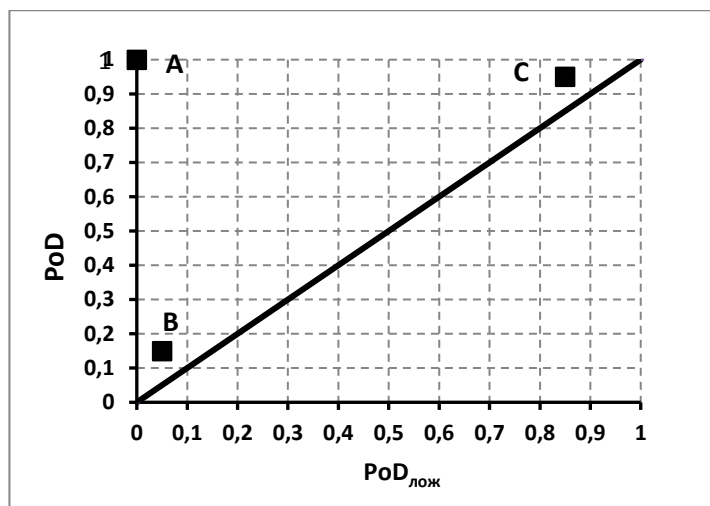


Рис. 1 Представление результатов контроля на ROC–диаграмме.

Точка **A** на диаграмме расположена в точке с координатами (0,1) соответствует идеальной системе контроля, так как определяет результат контроля без пропусков и ложного определения дефектов. Данные контроля, расположенные в левом верхнем углу диаграммы указывают на то, что методика контроля позволяет решать задачу выявления дефектов, и чем ближе к ней расположена точка данных, соответствующая PoD и $PoD_{лож}$, тем эффективнее выполняет свою задачу методика НК. Точка **B**, расположенная в левом нижнем углу, показывает, что методика контроля – «консервативна», так как при малом числе ложных дефектов вероятность их обнаружения тоже низкая. Верность обнаружения дефекта высока, но то, что в контролируемой области ряд дефектов отсутствует, может быть ошибочным из-за низкой вероятности их обнаружения. Точка **C**, расположенная в правом верхнем углу, показывает, что использованная методика достаточно «либеральна», так как при большой вероятности выявления дефектов также высока вероятность появления ложных дефектов. Решения о наличии дефектов при НК скорее всего правильно, но возможно значительная перебраковка.

Данные НК, расположенные на диагонали ROC диаграммы, указывают, что рассматриваемая методика НК не выполняет своей основной задачи – выявления дефекта, так как вероятности наличия дефекта и его отсутствия равны. По существу, на **ROC–диаграммах** отображается связь между выявленными и ложно-обнаруженными дефектами. Так как в практике длины дефектов могут существенно различаться, то при анализе данных целесообразно рассматривать дефекты как совокупность зон определенной длины (дефектных зон), а области не содержащие дефекты – как совокупность бездефектных зон.

Следует отметить, что полученные таким образом характеристики будут точечными оценками качественных характеристик и, в силу некоторой стохастичности анализируемых данных, полученными с определенной погрешностью.

В частности, для вычисления 95% доверительного интервала для вероятностей выявления истинных и ложных дефектных зон $P_{0.95}$, $P_{-0.95}$ для верхней и нижней границ, соответственно, используется формулы [6]:

$$P_{0.95} = (n' + 0.5g^2) + \frac{g\sqrt{n'(1-h')+0.25g^2}}{N'+g^2}, \quad (3)$$

$$P_{-0.95} = (n' + 0.5g^2) - \frac{g\sqrt{n'(1-h')+0.25g^2}}{N'+g^2}. \quad (4)$$

Здесь $g = 1,96$ – для 95% доверительного интервала, n' – число выявленных дефектных зон или ложно обнаруженных дефектных зон, N' – общее число дефектных или бездефектных зон, $h' = n'/N'$ – вероятность выявления истинных дефектных или ложных дефектных зон. Эта формула верна при $n' \geq 4$ и $N' - n' \geq 4$.

ROC–кривые.

Основой ROC анализа является построение так называемой ROC–кривой, которая часто используется для представления результатов бинарной классификации (есть дефект – нет дефекта). ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных дефектных зон от количества ложных дефектных зон в зависимости от параметра, определяющего то или иное решение о выявлении дефекта.

Возможность обнаружения ложных дефектных зон существенно зависит от электронных и акустических шумов в объектах контроля из-за влияния структуры материала, распространения различных типов акустических волн, сигналов от геометрических отражателей и т.д. В связи с этим обычно рассматриваются данные, представляющие собой два массива данных: дефекты (занимающие дефектные зоны) и шум (занимающие бездефектные зоны). Оба этих массива имеют нормальное распределение амплитуд сигнала и шума. У части бездефектных зон, содержащих шум, по результатам НК определяют наличие дефектов (ложные дефекты), при этом часть дефектных зон при контроле не было обнаружено (пропуск дефектов). Изменение значения информационного параметра контроля, по величине которого принимается решение об обнаружении дефекта влияет на величину соответствующих областей. Например, для амплитуды УЗ сигнала $A_{\text{пор}}$:

$$A_{\text{пор}} \begin{cases} \leq A & \text{– есть дефект} \\ > A & \text{– нет дефекта} \end{cases} \quad (5)$$

Изменяя значения $A_{\text{пор}}$ получаем ROC–кривую у которой по оси абсцисс откладываются значения $PoD_{\text{лож}}$, а по оси ординат – PoD (Рис. 2).

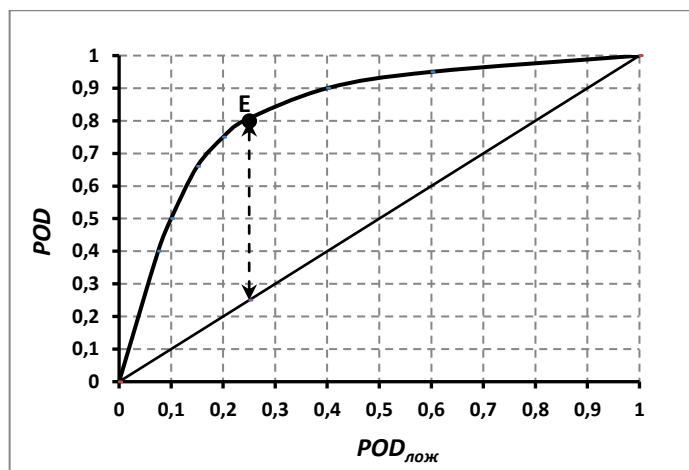


Рис. 2. ROC кривая. E – рабочая точка, определенная по значению индекса Юдена J (6).

Каждый возможный выбор значений порога $A_{\text{пор}}$ соответствует точке в ROC пространстве. Для максимального порога $A_{\text{пор}}^{\text{max}}$ получим $PoD_{\text{лож}} = 0$, $PoD = 0$; для минимального порога $A_{\text{пор}}^{\text{min}}$ – $PoD_{\text{лож}} = 1$ и $PoD = 1$.

Расположение оптимальной рабочей точки на ROC – кривой зависит от выбранного критерия оптимальности т.е., от требований, предъявляемых к методике классификации данных: «дефект», «нет дефекта». В частности, часто оптимальной считается точка на ROC – кривой, которая имеет максимальное значение выявляемости дефектных зон PoD при минимальном значении ложных выявленных дефектных зон $PoD_{\text{лож}}$. При этом индекс Юдена J имеет максимум и соответствует максимальному отлчию ординат от диагонали (см. Рис. 2):

$$J = PoD - PoD_{\text{лож}} \quad (6)$$

Необходимо обратить внимание на то, что ROC–кривые нечувствительны к соотношению числа элементов массивов «дефекты», «нет дефектов» [5], то есть, при изменении соотношения размеров массивов данных ROC–кривые не изменятся. Это связано с тем, что каждая координата в ROC диаграмме использует данные только из одного массива матрицы данных (строки в Табл. 1). Это свойство ROC–кривых особенно важно при анализе результатов НК объектов с реальными дефектами.

Анализ результатов контроля методами УЗ дефектоскопии и УЗ дефектометрии.

База данных УЗК

В дальнейшем мы используем базу данных результатов УЗК в объектах с повышенным уровнем структурных шумов – аустенитных СС трубопроводов диаметром 325x15, полученных при испытаниях различных методик контроля в 2010 году. УЗК вы-

полнялся на испытательных образцах, вырезанных из реальных трубопроводов и содержащих аустенитные СС с реальными плоскостными дефектами. Типичные эксплуатационные дефекты в таких трубопроводах – трещины продольной ориентации (относительно оси сварного соединения), развивающиеся с внутренней поверхности СС. При этом трещина распространяется параллельно разделке кромки шва.

С акустической точки зрения, основная особенность аустенитных СС заключается в высоком уровне структурного шума, повышенном затухании и анизотропии распространения акустических волн через аустенит [7]. Все это приводит к увеличению ошибок определения реальных параметров дефектов и снижает выявляемость самих дефектов.

После выполнения УЗК все СС были подвергнуты металлографическим исследованиям (МГИ), в которых были установлены координаты залегания дефектов, их длина и высота. Всего было проконтролировано 24 испытательных образца, содержащих 61 дефект длиной от 21 мм до 169 мм и высотой от 1,7 мм до 12,8 мм. Гистограмма распределения числа дефектов по высоте приведена на **Рис. 3**.

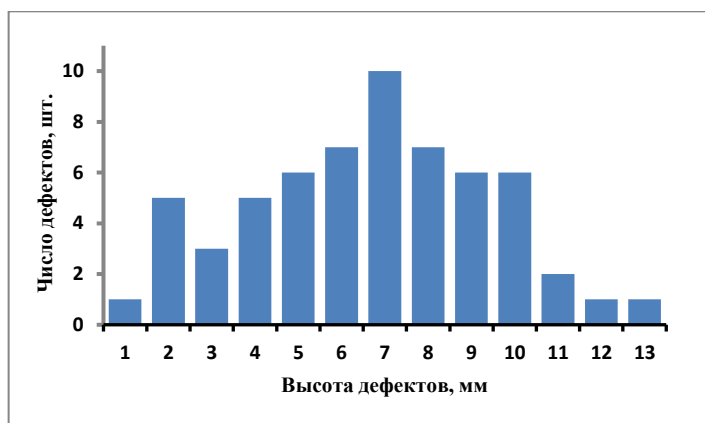


Рис. 3. Распределение числа дефектов по высоте.

УЗК выполнялся тремя группами операторов. При этом номенклатура СС для всех групп совпадала на 90%. Использовались несколько разных методик ручного и автоматизированного контроля. В частности, применялись методики с использованием приборов УЗ дефектоскопии и 2 методики УЗ дефектометрии: ФАР – дефектоскопом и прибором АВГУР. Эта же база данных использовалась при анализе выявляемости контроля [8].

Для выполнения ROC анализа данные были предварительно подготовлены в соответствии с методологией, изложенной в работе [9]:

1. Все СС были разделены на зоны, длиной 21 мм, которые могут содержать дефект (дефектная зона) или не содержать дефект (бездефектная зона).¹ Всего в одном СС содержится 49 зон.

¹ Длина зоны была выбрана из соображений минимальной длины зарегистрированных дефектов.

2. Для каждого СС было установлено число и границы дефектных и бездефектных зон.
3. Для каждой методики контроля и каждой группы контролеров было определено число дефектных, бездефектных и ложно-дефектных зон.

Особенности определения дефекта в УЗ дефектоскопии и УЗ дефектометрии

Анализ данных и принятие решения о наличии и параметрах выявленного дефекта в УЗ дефектоскопии и УЗ дефектометрии существенно отличаются. Прежде всего это связано с тем, что в УЗ дефектоскопии основными информационными параметрами являются амплитуда сигнала и глубина его залегания. Решение об обнаружении дефекта принимается по его амплитуде [10].

В УЗ дефектометрии информационным параметром являются характеристики полученного фокусированного акустического изображения [11, 12]. При анализе акустического изображения сначала устанавливаются элементы изображения, принадлежащие дефекту. Затем определяется высота и другие параметры дефектов путем измерения расстояний между соответствующими его элементами и, в частности, от концов трещины, амплитуда изображений которых может быть мала из-за дифракции ультразвука на них [13].

Необходимо отметить, что отношение сигнал/шум при анализе фокусированных изображений более высокое. В частности для аустенитных СС диаметром 325x15 отношение сигнал/шум в изображении повышается на 8–10 дБ [14]. Тем не менее, в ряде случаев величина шума ограничивает возможность различения шумовой составляющей изображения от сигнала, связанного с дифракцией на кончике трещины.

Использование ROC анализа для оценки эффективности методов УЗК

Одним из несомненных достоинств ROC анализа является возможность наглядного представления эффективности различных методов НК. Для этого желательно использовать одну и ту же базу данных контроля, в которой имеется набор дефектов, характерных для контролируемого объекта. Ниже представлены результаты УЗК, выполненного по трем методикам с применением методик контроля и приборов УЗ дефектоскопии и дефектометрии [15]. В Табл. 2 приведены основные характеристики этих методик контроля.

Табл.2. Основные характеристики методик контроля

№	Методика контроля	Прибор контроля	Основной информационный параметр	Уровень фиксации	Минимальный обнаружимый дефект, мм	Число операторов	Общее число дефектов
1	Ручной	УЗ дефектоскоп	Амплитуда сигнала	Ампл. сигнала от пропила h=2 мм	2	3	163

2	Ручной	УЗ ФАР-дефектоскоп	Фокус. акустическое 2D изображение	Ампл. сигнала от пропила h=2 мм и L=10 мм.	2	1	61
3	Автоматизированный	АВГУР	Фокус. акустическое 3D изображение	Дефект h=1,5 мм и L >10 мм	1,5	3	127

ROC–диаграммы

Результаты контроля для методик, приведенных в Табл. 2, представлены в виде ROC–диаграммы на **Рис. 4**. Видно, что для методик №2 и №3, у которых решение о существовании дефекта принимается на основе анализа фокусированных акустических изображений, более эффективны, чем для методики №1.

Для всех этих методик приведены результаты расчетов погрешностей в 95% доверительном интервале по формулам (3) и (4). Если считать, что рабочая область эффективного контроля определяется как $PoD \geq 0,8$ и $PoD_{лож} \leq 0,2$ [16], то можно заключить, что в рабочую область попадают только две методики: 2 и 3. Здесь же приведены результаты расчетов для различных операторов по методикам №1 и №3. Данные измерений, полученные операторами 1.1, 1.2, 1.3, в соответствии с методикой №1, использующей в качестве информативного параметра амплитуду сигналов, существенно отличаются как по вероятности выявления дефектов, так и по уровню перебраковки (индекс J изменяется от 0,45 до 0,73). Для НК, выполненной по методике №3 операторами 3.1, 3.2, 3.3, результаты измерений имеют значительно меньший разброс значений PoD и $PoD_{лож}$ (значения индекса J изменяются от 0,79 до 0,9).

Обращает на себя внимание то, что выбор чувствительности методики №1 и значения уровня фиксации $A_{пор}$ не является оптимальным так как значение вероятности выявления дефектов равно 0,63 при очень низкой (менее 0,03) вероятности обнаружения ложных дефектов $PoD_{лож}$. Вместе с тем наилучшее значение PoD , полученное оператором 1.3, равное 0,79 показывает, что при большей чувствительности или менее жестком выборе уровня фиксации методика № 1 легко попала бы в рабочую зону.

Необходимо подчеркнуть, что анализировались данные, полученные действующими в атомной энергетике методиками контроля. Поэтому степень появления ложных дефектов мала из-за высоких требований к достоверности контроля.

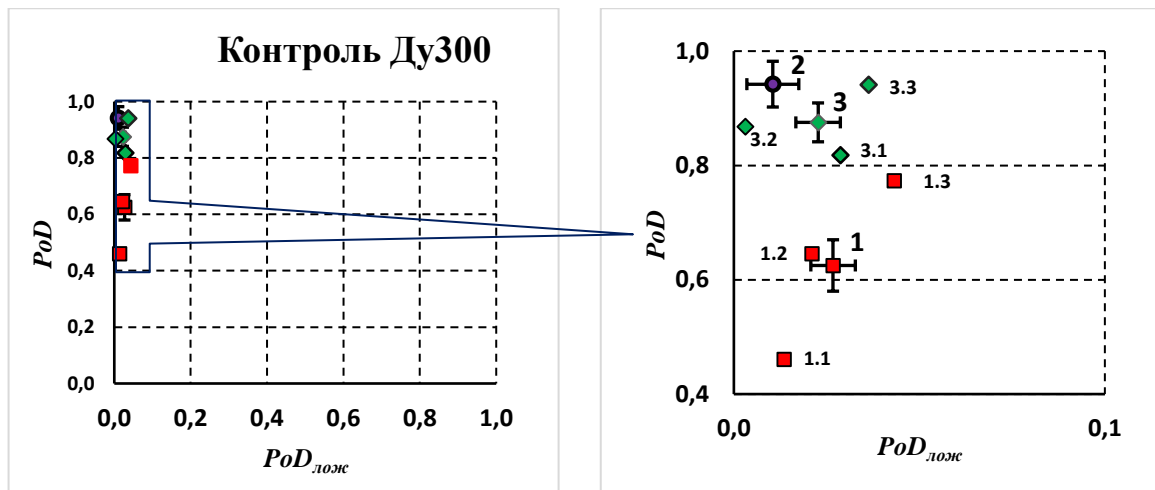


Рис. 4. ROC–диаграмма по данным методик контроля №№ 1, 2, 3.

Использование ROC анализа для оптимизации методики контроля.

1. Определение ROC –кривых по фокусированным изображениям

Дополнительную информацию об эффективности методики контроля можно получить, анализируя ROC–кривые, принадлежащие соответствующим методикам. Так как методики № 2 и № 3 в (Табл. 2) представляют собой методики и приборы УЗ дефектометрии, то вместе с обнаружением дефекта они позволяют определить его геометрические размеры [17], в частности, высоту дефекта. Поэтому можно построить ROC кривую в зависимости от высоты выявленного дефекта. Фактически классификация дефектов по высоте возможна, когда удастся выявить в акустическом изображении элементы, относящиеся к верхнему и нижнему краям дефекта. Так как сигнал от верхнего края дефекта часто является результатом дифракции и имеет незначительную амплитуду, сопоставимую с уровнем шума, то определение высоты дефекта может существенно зависеть от уровня шума в СС. На Рис. 5 приведены общие для всех операторов результаты измерений высоты дефектов системой АВГУР. Сплошная кривая получена методом наименьших квадратов (МНК). Индекс J, характеризующий рабочую точку методики для всего массива данных, полученного АВГУР, равен 0.852. Максимальное значение индекса J, полученное по данным оператора 3.3 (пунктирная кривая), равно 0,905 (см. Рис. 5). Видно, что есть еще возможность улучшить эффективность методики УЗ дефектометрии за счет дополнительного повышения отношения сигнал/шум [18], используя обработку УЗ сигналов и изображений, повышение чувствительности аппаратуры. Заметим однако, что приведенная ROC–кривая не позволяет уточнить, какова вероятность выявления дефектов определенной высоты для данной методики контроля. Для этого целесообразно дополнить эти данные графиком вероятности выявления дефектов в зависимости от значений их высоты.

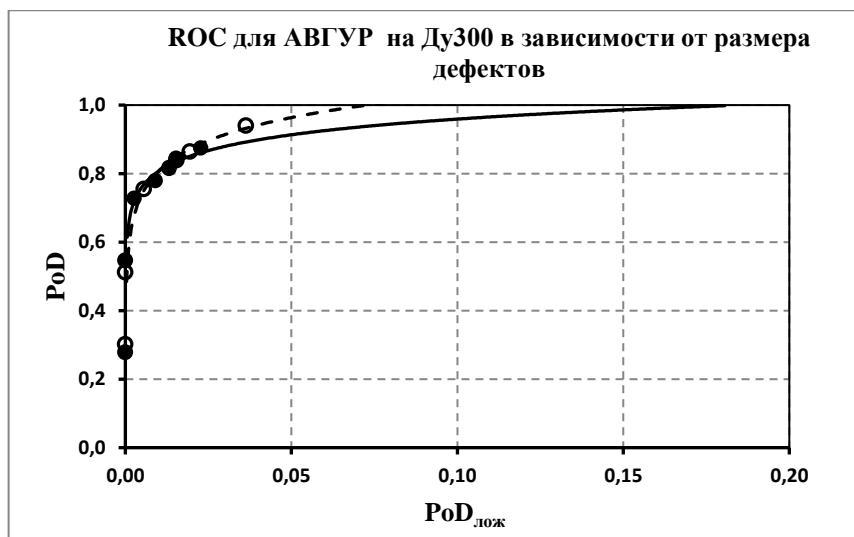
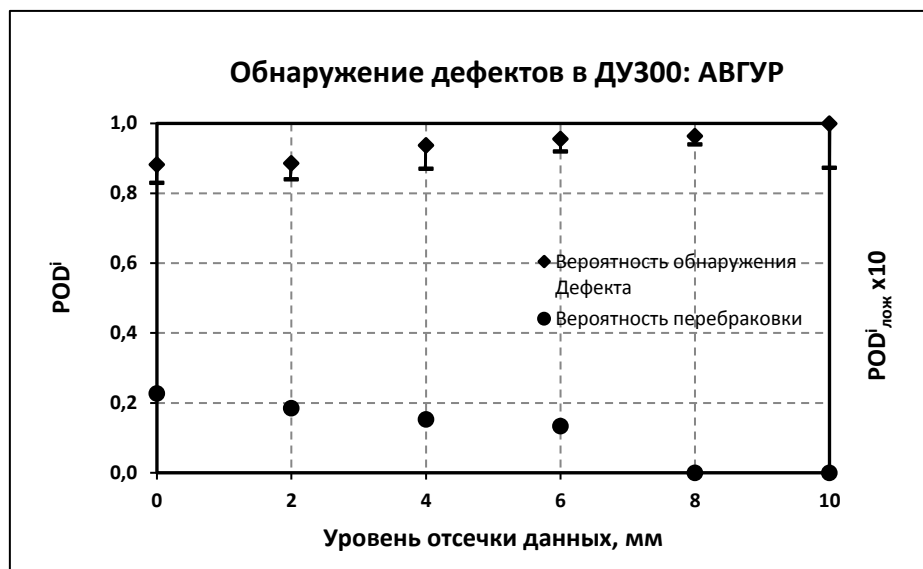


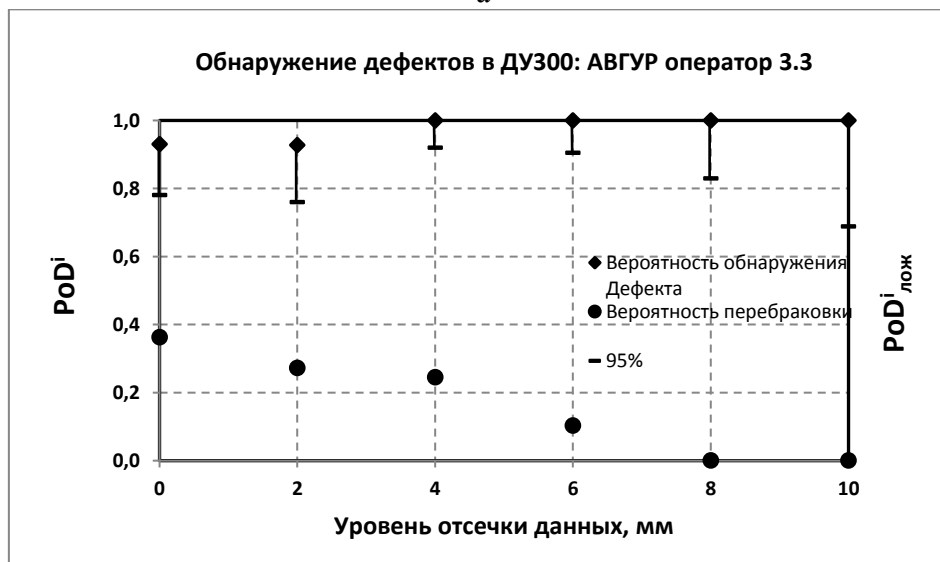
Рис. 5. ROC кривые, полученные по данным УЗК методикой № 3 и прибором АВГУР (УЗ дефектометрия).
Сплошная кривая – общая для всех операторов; пунктирная кривая получена оператором 3.3.
Экспериментальные точки приведены для пороговых значений высоты дефектов: менее 2 мм, больше или равно 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм. Сплошная и пунктирная кривые получены МНК.

На **Рис. 6** представлена зависимость вероятности обнаружения дефектов POD^i от их высоты h_i . На **Рис. 6а** приведены результаты, полученные всеми операторами, на **Рис. 6б** – данные, полученные оператором 3.3. Здесь $POD^i = \frac{n_i}{N_i}$; n_i, N_i – число выявленных дефектов и общее число дефектов высотой h_i , соответственно. Здесь же приведены значения вероятности обнаружения ложных дефектов $POD_{лож}^i = \frac{v_i}{M_i}$; v_i, M_i – число ложно определенных дефектных зон и число правильно определенных бездефектных зон соответственно при уровнях отсечки данных h_i . Анализ **Рис. 6а** показывает, что все дефекты высотой выше 8 мм обнаруживаются безошибочно. Для дефектов высотой более 6 мм вероятность обнаружения дефектов превышает 0,95, но незначительно (до 0,013) возрастает вероятность ошибки за счет ложно обнаруженных дефектов; при дальнейшем увеличении чувствительности контроля такая вероятность ошибки возрастает незначительно до 0,023. Анализ данных отдельных операторов дает возможность оценить их квалификацию при оценке результатов контроля. При этом высокая «кучность» результатов контроля, выполненного по методике № 3 (см. **Рис. 4**) демонстрирует практически одинаковую квалификацию операторов. Вместе с тем за счет незначительного увеличения общей чувствительности аппаратуры можно при незначительном увеличении вероятности ошибки классификации дефекта (до 0,036) повысить вероятность обнаружения дефектов (более чем до 0,9) (см. **Рис. 6б**). Так, обнаружены все дефекты высотой более 4 мм, но незначительно возрастает вероятность ошибки за счет ложно обнаруженных дефектов (до 0,015). Для дефектов высотой менее 4 мм вероятность обнаружения составляет величину 0,9 при дальнейшем увеличении вероятности обнаружения ложных дефектов, что естественно из-за

ухудшения отношения сигнал/шум. Вместе с тем, максимальная величина вероятности обнаружения ложных дефектов невелика – менее 0,04. В значительном числе задач контроля такой уровень ошибок является приемлемым. Такая слабая зависимость выявляемости дефектов разной высоты (большой уровня фиксации для методики №3) указывает на лучшую выявляемость дефектов по результатам анализа сфокусированных акустических изображений [19].



а



б

Рис. 6. Зависимость вероятности обнаружения и вероятности ложного обнаружения дефектов от значений высоты пороговой отсечки при анализе данных «дефект», «нет дефекта» для методики № 3. Погрешности определяют 95% односторонний доверительный интервал.

2. Определение ROC-кривых по амплитуде сигнала.

Для анализа данных, полученных с применением УЗ дефектоскопа, для которых информационным параметром является амплитуда сигнала, наиболее естественным является построение ROC-кривой путем изменения уровня пороговой амплитуды сигнала от

дефектов. На **Рис. 7** представлены ROC–кривые, полученные МНК для методики №1 ручного контроля с применением УЗ дефектоскопа. Кривые построены по данным контроля, полученным при изменении пороговой амплитуды сигнала от уровня фиксации A_{Φ} до значений $A_{\Phi} + 8\text{дБ}$ с шагом 1 дБ. По существу, в этом случае мы уменьшаем чувствительность методики от значений уровня фиксации максимум на 8 дБ. Рабочая точка для всего массива данных, полученных при таком контроле, характеризуется индексом $J = 0,6$. По данным контроля различными операторами максимальное значение индекса $J = 0,73$ (оператор 1.3). Анализ данных контроля указывает на то, что рабочая точка для методики контроля далеко не оптимальна – максимальное значение показателя перебраковки $POD_{\text{лож}}$ не превышает значения 0,027. Даже незначительное увеличение (до 0,08) вероятности появления ложных дефектов может привести к существенному увеличению вероятности обнаружения дефектов – до 0,86.

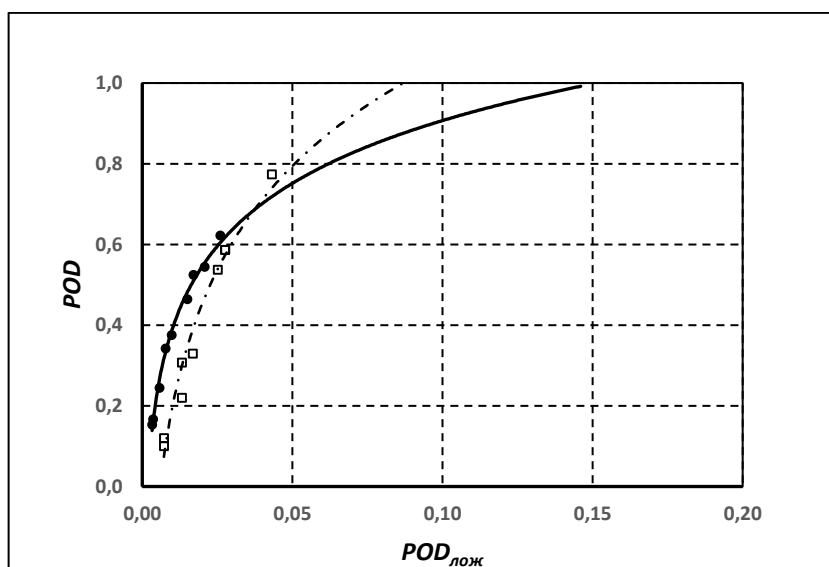


Рис. 7 ROC кривые, полученные по данным УЗК методикой №1 с использованием эхо-дефектоскопа. Сплошная кривая – общая для всех операторов; пунктирная линия – оператором 1.3. Экспериментальные точки приведены для значений отсечки амплитуды сигналов: A_{Φ} , $A_{\Phi} + \eta\text{дБ}$, где $\eta = 1, 2, \dots, 8$ дБ. Сплошная и пунктирная кривые получены МНК.

Построение графика аналогичного приведенному на **Рис. 6** не представляется возможным, так как не существует однозначной связи между высотой дефекта и амплитудой сигнала от него. На **Рис. 8** представлены результаты УЗК по методике №1, демонстрирующие зависимость числа выявленных дефектов от их размеров при различном уровне отсечки. Заметим, что при самом малочувствительном режиме (уровень отсечки $A_{\Phi} + 10$ дБ) режиме регистрации данных, обнаружены дефекты высотой от 2 мм до 3 мм и от 6 мм до 7 мм; при отсечке $A_{\Phi} + 4$ дБ обнаруживаются около 85% номенклатуры дефектов высотой от 2 мм до 13 мм. Все это подтверждает тезис о слабой корреляции высоты дефектов от амплитуды сигнала.

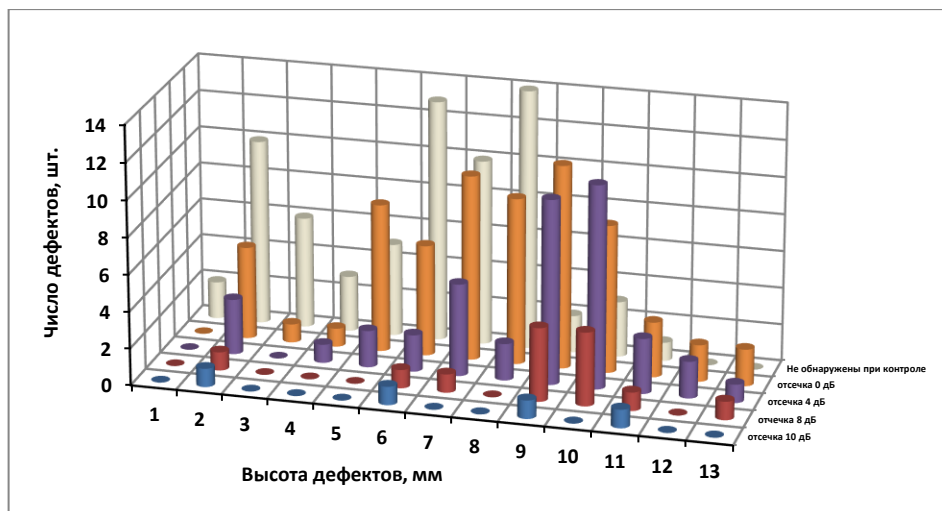


Рис. 8. Дефекты, обнаруженные при различных уровнях отсечки по методике №1.

Выводы.

1. Таким образом, ROC анализ дает возможность быстро и в наглядной форме проанализировать эффективность различных методов и средств контроля, оценить достоверность контроля, оптимизировать методику контроля, оценить работу персонала.
2. ROC кривые, построенные при изменении параметра, не связанного жестко с параметрами дефектов, определяющими их опасность для объекта контроля, являются ограниченно полезными. В частности, для плоскостных дефектов наиболее важными параметрами, определяющими их опасность для целостности объекта контроля, является высота. Поэтому ROC кривые, построенные по данным УЗ дефектометрии, очень полезны, так как дают возможность проанализировать корреляцию изменение вероятности появления ложных дефектов с изменением вероятности обнаружения дефектов большей высоты.
3. ROC анализ результатов УЗК, полученного методами и средствами УЗ дефектометрии, показал, что дефекты высотой более 8 мм обнаруживаются с вероятностью более 95% при отсутствии ложных дефектов. С уменьшение высоты дефектов от 6 мм до 2 мм вероятность их обнаружения незначительно падает при одновременном росте вероятности ложных обнаружений дефектов (от 0,013 до 0,023).
4. Для аппаратуры и методик контроля УЗ дефектоскопии анализ показал, что выбор рабочей точки для методики контроля не оптимален и незначительное увеличение чувствительности или снижение амплитуды фиксации могло бы значительно

улучшить выявляемость и достоверность контроля. Вместе с тем оценить достоверность контроля в зависимости от высоты дефекта не удастся, так как основной изменяемый параметр, определяющий классификацию данных – пороговый уровень отсечки – не зависит однозначно от высоты дефекта.

Библиографический список

1. **Berens A. P.** Probability of detection (PoD) analysis for the advanced retirement for cause (RFC) /engine structural integrity program (ENSIP) nondestructive evaluation (NDE) system development volume 1 – PoD analysis. Final report 2000, p. 88. AFRL-ML-WP-TR-2001-4010.
2. **Волченко В.Н.** Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М. Металлургия, 1979, 88 с.
3. **Nockemann, C., Heidt, H., and Thomsen, N.** Reliability in NDT: ROC study of radiographic weld inspections // NDT&E International 1991, 24, 5, pp. 235-245.
4. **Visser W.** POD/POS curves for non-destructive examination, HSE Offshore Technology Report 2000/18, 2002.
5. **Fawcett T.** ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers – Kluwer Acad. Publ., 2004. – 38 p.
6. **Ван дер Верден.** Математическая статистика, ИЛ, 1960, 436 с.
7. **Алешин Н. П., Вадковский Н. Н., Волкова Н. Н.** Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации по повышению надежности // Дефектоскопия. 1988. № 2. С. 43 – 59.
8. **Бадалян В.Г.** Оценка достоверности результатов УЗК в аустенитных сварных соединениях (с применением когерентных систем) // Контроль. Диагностика. 2016, № 12, С.4-9.
9. **F. Fucso, C. Muller, M. Scharmach.** Measuring of the reliability of NDE // The 8 Int. Conf. of the Slovenian Society for NDT «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering», 2005, Slovenia, pp. 173-180.
10. **Щербинский В.Г.** Технология ультразвукового контроля сварных соединений. М.: Тиссо, 2003 – 313.
11. **Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др.** Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / под. ред. А.Х. Вopilкина. М.: Машиностроение, 2008 – 368 с.
12. **Jacques F., Moreau F., Ginzal E.** Ultrasonic backscatter sizing using phased array – developments in tip diffraction flaw sizing // Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2003, v.45, 11, pp. 724-728.
13. **Бадалян В.Г.** Оценка результатов контроля по акустическим изображениям // Дефектоскопия, 2007, №4, с. 39-58
14. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Гребенников В.В., Гребенников Д.В.** Сравнительный анализ способов повышения отношения сигнал/шум при ультразвуковом контроле аустенитных швов.// Контроль. Диагностика. 2000. № 9. С. 29-35.

-
15. Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК с применением системы АВГУР 5.2 // Концерн «Росэнергоатом», Москва, 2006 г.
16. **Иванов В.И., Коновалов Н.Н., Котельников В.С. и др.** Вопросы оценки риска аварии с использованием технического диагностирования // Контроль. Диагностика. 2015. № 3. С. 12-20.
17. **Бадалян В.Г.** Возможности ультразвуковой дефектометрии и риск-ориентированный подход в диагностике. //Контроль. Диагностика. (в печати)
18. **Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Коколев С.А. и др.** Система автоматизированного контроля АВГУР-АРТ – от искусства новых возможностей к практической диагностике. / Ультразвуковая дефектометрия, 25 лет: юбилейный сборник трудов ООО НПЦ «ЭХО+» /под ред. А.Х. Вовилкина/. М; С-Петербург: СВЕН, 2015, С.76-85.
19. **Бадалян В.Г.** Оценка достоверности результатов УЗК в аустенитных сварных соединениях (с применением когерентных систем) // Контроль. Диагностика. 2016, № 12, С.4-9.