

## Радиография или ультразвук – что лучше?

### Radiography or ultrasound – which is better?

Рассмотрены преимущества и недостатки радиографии и автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных. Сопоставляются информативность и чувствительность этих методов. Проанализированы возможности измерения размеров дефектов в радиографии и при АУЗК. Утверждается, что для практических целей выявляемость и погрешность определения геометрических размеров дефектов при АУЗК с когерентной обработкой данных вполне достаточна.

Приведен пример применения системы с когерентной обработкой данных для контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов значительной толщины — до 45 мм. Трубопроводы использованы при строительстве комплекса каталитического крекинга. Хронометрирование работ показало, что выполнение АУЗК одного сварного соединения  $\varnothing 508 \times 34$  мм не превышало 60 мин, при возможности проведения других монтажных работ.

The advantages and disadvantages of radiography and automated ultrasonic testing (AUT) with a coherent data processing. The information content and sensitivity of these methods are compared. The possibilities of measuring the size of defects in radiographic and ultrasonic examination are analyzed. It is argued that for practical purposes, detection and error in determining the geometric dimensions of the defects in the AUT with a coherent treatment of data is sufficient.

An example of application of the system with a coherent treatment of data for testing of austenitic welds in pipelines of considerable thickness — up to 45 mm. Pipes used in the construction of a catalytic cracking unit. Timekeeping work showed that the performance of one AUT-welded joints of  $\varnothing 508 \times 34$  mm didn't exceed 60 minutes at the possibility of other object construction job.

Идея этой статьи принадлежит И.Н. Ермолову, который в 2000 году подготовил первый вариант статьи. С тех пор нами накоплен значительный опыт по замене радиографии автоматизированным ультразвуковым контролем (АУЗК).

Ультразвук и радиография — два основных вида контроля сварных соединений (СС) ответственного назначения, способных выявлять, как внутренние так и наружные дефекты. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками.

Предложения о целесообразности замены радиографического контроля ультразвуковым выдвигались многими специалистами (см., например, [1, 2]). В ряде зарубежных документов, анализируется возможность замены радиографического контроля ультразвуковым и сформулированы требования к ультразвуковому контролю, при выполнении которых он может полноценно заменить радиографию [3].

В связи с развитием компьютерной техники, созданием методов и средств АУЗК, использующих когерентную обработку данных, ультразвуковой метод контроля приобрел ряд дополнительных качеств таких, как возможность:

- хранения данных контроля,
- анализа данных и интерпретации результатов независимыми специалистами,

- определения реальных параметров несплошностей и, в первую очередь, плоскостных дефектов,
- точного, в пределах практической необходимости, определения координат залегания несплошностей.

В работе рассмотрен вопрос о возможности и целесообразности замены радиографического контроля ультразвуковым контролем с когерентной обработкой данных, что делает неразрушающий контроль сварных соединений достаточно точным (в пределах требований практики), более надежным, чувствительным, безвредным и дешевым.

### 1. Радиография

В настоящее время основным средством неразрушающего контроля СС трубопроводов является радиография. В частности, в атомной энергетике в общем объеме неразрушающего контроля радиография занимает около 30%. Это связано с более долгим периодом развития и применения в промышленности, а также несомненными достоинствами этого метода контроля из-за использования коротковолнового излучения для получения изображений внутренних дефектов в объектах. В результате этого изображения дефектов, получаемые при радиографии, близки к оптическим, и поэтому

сравнительно легко расшифровываются и оцениваются специалистами-дефектоскопистами, сварщиками и эксплуатационным персоналом. Кроме того для облегчения интерпретации полученных при контроле изображений созданы атласы, помогающие быстро классифицировать тот или иной дефект. Существенным также является то, что радиационные методы позволяют измерять размеры выявленных дефектов с высокой точностью, недостижимой для практического ультразвука при контроле изделий толщиной менее 40 мм. Необходимо отметить, что радиационные методы с высокой достоверностью обнаруживают некоторые типы дефектов — объемные дефекты типа пор и шлаковых включений.

Вместе с тем радиографические методы контроля обладают существенными *недостатками*:

- точность определения геометрических размеров несплошностей (длины, ширины) значительно снижается с увеличением толщины контролируемого изделия;
- достоверность обнаружения наиболее опасных — плоскостных дефектов типа трещин и непроваров — низкая;
- чувствительность к выявлению плоскостных несплошностей значительно снижается с толщиной, например для изделий толщиной до 40 мм минимальное раскрытие таких дефектов — около 10 мкм, при толщине изделия 100 ÷ 150 мм минимальное раскрытие — 30 мкм;
- необходима защита от радиационного излучения для персонала, выполняющего контроль, и окружающих лиц;
- с экономической точки зрения, использование радиографических методов может оказаться намного дороже, чем применение УЗ: требуются специализированные комнаты и время на проявление пленки; необходимо использовать дорогостоящие расходные материалы. Для контроля габаритных изделий часто возникают трудности в размещении приборов для выполнения контроля, требуются специальные помещения, мощные источники рентгеновского или гамма излучения.

## 2. Ультразвуковой контроль

Автоматизированный ультразвуковой контроль с когерентной обработкой данных имеет **ряд преимуществ**:

- Ультразвук хорошо отражается от наиболее опасных плоскостных дефектов — типа трещин, непроваров. Это связано тем, что само распространение ультразвуковых волн происходит вследствие наличия упругих связей между эле-

ментами среды, а любая даже очень тонкая несплошность нарушает эти связи.

- Приборы ультразвукового контроля более мобильны и контроль можно выполнять практически в любых условиях.
- В дефектоскопии используется ультразвук очень малой мощности, который полностью безвреден для персонала и для окружающих лиц.
- Отсутствие расходных материалов.
- АУЗК проводится в среднем в 4 раза быстрее, чем радиография (по данным НПФ АВЭК [4]).

Вместе с тем ультразвуковой метод имеет **ряд недостатков**:

- В УЗК не существует обширного атласа изображений дефектов, по которому легко классифицировать тип дефекта. Это связано с тем, что:
  - вид изображения существенно зависит от использованных алгоритмов его построения;
  - в большинстве случаев вид изображения не совпадает с его оптическим образом (связано с большей длиной используемой звуковой волны по сравнению с оптической);
  - объемные дефекты (поры, шлаковые включения) обнаруживаются достаточно легко, но оценить параметры такого дефекта по его изображению очень непросто.
- УЗК значительно хуже выявляет и классифицирует объемные дефекты типа пор и шлаковых включений.

## 3. Характеристики радиографического и ультразвукового видов контроля

Информативность ультразвукового и радиографического методов.

Форма дефекта:

- при ультразвуковом контроле оценивается весьма грубо (точность определения границ несплошности не превышает  $\lambda$ ). Вместе с тем использование специальных алгоритмов обработки данных контроля (MULTY-C-SAFT [5]) в дополнение к обычно применяемому послойному методу FT-SAFT [6] позволяет уверенно различать типы дефектов — объемные (шлаковые включения, поры) и плоскостные (трещины, непровары).
- при радиографии точнее анализ и классификация объемных дефектов. Однако для плоскостных дефектов достаточно уверенно определяется его протяженность и азимут, но не высота (особенно для плоскостных несплошностей наиболее распространенной вертикальной ориентации). Что касается измерения величины раскрытия таких несплошностей то и УЗК, и радиография таких значений не дают. Вместе с тем,

значения раскрытия, например, трещины оказывают значительное влияние на чувствительность контроля.

Чувствительность:

- радиографического контроля по проволочным и канавочным эталонам для толщин  $10 \div 40$  мм составляет  $0,2-0,5$  мм и для толщин от  $40$  мм до  $120$  мм —  $0,6 \div 1,25$  мм [7].
- Минимальные размеры выявляемых реальных дефектов характеризуется следующими данными [8]:
  - Поры и включения могут не выявляться, если диаметр их поперечного сечения меньше удвоенной чувствительности по эталону.
  - Непровары и трещины могут не выявляться, если их глубина меньше удвоенной чувствительности контроля. В частности, для толщин до  $40$  мм дефекты не выявляются, если их раскрытие менее  $0,1$  мм. Они также не выявляются, если плоскость раскрытия не совпадает с направлением просвечивания.
- Ультразвуковой контроль с когерентной обработкой данных, определяется двумя видами взаимодействия акустических волн с объектом: зеркальным отражением акустических волн от несплошностей (если они велики) и границ объекта контроля и дифракцией волн на несплошностях или их фрагментах. Так сферические несплошности диаметром  $0,3$  мм уверенно выявляются на глубинах не менее  $60$  мм. Дефекты типа непроваров и вертикальных трещин хорошо выявляются, если от них принимаются зеркальные отражения УЗ. Неблагоприятно ориентированные дефекты хуже выявляются при контроле. Такие дефекты обнаруживают путем регистрации волн, дифрагированных от краев трещин. Для плоскостных дефектов уверенное выявление несплошностей соответствует уровню выявления объемных одиночных несплошностей. В том случае, когда необходимо проводить измерения геометрических размеров несплошностей, размеры последних должны превышать  $\lambda$ .

Оценка возможностей выявления и классификации дефектов СС приведена в табл. 1.

Измерение размеров дефектов в радиографии.

- точность определения протяженности дефектов (вдоль и поперек СС) при радиографическом контроле весьма высока и сравнима с точностью визуального метода. Вместе с тем, за счет геометрической нерезкости изображений дефектов на снимках (при расположении пленки вплотную к контролируемому объекту) составляет для толщин  $10 \div 40$  мм величину  $0,1 \div 0,25$  мм и для толщин от  $40$  мм до  $120$  мм —  $0,3 \div 0,7$  мм. В том слу-

чае, когда дефекты расположены между источником и пленкой возможно дополнительное увеличение размеров изображений не более чем на  $25\%$  [4].

- Высоту дефектов определяют по сравнению оптической плотности изображения дефектов снимке, вызываемых дефектом и канавочным эталоном. Однако, фактически, оптическая плотность сильно зависит от формы и размеров дефекта, поэтому в нормативных документах не предусматривается определения размеров дефектов в направлении просвечивания (т.е. высоты дефекта).

Измерения размеров дефектов в ультразвуковом контроле.

Геометрические размеры несплошности определяются:

- по протяженности (вдоль и поперек СС) выбранной схемой регистрации и обработки данных и составляет величину от нескольких мм (при применении послойной регистрации и обработке данных) и длиной используемой акустической волны  $\lambda$  — при использовании 3D регистрации и обработке данных контроля [3].
- по высоте дефектов величиной  $\lambda$  и типом несплошности. Для несплошностей с размерами меньших  $1 \div 2\lambda$  высоту дефектов можно определить, сопоставляя амплитуды изображения несплошности и опорного отражателя, которых должен иметь то же акустическое поведение (иметь похожую геометрическую форму). Поэтому оценка размеров несплошности основанная на амплитуде, является достаточно грубой. Для несплошностей больших размеров при определении высоты дефекта играет элемент изображения, связанный с дифракцией края дефекта и так как размеры этого элемента по уровню  $6\text{дБ}$ , составляет величину не менее  $\lambda$ , то погрешность определения размеров  $\pm 0,5\lambda$ . Конкретные значения погрешностей при измерениях размеров дефектов методами радиографии и когерентными ультразвуковыми приведены далее в табл. 2.

Рассмотрим параметры радиографического и ультразвукового контроля с позиций использования результатов контроля для надежного определения работоспособности, периодичности контроля, прогнозирования времени дальнейшей эксплуатации контролируемого изделия, содержащего несплошности. Этими вопросами занимаются специалисты по прочности. При анализе поведения конструкции, содержащей дефекты, во время эксплуатации специалисты по прочности не могут использовать результаты определения дефектов

Табл. 1. Возможности выявляемости и классификации дефектов СС

Тип дефекта по данным КУЗК	Тип дефекта по данным радиографии	Характер дефекта	АУЗК с когерентной обработкой данных	Радиография
Плоскостной (в ряде случаев трещина)	Трещины	Трещина вдоль шва	+	±
		Трещина поперек шва	+	±
		Трещина разветвленная	+	±
	Непровары	Непровар в корне	+	±
		Непровар между валиками	+	±
		Непровар по разделке	+	±
Объемный, одиночный скопление, цепочка	Поры	Отдельная пора	+	+
		Цепочка	+	+
		Скопление	+	+
	Шлаковые включения	Отдельное включение	±	+
		Цепочка	±	+
		Скопление	±	+
Окисные включения		±	-	
Вогнутость корня шва		±	+	
Выпуклость корня шва				
	Подрез			+
Смещение кромок	-		+	-
Расслоение	-		+	-

+ — отличная, ± — посредственная

в виде условных или эквивалентных размеров, принятых традиционной дефектоскопии, так как многочисленные исследования показывают, что хотя условные размеры неплохо коррелируют с реальными размерами, высота выявленных дефектов совершенно не связана с эквивалентными размерами [9]. Так как наиболее опасными являются плоскостные дефекты, то особое внимание уделяется их существованию, локализации и размерам. Для выполнения надёжных прочностных расчетов необходимо знание реальной высоты и длины дефектов. При этом дефект представляется в виде прямоугольника, или эллипса (полуэллипса). Для построения модели дефекта особенно важна его максимальная высота (из-за особенностей развития дефекта в напряженной конструкции), которая требуется со значительной точностью. Что касается точности определения длины дефекта, то необходимость в высокой точности возникает только для объектов небольшого размера или очень большой значимости (например, ИТЭР). Для реальных объектов, например аустенитных СС трубопроводов диаметром 325 мм и толщиной 15 мм первого контура ядерного реактора, вполне достаточна

точность измерения высоты дефекта  $\pm 1$  мм и длины  $\pm 10$  мм. Это хорошо видно из диаграммы допускаемых размеров (высоты и длины) дефектов, определяющей безопасную эксплуатацию объектов контроля с дефектами в течение 1, 3 и 4 лет (см. рис. 1). Здесь же приведены параметры дефектов при значениях которых возможна эксплуатация объекта в течение всего срока его использования и предельно допустимые параметры дефектов.

Анализ табл. 2 показывает, что для объемных дефектов типа пор или включений, локализованных на глубинах до 40 мм обнаружение дефектов несколько лучше при радиографическом контроле; погрешность измерения контуров выявленных несплошностей (ширины и длины) также выше при радиографическом контроле. При большей глубине залегания несплошностей АУЗК с когерентной обработкой данных, по крайней мере, не хуже с точки зрения их обнаружения. Однако использование УЗК дает возможность оценить третье измерение несплошности — высоту с достаточно малой погрешностью (порядка  $\lambda$ ). Что касается наиболее опасных — плоскостных дефектов типа трещин, то применение УЗК дает возможность измерять

**Табл. 2.** Погрешность измерения размеров дефектов в радиографии и в АУЗК с когерентной обработкой данных

Тип несплошности	Толщина объекта контроля, мм	Радиография			АУЗК с когерентной обработкой данных		
		Мин. выявляемый дефект, мм	Погрешность измерения размеров, мм		Мин. выявляемый дефект, мм	Погрешность измерения размеров, мм	
			Длина, ширина (диаметр)	Высота		Длина; ширина	Высота
Объемная	10	0,3	0,4	-	0,5	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	1
	20	0,6	0,75	-	0,5	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	1
	40	1	1,25	-	0,5	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	1
	100	2	2,5	-	1	2; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	2
	140	2,5	3,1	-	2	2; 10 <sup>2</sup> ; 2 <sup>3</sup>	2
Плоскостная	10	0,3 <sup>1</sup>	0,4	-	0,5	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	2
	20	0,6	0,75	-	1	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	2
	40	1	1,25	-	1	1; 10 <sup>2</sup> ; 1 <sup>3</sup>	2
	100	2	2,5	-	1	2; 10 <sup>2</sup> ; 2 <sup>3</sup>	2
	140	2,5	3,1	-	1	2; 10 <sup>2</sup> ; 2 <sup>3</sup>	2

<sup>1</sup> — Если плоскость раскрытия которых совпадает с направлением просвечивания; раскрытие плоскостного дефекта больше 10 мкм — для толщин до 40 мм и 30 мкм — для толщин до 150 мм.

<sup>2</sup> — При послойной регистрации и обработке данных контроля.

<sup>3</sup> — При 3D обработке данных контроля.

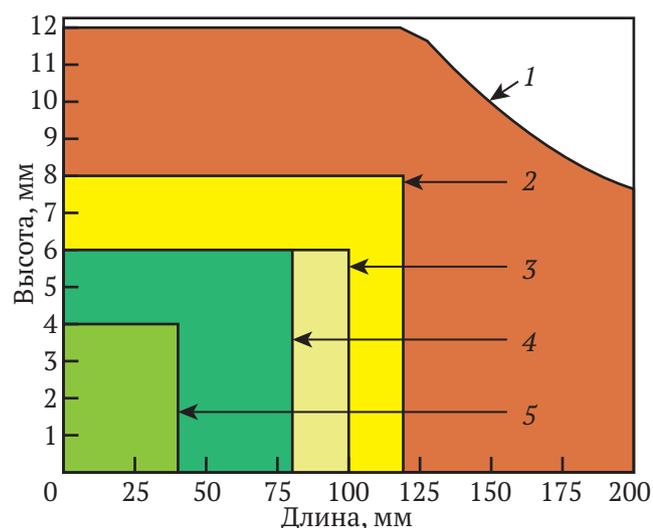


Рис. 1. Диаграмма допускаемых размеров дефектов: 1 — предельно допускаемые дефекты; 2 — область, безопасная на срок эксплуатации объекта; 3 — область, безопасная для эксплуатации на 1 год; 4 — область, безопасная для эксплуатации на 2 года; 5 — область, безопасная для эксплуатации 4 года

важнейший параметр трещины — ее высоту, тогда как такую информацию рентгенография не дает. Необходимо иметь в виду, что определить высоту

дефектов возможно только тогда, когда она превышает величину  $\lambda$ . В практике высота несплошности должна превышать 2 мм; если высота меньше, то надежно определить (без априорной информации) тип дефекта и его высоту не представляется возможным. Обнаружение несплошностей более надежное при УЗК и чем на большей глубине залегает дефект, тем надежнее. Что касается определения геометрических параметров несплошности, то погрешность определения высоты составляет на величину  $(1 \div 2)\lambda$  (на практике около 2 мм); погрешность определения длины дефекта связана с применяемым способом регистрации и обработки данных — 10 мм при использовании послойной регистрации и обработки данных и до  $1 \div 2$  мм — при использовании трехмерной регистрации обработки данных.

Таким образом, применение АУЗК с когерентной обработкой данных при контроле изделий толщиной от 40 мм имеет значительные информационные преимущества по сравнению с радиографией (в первую очередь, когда по априорным данным — результатам разрушающего контроля, металлографии, физико-химического и прочностного анализа — основными дефектами являют-

ся плоскостные дефекты типа трещин различной природы).

Приведем пример работы, направленной на замену радиографического контроля ультразвуковым, выполненной в 2010 г. В ней выполнялся ультразвуковой неразрушающий контроль технологических трубопроводов толстостенных аустенитных СС нефтехимического и нефтеперерабатывающего производства, изготовленных из аустенитных сталей диаметром  $219 \div 600$  мм и толщинами  $20 \div 45$  мм [10]. При контроле таких аустенитных сварных соединений, применение рентгенографического метода ограничивается значительным снижением чувствительности, что приводит к увеличению мощности источника ионизирующего излучения, значительному увеличению времени экспозиции и связанными с этим организационными трудностями обеспечения безопасности при работе с источниками ионизированного излучения, а также низкой производительностью контроля. Поэтому при строительстве комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» было решено заменить рентгенографический контроль АУЗК с когерентной обработкой данных. Была разработана и испытана методика АУЗК с использованием систем АВГУР-Т [11]. Особенностью методики является применение когерентных методов обработки эхо-сигналов, которые весьма эффективны при контроле аустенитных СС [3].

Результаты АУЗК сопоставлялись с данными рентгенографического контроля и было установлено, что контроль, проводимый в соответствии с разработанной методикой, обеспечивает обнаружение дефектов в СС, включая границу и околошовную зону. Дополнительные исследования образцов производственных СС технологического трубопровода  $\varnothing 508 \times 35$ , изготовленных из стали А312, установки вакуумного газойля продемонстрировали возможность выявления технологических и искусственных несплошностей, эквивалентная площадь которых равна или превышает  $2 \text{ мм}^2$ , что соответствует требованиям, установленными правилами ПБ 03-585-03 [12]. Вместе с тем было отмечено, что при АУЗК, на контрольном уровне выявляются дефекты, которые не обнаруживаются рентгенографическим контролем, что свидетельствует о более высокой чувствительности АУЗК. Заметим, что при контроле, проводимом системой АВГУР-Т, выполняется сохранение исходных данных в базе данных системы без каких-либо предварительных обработок, что позволяет выполнять их просмотр в любое время после проведения контроля. Эта особенность систем АУЗК удовлетворяет

требованиям ASME CASE 2235-9 [3] для возможности замены рентгенографического метода контроля на ультразвуковой.

Таким образом, испытания методики контроля показали, что АУЗК удовлетворяет требованиям ПБ 03-585-03 к чувствительности контроля и типам выявляемых дефектов.

Возможность измерения размеров дефектов удовлетворяет требованию ASME CASE 2235-4. Методика получила разрешение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России на применение на объектах химических и нефтехимических взрывоопасных производств.

В соответствии методикой [7] был выполнен АУЗК аустенитных СС технологических трубопроводов установки гидроочистки вакуумного газойля комплекса каталитического крекинга нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛукойлНижегороднефтеоргсинтез». Всего было проконтролировано 91 аустенитное СС. Для примера на рис. 2 представлены результаты контроля в виде развертки типа D (вдоль сварного соединения), на которых видны допустимые (не превышающие браковочного уровня) точечные дефекты, расположенные на границе валиков и провисание корня СС.

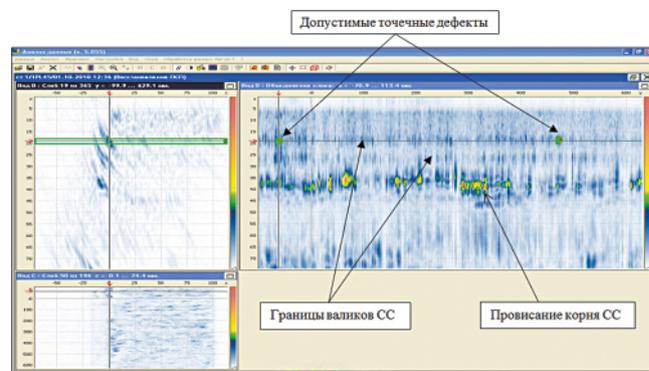


Рис. 2. Развертка типа D с индикациями дефектов

Обращает внимание четкая индикация валиков СС, которая свидетельствует о возможности достоверной локализации дефектов и достаточно высоком уровне чувствительности контроля. Установлено совпадение дефектов, выявленных по результатам ручного ультразвукового контроля, с дефектами, выявленными системой АВГУР-Т, по координатам их положения и по эквивалентным размерам с учетом погрешностей пересчета и измерения координат.

**Хронометрированные работ, показало, что,** выполнение АУЗК одного сварного соединения  $\varnothing 508 \times 34$  не превышает 60 мин при возможности проведения других монтажных работ и обеспечении соблюдении мер безопасности для окружающих.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основное требование к системам ультразвукового контроля для обеспечения полноценной замены радиографического контроля сварных соединений ультразвуковым — автоматическая регистрация факта проверки данного сварного соединения, создание объективного документа, позволяющего установить факт и качество контроля данного сварного соединения и сохраняющего полученные результаты контроля. Оптимальное средство удовлетворения данного требования — компьютерная регистрация результатов контроля с автоматической регистрацией положения акустических преобразователей при сканировании.
2. Не менее важное требование к системам ультразвукового контроля — повышение их информативности в тех областях, где радиационный контроль превосходит ультразвуковой, а именно:
  - 2.1. Обеспечение выявления небольших объемных дефектов типа пор и включений диаметрами не менее 1–2 мм.
  - 2.2. Повышение точности измерения размеров дефектов вдоль сварного шва и по его высоте с тем, чтобы погрешность не превосходила 1–2 мм.
  - 2.3. Повышение достоверности при определении характера дефектов по результатам контроля, более наглядное представление результатов.
3. Перечисленным требованиям применительно к сварным соединениям толщиной более 10 мм удовлетворяют системы АУЗК с когерентной обработкой данных. При этом приборы с ФАР значительно превосходят своей мобильностью системы радиографии при контроле изделий толщиной до 40 мм. При толщинах объекта контроля более 40 мм или больших размеров характеристики и мобильность систем с обработкой данных методом SAFT имеет несомненные преимущества перед радиографией.
4. Реальной замене радиационных методов контроля ультразвуковыми, даже после решения технических проблем, будут препятствовать такие обстоятельства, как трудности освоения компьютерных систем дефектоскопистами, привычка к использованию традиционного метода контроля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич А.К. Объективен ли метод радиографирования сварных соединений? В мире неразрушающего контроля 1999 № 3, с. 24.
2. Розина М.В. Ультразвук или радиография? В мире неразрушающего контроля 1999 № 3, с. 25.

3. ASME CASE 2235–4. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography. December 23, 1996.
4. <http://www.avek.ru/>
5. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектометрии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей // В мире неразрушающего контроля, 2012, № 3 (57), с. 20–25.
6. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. — М.: Машиностроение, 2008. — 368 с. 7.
7. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Радиографический метод. ОСТ 102-51-85.
8. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. ГОСТ 7512–82.
9. В.Г. Щербинский. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. Тиссо, Москва, 2003. — 313 с.
10. Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В. Тихонов Д.С. Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля технологических трубопроводов из аустенитных сталей взамен радиографического контроля на примере строительства комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». (В мире НК. Настоящий выпуск.)
11. «Методика автоматизированного ультразвукового контроля стыковых сварных соединений технологических трубопроводов из сталей аустенитного класса с применением системы АВГУР-Т» (МА-ТД-НХ1-Т2С/26-К-10).
12. ПБ 03-585-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов, 2003.