

# **Технология УЗ контроля толстостенных кольцевых сварных соединений Ду1200 парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000.**

В.Г. Бадалян, П.Ф. Самарин, Д.С.Тихонов (Научно Производственный Центр «ЭХО+»)

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Важнейшей частью парогенераторов являются коллекторы, которые предназначены для раздачи теплоносителя по теплообменным трубкам. Сварное соединение (СС) главного циркуляционного трубопровода с парогенератором представляет достаточно сложный узел. В нем между наружной поверхностью коллектора и внутренней поверхностью патрубка имеется полость, в которой «слабым» звеном, с точки зрения возможности образования дефектов, является область галтельного перехода этого сварного узла. Анализ условий эксплуатации показал, что в этой зоне металл подвергается интенсивной коррозии, за счет образования застойной зоны теплоносителя в условиях сложного напряженного состояния [1]. Металлографические и фрактографические исследования [2], показали, что в процессе эксплуатации в области зоны радиусного перехода от галтели к цилиндрической поверхности кармана могут образоваться трещины, которые возникают в основном металле коллектора на их внутренних поверхностях. В номинальном режиме эксплуатации их возникновение связано с присутствием концентраторов, которыми могут служить глубокие риски и подрезы на внутренней поверхности «кармана» при его изготовлении или каверны и язвы, возникшие в процессе эксплуатации под воздействием коррозионно-активных примесей и шлама. В зонах повреждения характер разрушения имеет природу коррозионного растрескивания под напряжением; трещины развиваются по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания (сателлитные трещины) и механизму коррозионно – усталостного растрескивания (магистральные трещины). Трещины имеют ветвистый характер; при этом в плоскостях перпендикулярных направлению кольцевой трещины наблюдаются трещины – сателлиты с различной ориентацией по отношению к стенке коллектора. Сателлитные трещины тонкие, имеют межкристаллитный характер распространения, ответвления носят хаотичный характер распространения в объеме металла. Анализ результатов ручного ультразвукового контроля, выполненного на АЭС, показывает, что этот вид дефектов растет в процессе эксплуатации. Вместе с тем, нет необходимости подвергать ремонту все обнаруженные дефекты – дефекты небольшого размера могут быть оставлены в объекте на время следующего периода эксплуатации. Однако за их ростом необходимо наблюдать во время планово-предупредительных ремонтов, причем очень важно зафиксировать местоположение и размеры дефектов. Кроме рассмотренных дефектов, появляющихся в процессе эксплуатации возможно присутствие технологических внутренних несплошностей, таких как непровары, несплавления, включения, которые могут локализоваться во

всем объеме наплавленного металла сварного соединения (включая его корень), по линии сплавления с основным металлом и в околошовной зоне. Согласно предварительной оценке критических и допустимых размеров трещин в зоне сварного шва допустимые размеры дефектов равны по глубине 2,5 мм, по длине 12,5 мм; критические размеры дефектов – по глубине 14 мм и по длине 70 мм [2].

В связи с изложенным, высокие требования предъявляются при контроле СС не только к выявлению дефектов, но и к измерению их реальных геометрических размеров, что может быть обеспечено методами и средствами ультразвуковой дефектометрии с применением ультразвуковых систем контроля с когерентной обработкой данных [3]. При этом возможно измерение реальных размеров выявленных дефектов по их трехмерным акустическим изображениям с определением их типа и местоположения; появляется возможность наблюдать за развитием дефекта во время эксплуатации, так как параметры полученных акустических изображений в значительной степени зависят от фазовых составляющих измеренного поля, рассеянного дефектом. Естественно, что аппаратура должна быть установлена так, чтобы при повторном контроле, получить изображение того же внутреннего объема объекта. Автоматизированная аппаратура с жесткой привязкой к системе координат объекта обеспечивает повторяемость и сопоставимость результатов контроля.

В работе рассмотрена методика АУЗК кольцевых сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов Ду1200 реакторов типа ВВЭР-1000 с использованием систем с когерентной обработкой данных серии Авгур [4].

## **2. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ**

### **2.1 Объект контроля**

На рис. 1 изображено сварное соединение узла приварки коллектора к патрубкам Ду1200 парогенераторов и схема акустического контроля с применением ПЭП сдвиговых волн. Область, подлежащая контролю, выделена серым цветом. Как уже упоминалось, дефекты, характерные для рассматриваемого объекта берут свое начало на внутренней поверхности трубопровода и развиваются в сторону наружной поверхности. Для их обнаружения обычно используются два альтернативных метода контроля: ультразвуковой и радиографический.

Заметим, что трещины от коррозии под напряжением извилисты, что затрудняет их поиск и, тем более, оценку высоты радиографическим методом. Вместе с тем обнаружение и измерение высоты дефектов возможно при использовании ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных.

Основные характеристики области сварного соединения следующие:

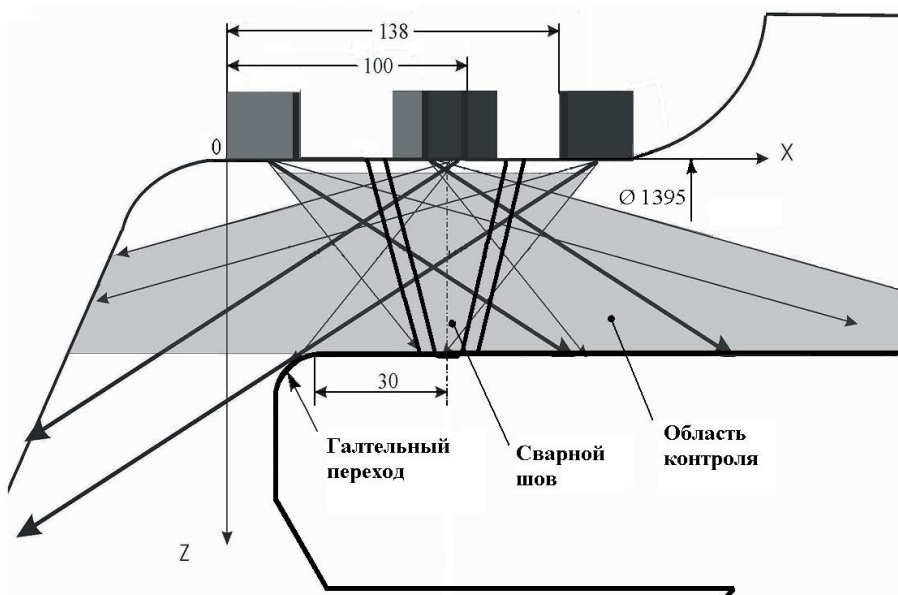
- наружный диаметр 1335 мм;
- толщина стенки свариваемых соединений: 72,5 мм;
- материал коллектора и патрубков: 10ГН2МФА;
- тип сварки: ручная электродуговая;

- разделка сварного соединения:

V-образная двух типов – прямая и наклонная.

## 2.2 Методика контроля

Для обеспечения получения максимально возможной информации целесообразно обеспечить акустическое облучение с обеих сторон интересующего объема, включающего область сварного соединения и галтельный переход. Геометрия объекта контроля позволяет это выполнить (см. рис.1).



**Рис. 1.** Кольцевое сварное соединение узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов Ду1200 реакторов типа ВВЭР-1000: а - эскиз сварного соединения (пунктиром обозначена область УЗК, включающая галтельный переход); б – схемы поперечного прозвучивания ПЭП 2S2.5Н40Т55 (№ 2 и № 4);

Для решения задачи обнаружения дефекта выбраны сдвиговые волны с несколькими углами ввода расходящегося акустического пучка и продольные волны. Этот выбор позволяет увеличить надежность обнаружения несплошностей во всем объеме контролируемого объекта.

Для определения размеров дефекта и его классификации использованы сдвиговые волны с различными углами ввода. Это позволяет получать аддитивный набор трехмерных акустических изображений одного и того же объема контролируемого объекта, соответствующих различным углам ввода акустического пучка. Углы и частота прозвучивания выбраны оптимальными для надежного выявления несплошностей, подробного измерения рассеянного акустического поля, селекции сигналов, связанных с конструктивными элементами объекта (угол ввода составляет примерно  $0^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$  в материале; частота – 2,5 МГц).

Методика обеспечивает [5,6]:

- обнаружение и локализацию технологических и эксплуатационных несплошностей, эквивалентная площадь которых равна или превышает  $3,5 \text{ мм}^2$ ;
- выявление трещин различной ориентации - продольной, поперечной и диагональной, (под углом  $45^\circ$  к оси СС) и близким к ним - протяженностью 10 мм и более и высотой (глубиной) 2,0 мм и более;

- измерение геометрических размеров несплошностей длиной более 10 мм с абсолютной погрешностью измерения длины  $\pm 10$  мм (протяженность вдоль оси шва) и  $\pm 2$  мм для высоты в 95% доверительном интервале.
- обеспечение выявления несплошностей во всем объеме наплавленного металла сварного соединения (включая его корень), по линии сплавления с основным металлом, в околошовной зоне (шириной не менее 20 мм), включая область галтельного перехода патрубка.

### 2.3 Технология проведения АУЗК

АУЗК проводится в двух последовательных режимах функционирования системы Авгур: поисковом и измерительном [7]. Задачей поискового режима является обнаружение несплошностей, определения места их расположения и количественная их оценка по условным характеристикам (эквивалентной площади, условной протяженности, количеству дефектов на определенной длине). При измерительном режиме измеряют реальные размеры дефектов, определяется их тип и координаты залегания. Это обеспечивается детальным измерением эхо-сигналов, от обнаруженных в поисковом режиме несплошностей, и последующим анализом акустических изображения несплошностей, полученных в результате когерентной обработки зарегистрированных данных. Так как полученные после когерентной обработки изображения в значительно большей степени зависят от фазовых составляющих измеренных эхо – сигналов, рассеянных несплошностью, то полученные изображения отражают реальные размеры дефектов. В соответствии с разными задачами, стоящими перед этими режимами контроля используются различные схемы прозвучивания на базе совмещенных ПЭП, использующих различные типы волн (см. табл. 1 и 2)

**Таблица 1. Применяемые при АУЗК ПЭП.**

ПЭП	Центральная частота, МГц	Тип волны*	Угол ввода, град.	Стрела, мм
2S2,5H40T55	2,5 $\pm$ 0.2	S	40 $\pm$ 3	15 $\pm$ 3
		S	55 $\pm$ 3	
L2S2,5H0T50	2,5 $\pm$ 0.2	L	0 $\pm$ 3	15 $\pm$ 3
		S	+50 $\pm$ 3	
		S	-50 $\pm$ 3	
2S2,5H50	2,5 $\pm$ 0.2	S	+50 $\pm$ 3	15 $\pm$ 3
		S	-50 $\pm$ 3	

\*) - L – продольные волны; S – сдвиговые волны.

Перед проведением АУЗК для каждого ПЭП, выполняется процедура калибровки, которая проводится для определения основных параметров ПЭП, работающих в составе системы, расчета их индивидуальных АРД – диаграмм. Особенности этих ПЭП является довольно широкая полоса рабочих частот и сравнительно широкая диаграмма направленности. При этом соблюдался баланс требований высокой чувствительности с большой полосой частот и необходимой конфигурацией приемо-передающего акустического поля.

Таблица 2.

ПЭП	Ориентация относительно оси СС, град	Режимы работы	Выявляемые несплошности, ориентированы:	ПРИМЕЧАНИЕ
L2S2,5H0T50	0	поисковый	поперечно оси СС,	Выявляет межваликовые несплавления элементом ПЭП с углом ввода 0°
2S2,5H50	45	поисковый	диагонально	Контроль со стороны ГЦТ от СС
2S2,5H50	-45			Контроль со стороны парогенератора от СС
2S2,5H40T55	90	поисковый, измерительный	вдоль оси СС	Контроль со стороны ГЦТ от СС
2S2,5H40T55	-90			Контроль со стороны парогенератора от СС

Схема УЗ прозвучивания сварного соединения с применением двухэлементных ПЭП приведена на рис. 1.

#### 2.4 Особенности ПЭП, используемых при контроле:

- **ПЭП типа L2S2,5H0T50:**

Этот ПЭП имеет три активных элемента, позволяющих вводить продольные УЗ волны под углом 0° и сдвиговые УЗ волны под углом ± 50°.

Функциональные особенности ПЭП состоят в том, что:

- ✓ азимутальная ориентация его относительно сварного соединения оптимальна для обнаружения несплошностей, расположенных перпендикулярно к оси сварного соединения по всему контролируемому объему;
- ✓ наличие широкой диаграммы направленности для обоих активных элементов ПЭП позволяет озвучить максимально большой объем контролируемого объекта и повышает надежность обнаружения поперечных дефектов во всем контролируемом объеме;
- ✓ использование продольных волн позволяет выявлять несплошности типа межваликовых несплавлений и коррозионного поражения донной поверхности, включая область галтельного перехода;
- ✓ получение двухмодовой информации об одном и том же объеме контролируемого объекта позволяет повысить достоверность результатов контроля.

- **ПЭП типа 2S2,5H40T55:**

ПЭП имеет два активных элемента, позволяющих вводить сдвиговые УЗ волны под углами 40° и 55°.

При работе в поисковом режиме:

- ✓ используется угол ввода акустического пучка 55° - предельно большой при действующей конструкции контролируемого объекта, который позволяет обнаруживать дефекты, локализованные в области галтельного перехода при облучении последней со стороны парогенератора;

- ✓ другой угол ввода акустического пучка  $40^\circ$  позволяет обнаруживать дефекты, локализованные в области галтельного перехода при облучении последней со стороны главного циркуляционного трубопровода;
- ✓ наличие двух активных элементов дополнительно повышает вероятность обнаружения дефектов;
- ✓ большая ширина диаграммы направленности для обоих элементов ( $\pm 26^\circ$ ), дает возможность за один проход по оси  $Y$  озвучить до 70% контролируемого объема. Поэтому при выполнении сканирования по оси  $X$  имеется некоторая избыточность информации при анализе изображений  $B$  – типа, что увеличивает надежности обнаружения несплошностей, ориентированных вдоль оси шва;

В измерительном режиме:

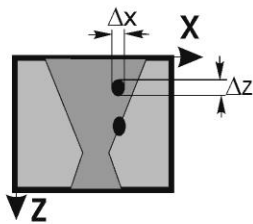
- ✓ Большая ширина диаграммы направленности ПЭП для обоих элементов дает возможность получить изображения контролируемого объема с высоким разрешением за счет когерентной обработки данных с обеих сторон СС, обеспечивая измерение высоты несплошности.
- **ПЭП типа 2S2,5H50:**

ПЭП имеет два активных элемента, позволяющих вводить продольные и сдвиговые УЗ волны под углом  $\pm 50^\circ$ , что позволяет выявлять диагонально ориентированные несплошности по всему контролируемому объему, включая область галтельного перехода.

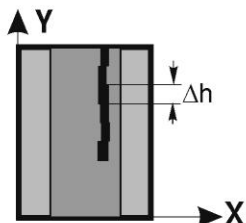
Для каждого режима работы устанавливается свой набор параметров, которые, в основном отличаются условиями регистрации данных при выполнении АУЗК. В частности при поисковом режиме применяются все ПЭП, используемые при контроле; шаг сканирования ПЭП вдоль сварного соединения (ось  $Y$ ) составляет 4 мм, шаг сканирования перпендикулярно оси сварного соединения (ось  $X$ ) составляет 5 мм. При таких параметрах сканирования обеспечивается приемлемое время АУЗК, предназначенное для обнаружения и оконтуривания областей, содержащих несплошности. По данным контроля путем детектирования строятся некогерентные акустические изображения, взаимно дополняющие друг друга, которые затем анализируются.

По результатам поискового контроля по обнаруженным «дефектным» зонам контроля выполняется измерительный контроль, особенностью которого является значительно более подробное измерение поля, рассеянного несплошностями, с тем, чтобы удовлетворить требованиям выполнения когерентной обработки данных [3]. При выполнении измерительного контроля применяются одна пара двухэлементных ПЭП вводящих УЗ сдвиговые волны под углами  $40^\circ$  и  $55^\circ$ ; шаг сканирования ПЭП вдоль оси  $Y$  составляет 4 мм, тогда как шаг сканирования вдоль оси  $X$  – 0,2 мм на апертуре 100 мм. По полученным данным измерительного контроля, используя голографические алгоритмы [8], строятся акустические когерентные изображения. Каждое такое изображение является трехмерным и имеет высокое разрешение в плоскости  $XZ$  – перпендикулярной сварному соединению и обычное, дефектоскопическое в плоскости  $YZ$  - параллельной сварному соединению (см. рис. 2).

### ИЗОБРАЖЕНИЕ В-ТИПА



### ИЗОБРАЖЕНИЕ С-ТИПА



### ИЗОБРАЖЕНИЕ D-ТИПА

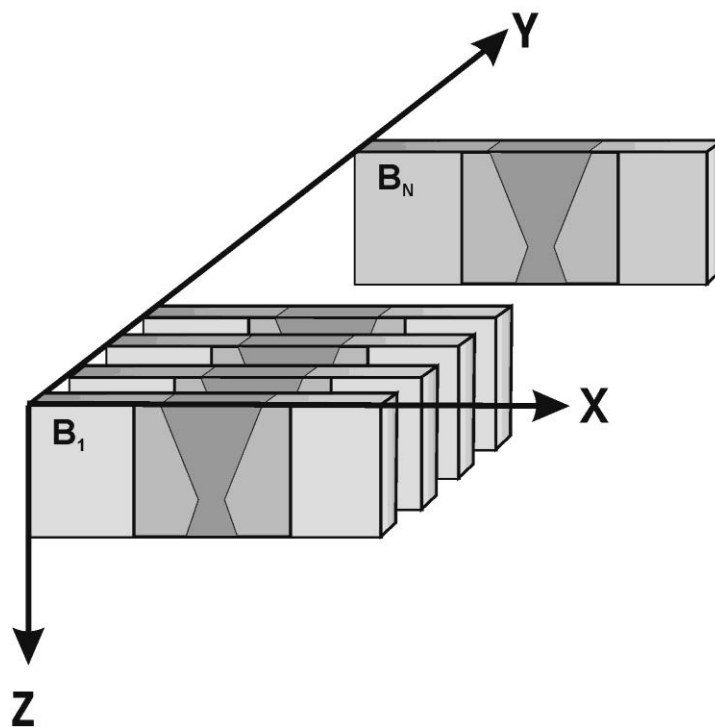
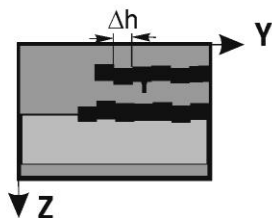


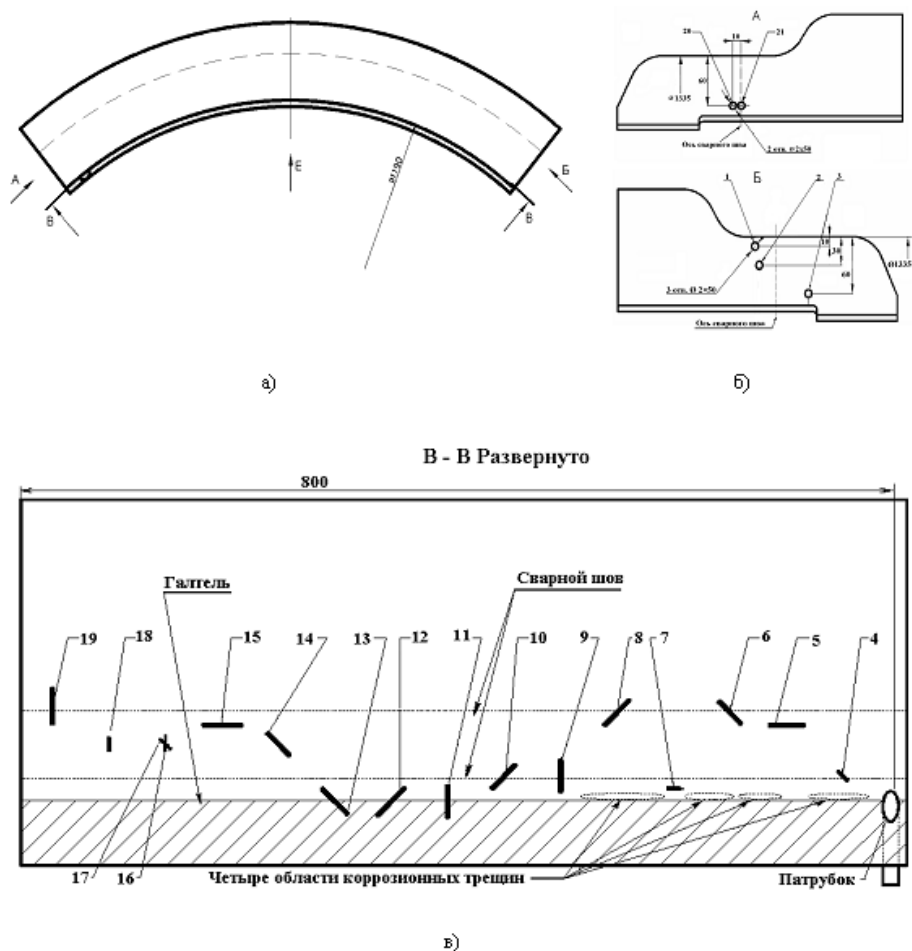
Рис. 2. Схема формирования когерентных изображений в системе Авгур.

Анализируя полученные трехмерные изображения, измеряют размеры выявленной несплошности и определяют ее тип [9,10].

## 3. ИСПЫТАНИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ НА ТЕСТ – ОБРАЗЦЕ

### 3.1 Тест - образец

Испытания методики контроля выполнялись на тест – образце, представляющем собой участок сварного соединения узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенератора реакторной установки ВВЭР-1000 (рис.3). Длина прямолинейного участка образующей патрубка образца, по которой осуществляется регистрация данных – 150 мм, номинальная толщина патрубка – 72,5 мм. В тест – образце изготовлены искусственные отражатели в виде пропилов, имитирующие поперечные и диагональные (под углом  $45^\circ$  к оси СС) трещины, а также отверстия бокового сверления протяженностью  $10 \div 50$  мм и высотой (диаметром)  $2 \div 10$  мм, локализованные в области сварного шва и галтельного перехода. Пропилы выполнены в виде сегментов шириной около  $\sim 0,3$  мм, что несколько больше раскрытия магистральных трещин, обнаруженных в СС в области галтельного перехода ( $\sim 0,1$  мм). Однако их можно использовать в качестве реалистичных отражателей, так как принципиальных изменений характера отражения и дифракции акустических волн на отражателе, которые участвуют в построении изображений дефекта, не имеется.



**Рис. 3.** Тест – образец Ду1200.

Общий вид тест – образца (а) и картограмма расположения искусственных отражателей (б и в).

Всего в реальное сварное соединение и основной металл образца внесены 21 несплошность, местоположение, ориентация и размеры которых, приведены на рис. 3в и, более подробно, в табл. 3. Эти несплошности соответствуют характерным типам встречающихся дефектов в реальных сварных соединениях и расположены в типичных местах их локализации.

**Таблица 3.** Вид, локализация и размеры искусственных дефектов в тест – образце Ду1200.

№ несплошности	Тип имитируемой несплошности	Параметры отражателя			
		Конфигурация	Ориентация, локализация	Размеры	
				Длина, мм	Высота, мм
1	Объёмная	Боковое отверстие	По границе разделки шва	50	2
2	Объёмная	Боковое отверстие	По границе разделки шва	50	2,1
3	Объёмная в области галтели	Боковое отверстие	По границе разделки шва	51,9	2
4	Трещина	Сегмент	Под углом 45° к оси Y в области границы разделки шва	10,2	0,8
5*	Трещина	Сегмент	Вдоль оси Y в области границы разделки шва	25,9	3,9
6	Трещина	Сегмент	Под углом 45° к оси Y в области границы разделки шва	24,2	3,0
7*	Трещина	Сегмент	Вдоль оси Y в области галтели	10,1	0,8



8	Трещина	Сегмент	Под углом -45° к оси Y в области границы разделки шва	26,5	3,8
9	Трещина	Сегмент	Поперек шва, вдоль оси X в области границы разделки шва	22,8	3,0
10	Трещина	Сегмент	Под углом -45° к оси Y в области границы разделки шва	27,2	4,2
11	Трещина	Сегмент	Поперек шва, вдоль оси X в области галтели.	29,2	3,2
12	Трещина	Сегмент	Под углом к оси Y 45° в области галтели.	33,8	4,8
13	Трещина	Сегмент	Под углом к оси Y -45° в области галтели	33,7	3,3
14	Трещина	Сегмент	Под углом к оси Y 45° в области корня шва	23,8	2,94
15*	Трещина	Сегмент	Вдоль оси Y в области границы разделки шва	29,0	4,9
16	Трещина	Сегмент	Поперек шва, вдоль оси X в области корня шва	9,4	0,60
17	Трещина	Сегмент	Под углом к оси Y -45° в области галтели	9,5	0,60
18	Трещина	Сегмент	Поперек шва, вдоль оси X в области корня шва	9,1	0,7
19	Трещина	Сегмент	Поперек шва, вдоль оси X в области корня шва	28,1	4,2
20	Объёмная	Боковое отверстие	По границе разделки шва	35,9	2,1
21	Объёмная	Боковое отверстие	По границе разделки шва	51,5	2,0

\*) – продольная ориентация

Кроме этих отражателей, в тест – образце присутствуют естественные дефекты, которые выявляются при визуальном контроле: трещина в галтели, в области патрубка, четыре области коррозионного изъязвления и растрескивания в галтели и, по результатам РГК, непровар.

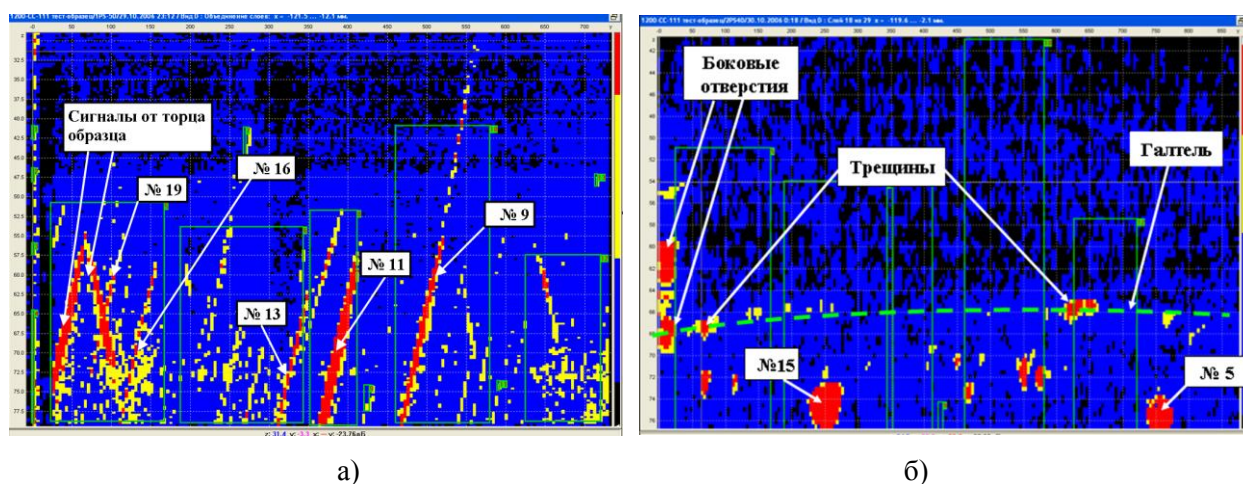
### 3.2 Результаты АУЗК

#### Поисковый режим

Анализ результатов, полученных в поисковом режиме, показывает, что пары ПЭП 2S2,5H40T55 и 2S2,5H50 позволяют, в принципе, обнаружить практически все искусственные дефекты. Однако для увеличения надежности контроля весьма полезным оказался ПЭП L2S2,5H0T50. В измерениях не был обнаружен дефект №4. Причиной этого является мешающее влияние соседних дефектов, которые затеняли дефект №4 и ограничивающее влияние размеров тест – образца, а также его малые размеры – длина и высота, фактически меньшие, чем предполагается в методике. Вместе с тем, когда не «мешают» (на затеняют) соседние дефекты и приемная апертура достаточна, такой дефект уверенно обнаруживается (дефект №7). Этот дефект был обнаружен при использовании ПЭП типа 2S2,5H40T55 и 2S2,5H50 по трем акустическим каналам, соответствующим акустическим пучкам ввода ультразвука под углами 40°, 50° и 55°. Эквивалентная площадь дефекта №7, представляющего собой полуэллипс длиной 10,1 мм и высотой 0,77 мм, для этих ПЭП равна 1,1 мм<sup>2</sup>, 2,5 мм<sup>2</sup> и 3,8 мм<sup>2</sup>, соответственно. Таким образом, в поисковом режиме легко достигается уровень чувствительности 3,5 мм<sup>2</sup>, удовлетворяющий требованиям к рассматри-

ваемой методике. Заметим, что в измерительном режиме чувствительность значительно выше за счет применения когерентной обработки, что позволяет измерить размеры дефекта (см. табл.4).

На рис. 4 приведены результаты АУЗК в поисковом режиме некоторых искусственных дефектов в тест – объекте с использованием 50°-пластины (ПЭП L2S2,5H0T50) при контроле на поперечные дефекты и 40°-пластины (ПЭП 2S2,5H40T55) – на продольные дефекты. Тонкими зелёными линиями обозначены зоны, содержащие несплошности. Наиболее протяженные области, содержащие несплошности, обнаруживаются в данных АУЗК на поперечные дефекты (рис. 4а), что связано с большим количеством поперечных и диагональных дефектов в образце, чем продольных. Изображение ряда искусственных и естественных дефектов, полученное в поисковом режиме с использованием ПЭП, ориентированного перпендикулярно оси СС приведено на рис. 4б. Кроме поперечных дефектов, для регистрации которых предназначена 50°-пластина ПЭП L2S2,5H0T50, выявляются также диагональные дефекты (на рис. 4а, дефект № 13). Вместе с тем при поиске продольных дефектов с применением ПЭП 2S2,5H40T55 возможна регистрация некоторых поперечных и диагональных дефектов, имеющих очень небольшую протяженность на изображении D – типа.



**Рис. 4.** Некогерентные изображения искусственных дефектов в тест образце (поисковый режим): а – с использованием ПЭП L2S2.5H0T50, выявление поперечных дефектов; б – с использованием ПЭП 2S2.5H40T55, выявление продольных дефектов.

### Измерительный режим

Данные по определению реальных размеров дефектов в тест-образце, полученные по результатам измерительного контроля приведены в таблице 4.

**Таблица 4.** Определение размеров дефектов в тест-образце по результатам измерительного режима.

Номер де- фекта	Реальные размеры		Размеры, измеренные АВГУР		Ошибка измерений разме- ров дефекта	
	Длина, мм	Высота, мм	Длина, мм	Высота, Мм	Длины, мм	Высоты, мм
<b>ИСКУССТВЕННЫЕ ДЕФЕКТЫ</b>						
1	50	2,0	50	2	0	0
2	50	2,1	50	2	0	0
3	51,9	2,0	50	2	-2	0

4	10,2	0,8	-	-	-	-
5	25,9	3,9	32	5	+6	+1
6	24,2	3,0	22	3	-2	0
7	10,1	0,8	10	1	0	0
8	26,5	3,8	20	3	-6	-1
9	22,8	3,0	30	3	+7	0
10	27,2	4,2	22	3	-5	-1
11	29,2	3,2	20	4	-9	+1
12	33,8	4,8	22	3	-12	-2
13	33,7	3,3	36	3	+2	-0,5
14	23,8	2,9	20	2	-4	-1
15	29,0	4,9	40	6	+11	+1
16	9,4	0,60	18	1	+8,5	+0,5
17	9,5	0,60	16	1	+6,5	+0,5
18	9,1	0,7	15	1	+6	+0,5
19	28,1	4,20	25	2	-3	-2
20	35,9	2,1	40	2	+4	0
21	51,5	2,0	58	2	+6,5	0
<b>ЕСТЕСТВЕННЫЕ ДЕФЕКТЫ</b>						
Коррозионные язвы 1*	-	-	25	1	-	-
Коррозионные язвы 2*	-	-	15	1	-	-
Коррозионные язвы 3*	-	-	30	1	-	-
Трещина	-	~ 4**	35	5		+1
Непровар	70	-	80	1	+10	-

\*) – продольная ориентация.

\*\*\*) – по измерению выходящей на торец видимой части трещины

Анализ результатов, приведенных в табл. 4, показывает, что измерение высоты дефектов как искусственных, так и естественных, измеренных при визуальном контроле, находятся в пределах ошибки измерений. Все продольные дефекты (8 искусственных и 6 естественных) измерены с использованием ПЭП 2S2,5H40T55, предназначенного для контроля дефектов именно этого типа; дефекты поперечной ориентации (6 искусственных) измерены ПЭП L2S2,5H0T50; диагональные дефекты (7 искусственных) - 2S2,5H50.

Заметим, что измерения параметров дефектов приводятся с точностью 0,5 мм по высоте и 1 мм – по длине, что связано с большой длиной звуковой волны (свыше 1 мм) и значительным шагом сканирования вдоль оси Y. Ошибка измерения параметров дефектов по результатам модельных экспериментов составляет по высоте  $\pm 1,5$  мм и по длине  $\pm 7$  мм (в 95% доверительном интервале). Безусловно, в реальных условиях контроля величина ошибки несколько возрастет, что демонстрируют результаты АУЗК на реальных трещинах, приведенные в табл. 5.

Подчеркнем, что кроме искусственных дефектов №№1-21 были измерены и естественные дефекты, параметры которых не были определены в паспорте на тест – объект, но которые наблюдаются визуально: коррозионные язвы, очень характерные для данного объекта; трещина (визуально ее высота составляет не менее 4 мм, ориентируясь на выход трещины на боковую поверхность тест – образца). Еще один дефект, выявленный РГК – непровар. Его длина по данным РГК

составляет 70 мм; по данным АУЗК – 80 мм (табл. 4). Кроме того, определены параметры неровности СС, которые сопоставляются с результатами визуального контроля.

Необходимо подчеркнуть, что при определении длины дефектов используются, в первую очередь, данные поискового контроля: границами несплошности считаются те точки, при которых амплитуда эхо-сигнала понижается до контрольного уровня. Для определения высоты дефекта используются данные измерительного контроля: необработанные А – сканы в виде изображений А, В, С и D – типа, когерентные изображения В, С, D – типа.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА РЕАЛЬНЫХ ТРЕЩИНАХ

Измерения на реальных объектах для трех Российских АЭС, выполненные системами серии Авгур, показали надежность выявления дефектов, корректность определения их размеров и типа (см. табл. 5):

Таблица 5. Результаты измерений размеров трещин в области сварного соединения, используя АУЗК и разрушающий контроль.

АЭС	Высота дефекта, мм		Длина дефекта, мм	
	максимальная высота (разрушающий контроль)	максимальная высота (Авгур)	максимальная длина (разрушающий контроль)	максимальная длина (Авгур)
1	До 20	18	Не менее 175	277
2	До 4 (множество дефектов)	Не более 5 (множество дефектов)	Множество дефектов 5-21	Множество дефектов 4-51
3	34-35	38	Не менее 47	131

Таблица 5 убедительно демонстрирует, что системы серии Авгур с использованием рассмотренной выше методики, уверенно выявляют как очень незначительные (по длине и по высоте) дефекты – АЭС №2, так и дефекты с большой высотой и значительной протяженностью – АЭС №1 и АЭС №. При этом точность определения высоты дефектов находится в пределах погрешности измерений. Оценка точности измерения длины дефектов не представляется возможным, так как в разрушающих испытаниях не было выполнено полного объема измерений, позволяющих определить полную длину анализируемой трещины.

В целом заметим, что в модельных измерениях выполнялся контроль дефектов (высотой не более 7 мм) на различной глубине, тогда как в реальных измерениях (табл. 5) высота дефектов была значительно больше – свыше 35 мм. При этом ошибка измерения высоты дефекта была в пределах, определенных методикой.

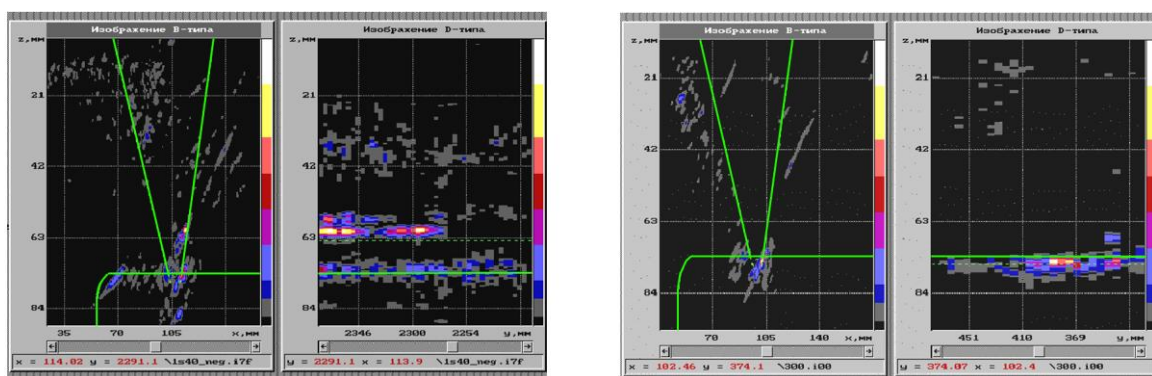
#### 5. АУЗК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДУ1200 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ СЕРИИ АВГУР.

В этом разделе приведены некоторые результаты практического применения системы Авгур на объектах АЭС.

На рис. 5а приведены изображения несплошностей в сварном соединении. Оценка изображения справа определила, что дефекты представляют собой несплавления по кромкам шва с вы-

сотаи 4,5 и 3 мм и длинами 22 и 26 мм. Эти дефекты, не были выявлены при поисковом штатном контроле. Только при дополнительном контроле на повышенной чувствительности их удалось обнаружить. Эти дефекты оказались неопасными, и по результатам прочностного расчета этот сварной был пропущен в эксплуатацию, но его необходимо периодически обследовать, поскольку влияние выявленных несплошностей на прочность шва весьма существенна.

Дефект, показанный на рис. 5б, был забракован по результатам штатного контроля (амплитуда от отражателя превышала браковочный уровень  $7 \text{ мм}^2$ ) и по нормативным документам это сварное соединение подлежало ремонту. Контроль в измерительном режиме АУЗК с применением системы Авгур, показал, что этот отражатель – провисание в корне шва. По результатам контроля дефект не являлся опасным, и сварное соединение было допущено к эксплуатации, ремонт шва не потребовался.



а)

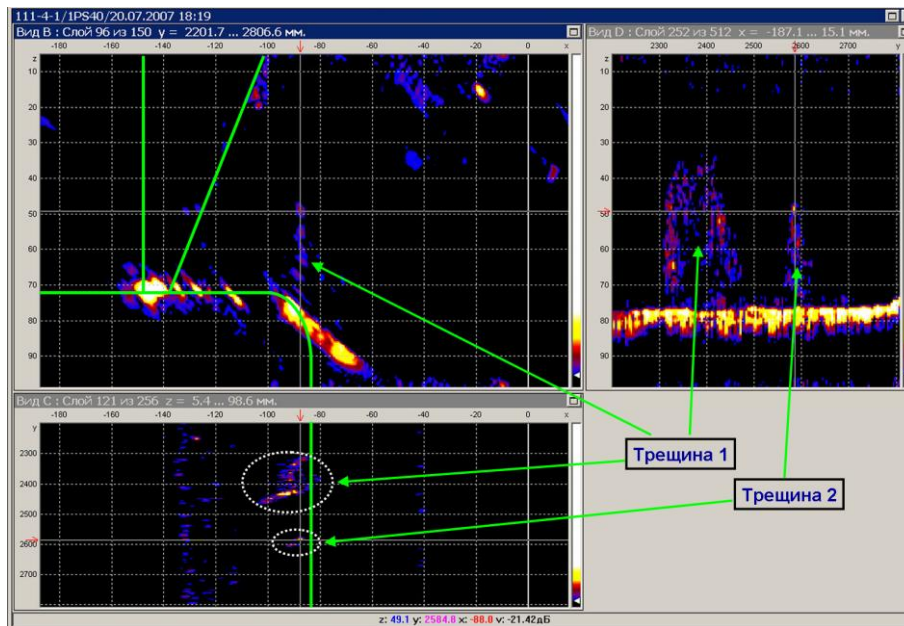
б)

**Рис. 5.** Когерентные изображения несплошностей в сварном шве:

а – изображения В и D – типа несплавлений по кромкам сварного шва с высотами 4,5x22 мм и 3x26 мм; б – изображения В и D – типа «провисания» в корне сварного шва.

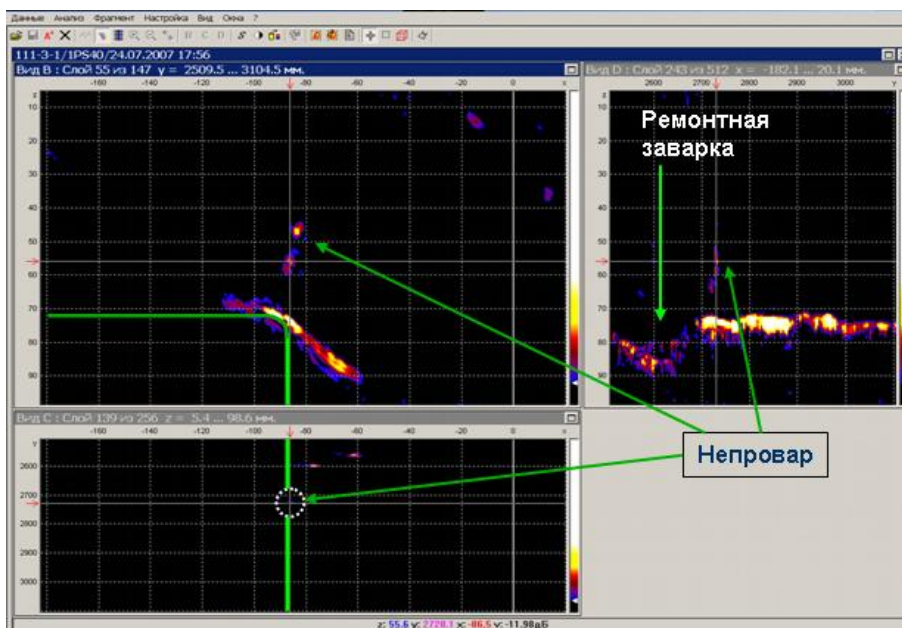
На рис. 6 приведено изображение В, С и D – типа двух трещин, растущих от галтельного перехода. По этим изображениям была определена их высота, ориентация, длина. Результаты последующего вскрытия подтвердили точность определения реальных параметров этих дефектов.

На изображении С-типа хорошо видна диагональная поперечная трещина на фоне сигналов от корня и галтели, высоту трещины легко измерить по изображению В-типа. На основании полученных данных было составлено заключение контроля, содержащее данные о размерах, местоположении и ориентации дефекта.



**Рис. 6.** Когерентные изображение трещин в области галтельного перехода. Эллипсы на изображении С-типа локализуют несплошности.

Получение трехмерных изображений, даже томографического типа, существенно облегчает распознавание типа дефекта. В качестве примера на рис. 7 приведены изображения В, С и D – типа «волосовидного непровара в области галтели. Заметим, что изображения В и D – типа на этом рисунке очень похожи на соответствующие изображения трещины №2 представленной на рис. 6. Однако изображения С – типа для рис. 6 и рис.7 кардинально отличаются: на рис. 6 видно, что дефект ориентирован под углом к сварному шву и имеет заметную длину, тогда как из рис. 8 следует, что длина дефекта – очень мала. Кроме того, рис. 7 также наблюдается отражатель, связанный с выполнением ремонтной заварки. Можно предположить, что появление дефекта связано с ремонтными работами. Он локализован в области Y (2720 – 2732), имеет длину не менее 12 мм и представляет собой «волосовидный» непровар на глубинах 45-65 мм. Вероятнее всего – дефект неопасный, но за ним необходимо следить в процессе эксплуатации.



**Рис. 7.** «Волосовидный» непровар на глубинах 45-65 мм, длина 12 мм. Эллипс на изображении С-типа локализует несплошность.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Разработана методика АУЗК кольцевого сварного соединения Ду1200 узла приварки коллекторов теплоносителей к патрубкам парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000 системами Авгур с определением реальных параметров дефектов.
2. Методика апробирована в реальных условиях на нескольких АЭС и показала свою эффективность.
3. Использование АУЗК системами с когерентной обработкой данных серии Авгур позволяет надежно выявлять дефекты, определять их локализацию и параметры, а сам процесс контроля повторять так, чтобы отслеживать развитие дефектов, с целью получения возможности управления ситуацией связанной с их присутствием. Помимо поиска дефектов, выполняемых в поисковом режиме можно по результатам измерительного режима достаточно точно измерить размеры дефектов.
4. Точность определения высоты дефектов  $\pm 2$  мм достигается как в модельных экспериментах, так, что очень важно, и при измерении параметров реальных трещин, выполненных при АУЗК на реальных объектах.
5. Применение систем серии Авгур позволило обнаруживать и измерять дефекты в области сварного соединения, а также в области галтельного перехода высотой от 5 мм и длиной от 4 мм
6. Использование систем серии Авгур дает возможность «наблюдать» за развитием выявленных дефектов в процессе их периодического контроля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукаевич Б.И., Денисов В.В., Качалин Н.А. и др.** Исследование причин повреждения сварного шва № 111 ПГВ-1000 (Оценка влияния технологии): Сб. тр. III Междунар. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». - Подольск, 2003. - Т.3. - С.52-77.
2. **Харченко С.А., Трунов Н.Б., Денисов В.В., Коротаев Н.Ф.** Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва №111 парогенераторов ПГФ-1000М. 7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам Подольск, 2006. Сб. трудов. Докл. F71
3. **Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др.** Ультразвуковая дефектometрия металлов с применением голографических методов. М., Машиностроение, 2008, 368 с.
4. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х.** Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. // Дефектоскопия, 1993, № 5, с.7 – 13.
5. Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов Ду1200 реакторов типа ВВЭР-1000 системой «Авгур 4.2» (МЭ-АЭ1-П1Б/8-ПК-02).
6. Методика автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений узлов приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам Ду1200 парогенераторов реакторных установок ВВЭР-1000 с применением системы АВГУР 5.2 (МА5-АЭ1-П1Б/8-ПК-06).
7. **Вopilкин А.Х., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С.** Оборудование и методики автоматизированного ультразвукового контроля сварных швов приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов ВВЭР-440 И ВВЭР-1000//Доклад на 7 международном семинаре по горизонтальным парогенераторам 3 - 5 октября 2006 г. Подольск.
8. **Бадалян В.Г., Базулин Е.Г.** Алгоритм совместной обработки многочастотных и многокурсных акустических голограмм для восстановления изображения дефектов. // Дефектоскопия, 1989, № 3, с. 25 – 32.
9. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Доленко С.В. и др.**//Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных. Дефектоскопия, 2004, №12, 4-15
10. **Бадалян В.Г.** Оценка результатов контроля по акустическим изображениям.// Дефектоскопия, 2007, № 4, с. 39-58.

### **Бадалян Владимир Григорьевич**

Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия, 123183, пл. Курчатова, д. 1.  
Тел.: 8-499-196-76-15. Факс: 8-499-196-71-19. E-mail: *bvg @ echoplus.ru*.

### **Самарин Павел Федорович**

Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия, 123183, пл. Курчатова, д. 1.  
Тел.: 8-499-196-91-91. Факс: 8-499-196-71-19. E-mail: *samarin @ echoplus.ru*

### **Тихонов Дмитрий Сергеевич**

Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия, 123183, пл. Курчатова, д. 1.  
Тел.: 8-499-196-91-91. Факс: 8-499-196-71-19. E-mail: *dtich @ echoplus.ru*