

Система контроля надежности траверсы на объектах атомной энергетики методом ультразвуковой дефектоскопии

В.А. Орлов, Р.В. Пирожков, Ю.П. Косогова

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблематика обеспечения контроля состояния и прочности устройства обращения с радиоактивными материалами на объектах атомной энергетики и предложена разработка системы дистанционного ультразвукового контроля для непрерывно-периодичного мониторинга состояния ответственных элементов конструкции траверсы обслуживания, работающей в радиационно-опасной среде. Приведены основные принципы обработки результатов ультразвуковой дефектоскопии и получения характеристик.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пьезоэлектрический преобразователь, дефект, прочность, мониторинг.

Ключевая задача предприятий атомного машиностроения заключается в обеспечении надежности и безопасности эксплуатации изготавливаемого оборудования. Следование высоким требованиям обеспечивается за счет конструктивных особенностей изделий, физико-химических характеристик материалов и своевременно производимого контроля состояния.

Траверса предназначена для выполнения следующих операций:

- транспортирования в вертикальном положении транспортного упаковочного комплекта (далее ТУК) для отработавшего топлива (ОЯТ);
- транспортирование чехла транспортного со свежим топливом (ЧТ);
- транспортирование чехла для пеналов герметичных (ЧПГ);
- установки/выема ТУК для ОЯТ, ЧТ и ЧПГ в/из гнездо универсального контейнерного отсека (КО) бассейна выдержки (БВ);
- установки/выема ТУК для ОЯТ и ЧТ в помещение дезактивации оборудования;

- кантования ТУК для ОЯТ на тележке шлюзовой при помощи КМЭКД из горизонтального положения в вертикальное и обратно;
- выема/установки из БВ (совместно с траверсой для стеллажей БВ) одной секции стеллажей БВ.

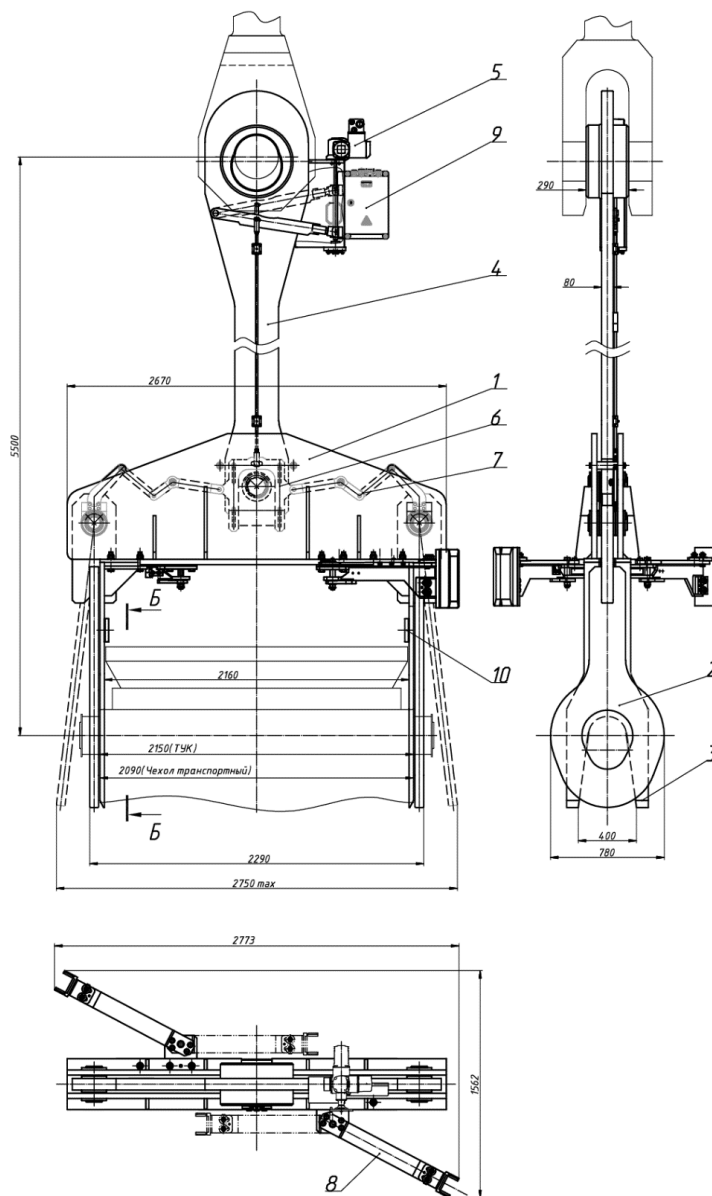


Рис. 1 – Траверса: 1 – балка, 2 – серьга, 3 – вилка, 4 – штанга, 5 – привод, 6 – ползун, 7 – рычаг, 8 – ловитель, 9 – электрооборудование, 10 – накладка.

Изделие предназначено для работы в полупогруженном состоянии, при изготовлении используются материалы сталей 12X18H10T, 08X18H10T,

14X17H2, сталь 20, Ст3, 09Г2С, бронза. Поэтому поверхности, подверженные коррозии, покрываются эмалью ЭП-5285.

Основные характеристики траверсы:

- грузоподъемность – 130 тонн;
- мощность электропривода – 0.2 кВт;
- напряжение сети – 380 В;
- частота – 50 Гц;
- режим работы – периодический;
- масса – 5 тонн.

В составе конструкции траверсы имеются наиболее подверженные износу детали, состояние которых определяет возможность дальнейшей эксплуатации. Неудобство и риски, связанные с наличием наведённой радиации, усложнят возможность разбора на составляющие элементы конструкции для проведения оценки прочности, целостности во время проведения планово-предупредительного ремонта (далее ППР). В процессе проведения диагностики существуют риски пропустить дефект по причине человеческого фактора [1].

Для уменьшения трудозатрат на проведение ППР и повышение производительности и качества контроля требуется предусматривать автоматизацию измерительно-контрольных процессов.

Ответственные детали траверсы во время проведения ППР проходят тщательной неразрушающий контроль, основную роль в котором играет ультразвуковой контроль (далее УЗК). Данная операция позволяет определить зарождение и развитие дефектов и их размерность в толще металла [2].

Система УЗК служит инструментом выявления наличия дефектов и их динамики развития в структуре металла, посредством измерения свойств

распространяющихся ультразвуковых волн в материале и исследованием принятого (регистрируемого) ультразвукового излучения. Для контроля материалов обычно используют ультразвук в диапазоне от 0,25 до 25 МГц. Верхний предел расположен в пределах 14 МГц.

Ультразвук порядка 0,25—1 МГц успешно применяется для выявления грубых дефектов, но не пригоден для выявления микроскопических дефектов, т.к. сильно рассеивается в материале и не создает узконаправленного пучка. Целесообразным является выбор частоты излучения порядка 10 МГц для исследования микроструктурных изменений [3,4].

Методика УЗК основана на том, что физика УЗ-колебаний аналогична законам оптики, т.е. для УЗ свойственны такие явления, как преломление, отражение, рассеяние, поглощение, дифракция, интерференция. Структурные особенности поликристаллической структуры материала детали создают образ отраженного и сквозного сигнала. Наибольший интерес представляют возможности оценки деформации в материалах деталей от нагрузки при помощи ультразвуковой дефектоскопии.

Под воздействием факторов в материале возникают структурные изменения, которые проявляют себя как разностороннее отклонение характеристик ультразвука: частотного спектра, коэффициентов отражения, рассеяния, затухания, скорости распространения [5,6].

Для реализации дистанционного контроля требуется интегрировать измерительное оборудование (преобразователи) в объект контроля.

Ультразвуковой преобразователь служит для преобразования электрических сигналов в ультразвуковую энергию и для преобразования ультразвуковой энергии обратно в электрические сигналы. В современной диагностической практике большим успехом пользуются отдельно-

совмещенные матричные пьезоэлектрические преобразователи (МПЭП) [1]. Ультразвуковой преобразователь (рис.2) содержит решетку (чаще всего двумерную матрицу) пьезоэлектрических элементов; первый и второй токопроводящие акустические согласующие слои, нанесенные поверх пьезоэлектрических элементов; общую заземляющую пластину нанесенную поверх второго согласующего слоя, и, электрически связанные с пьезоэлектрическими элементами, первый и второй акустические согласующие слои; третий согласующий слой, содержащий полиэтилен низкой плотности (LDPE), нанесенный поверх общей заземляющей пластины [2].

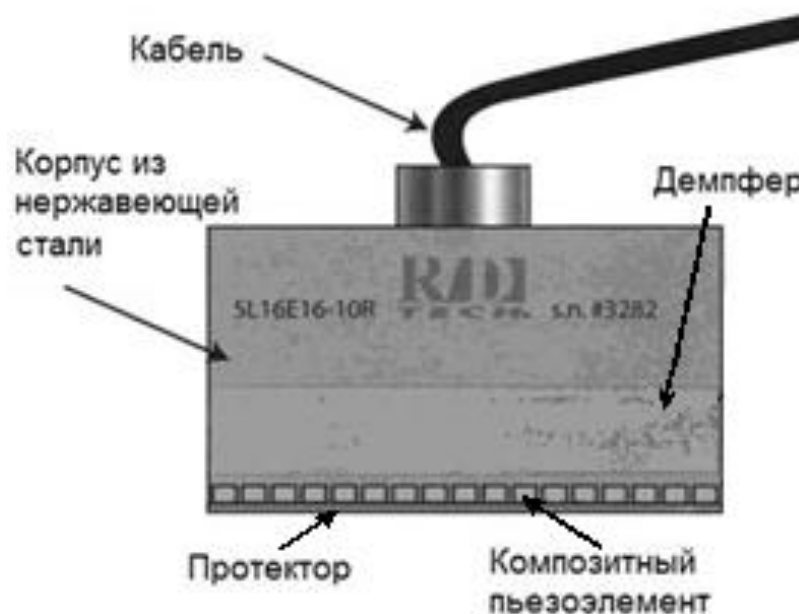


Рис. 2. – Устройство матричного пьезоэлектрического преобразователя [2]

Ультразвуковая фазированная решётка – технология ультразвукового исследования, обеспечивающая электронное динамическое фокусирование [3], то есть позволяющая изменять местоположение фокуса без перемещения самой решётки, а также создавать при необходимости несколько фокусов одновременно (рис. 3) [4].

Главная особенность технологии УЗ ФР – это управляемые компьютером амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов. Возбуждение пьезоэлементов осуществляется таким образом, чтобы было возможно управлять углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна.

Метод синтезированной фокусированной апертуры (САФТ) - эхо-метод, основан на создании сфокусированного акустического поля в заданных областях контроля путем сканирования многоэлементной антенной решётке (АР) и когерентной обработки принятых сигналов (рис.4) [3,7].

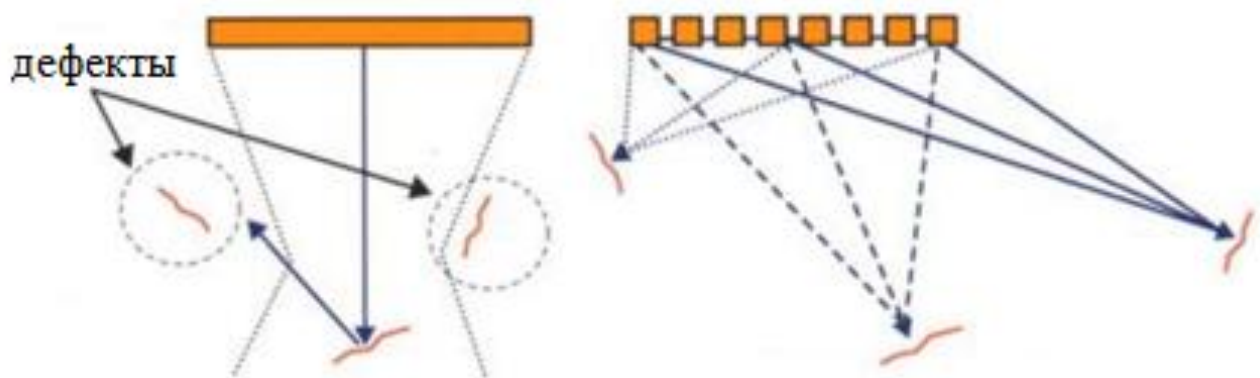


Рис. 3. - Обнаружение дефектов одноэлементным (слева) и многоэлементным (справа) преобразователем [3]

Используется АР, излучающая поочередно каждым элементом. Отраженный сигнал принимается всеми элементами. Из полученных данных формируется матрица из А-сканов [4,8].

Когерентная обработка происходит путем сложения цифровых значений амплитуд, которые находятся в полученной матрице данных:

$$A_{XY} = \sum_i \sum_j A_{ij}(\varphi),$$

где i -номер излучателя; j -номер приемника.

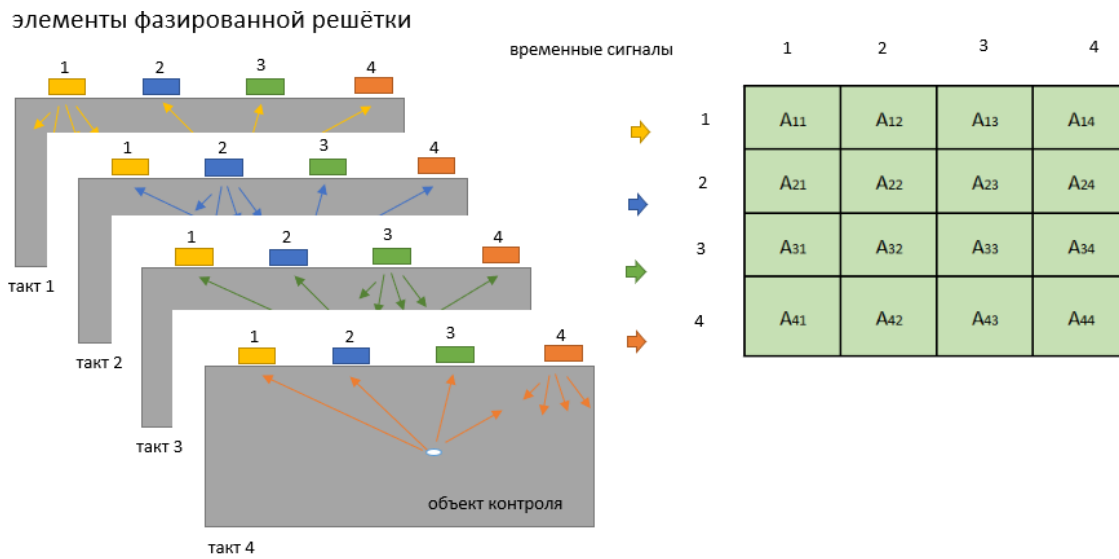


Рис. 4. – Сканирование методом САФТ и матрица данных [4]

При известном расстоянии до локальной области сканирования, сможем найти временную точку на А-скане, из которой будем производить измерения. Для каждого А-скана точка будет своя:

$$t = \frac{L}{c},$$

где L - расстояние от локальной области контроля до пьезопреобразователя, м; c – скорость распространения ультразвука в среде, м/с.

Таким образом, программным путем реализуется задержка. Чтобы узнать, в какой ячейке матрицы находится нужная нам информация:

$$\frac{t}{\Delta t} = N,$$

где t -временная точка на А-скане, с; Δt -время работы АЦП, с; N - номер ячейки.

Метод структурных шумов (далее СШ). Структурный шум в неоднородной среде формируется в результате отражения зондирующего сигнала от большого числа неоднородностей. Более информативным параметром (как и для каждого сигнала) является энергетический спектр СШ — важная характеристика случайных процессов (рис. 4).

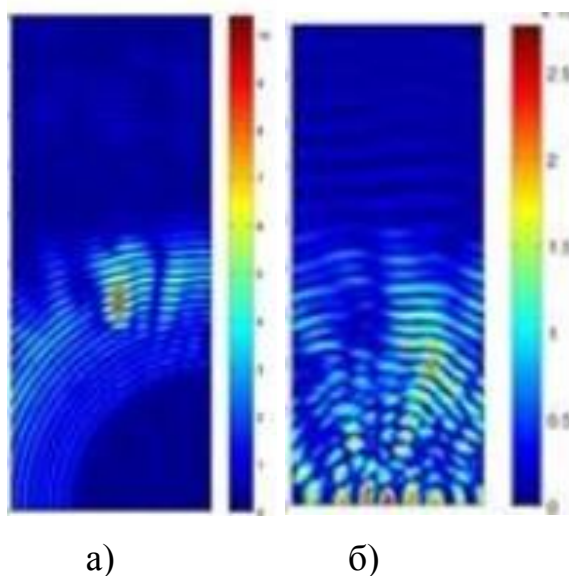


Рис. 5. – Результат эмуляции зарегистрированного дефекта в среде Matlab методами: а) фазированной решетки; б) САФТ [8]

Энергетический спектр любого сигнала определяется с помощью преобразования Фурье, однако СШ – нестационарный случайный процесс, его дисперсия убывает с течением времени. Если определять, например, энергетический спектр, применяя процедуру быстрого преобразования Фурье ко всей реализации СШ, то вклад удаленных областей СШ, где дисперсия мала, будет ничтожен, то есть информация о спектре той части СШ, что отступила из удаленной области изделия, утрачивается.

Пример изображения мгновенного энергетического спектра $W(\omega, t_0)$ в виде функции двух переменных (по оси ординат — частота, по оси абсцисс — время), где интенсивность спектра отображается цветом (синий — маленькая интенсивность, красный — максимальная) или яркостью (белому соответствует максимальная интенсивность), приведена на рисунке, где показаны результаты предлагаемой радиотехнической обработки заготовки из стали 20.

Полную картину и анализ изменений энергетического спектра СШ в одном и том же материале позволяет реализовать мониторинг изменения

структуры в сложно структурных изделиях в процессе их эксплуатации [9,10].

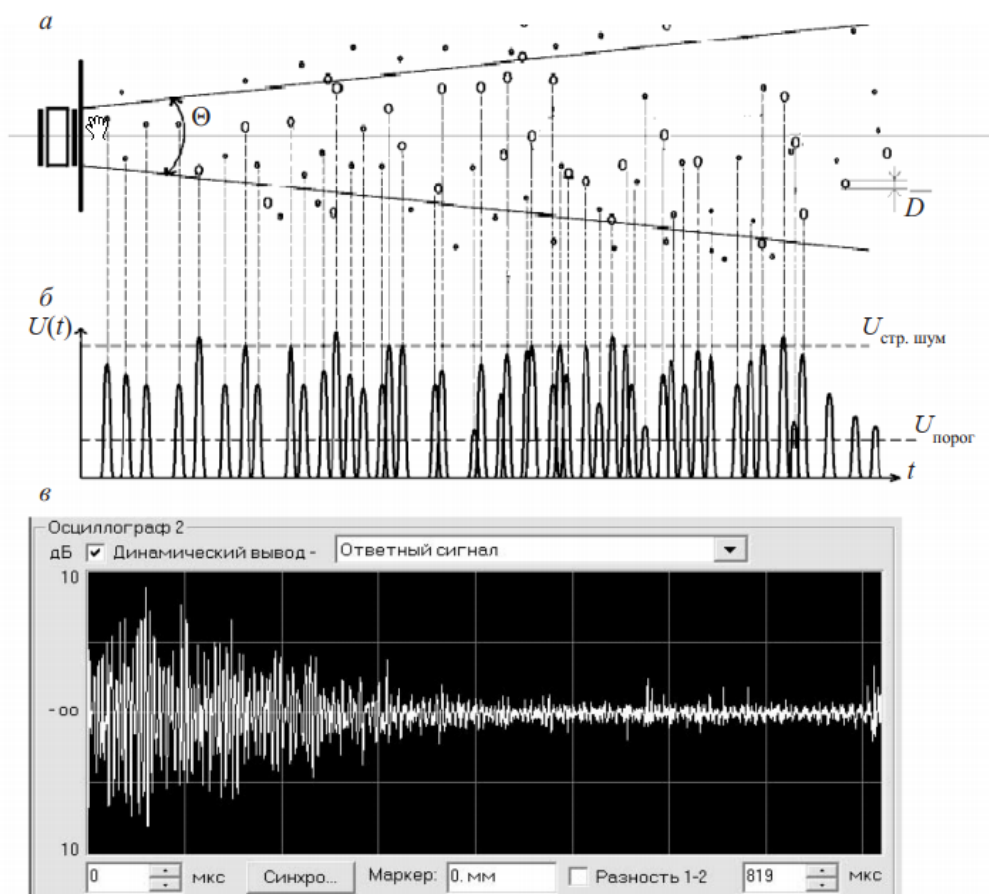


Рис. 6 – Упрощенная схема формирования СШ в изделии с высоким уровнем структурных неоднородностей (а); эхосигналы от структуры без учета затухания у.з. волн (б); сигнал СШ с учетом затухания УЗ волн (в) [9]

Каждая из приведённых методик в отдельности не является в полной мере достаточным средством выявления структурных изменений в материале под воздействием нагрузок и факторов в виду сложной геометрии исследуемых деталей. Поэтому комплексное использование методик позволяет в полной мере реализовать ресурсно-технический потенциал МПЭП датчиков, устанавливаемых на компоненты конструкции.

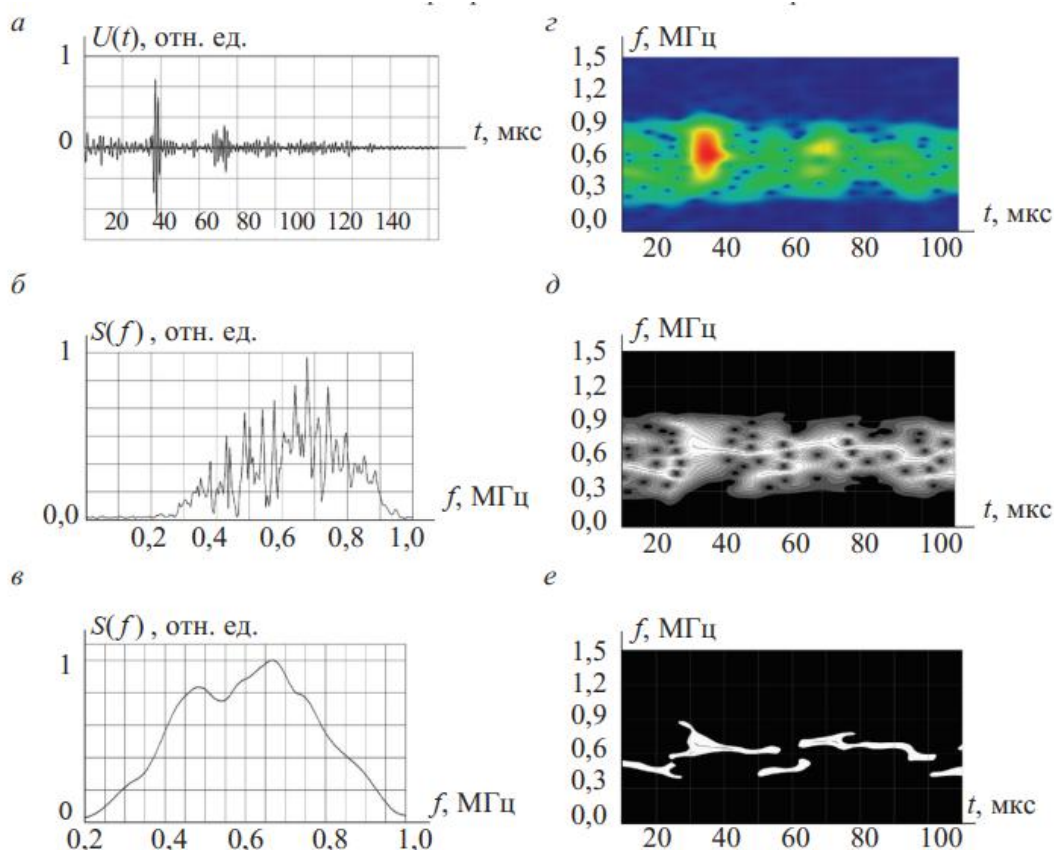


Рис. 7. – Результаты комплексной радиотехнической обработки сигнала в образце из стали 20 без компенсации донного эхосигнала: а — эхосигнал; б — амплитудный спектр Фурье эхосигнала; в — нормированный амплитудный спектр; г — мгновенный спектр эхосигнала (преобразование Габора); д — нормированный мгновенный спектр; е — взвешенный нормированный мгновенный спектр [10]

Применение усовершенствованного комплекса УЗК с МПЭП и современными вычислительными в совокупности позволяет повысить качество контроля, заключающееся в автоматизации процесса измерения и анализа сигналов независимо от того, какие технологические операции выполняет траверса обслуживания в здании реактора.

Предложенный подход выполнения контроля обеспечит дополнительный задел для научно-исследовательской и опытно-

конструкторской деятельности (совершенствование разрабатываемых конструкций, алгоритмов управления и диагностики оборудования ультразвуковым методом), а также уменьшит трудоемкость, улучшит автоматизацию промышленных процессов.

Литература:

1. Берела А.И., Былкин Б.К., Томилин С.А., Федотов А.Г. Адаптация технологии демонтажа оборудования выводимых из эксплуатации блоков АЭС к требованиям радиационной безопасности ультразвукового контроля технологических трубопроводов атомного реактора // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/915/.
2. Литвинова Т.А, Могилевский Д.В., Мецлер А.А., Егоров С.Н., Подрезов Н.Н. Технология ультразвукового контроля технологических трубопроводов атомного реактора // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2240/.
3. Синицын А.А., Соколов И.В. Разработка высокочувствительных УЗ низкочастотных широкополосных мозаичных пьезопреобразователей для контроля крупногабаритных изделий с высоким затуханием ультразвука // 19 Международная НТ конференция студентов и аспирантов: Тез.док. Т.2. М: МЭИ, 2012. С. 126
4. Слюсар В.И. Ультразвуковая техника на пороге третьего тысячелетия // Электроника: наука, технология, бизнес. 1999. №5. С. 50-53.
5. Gavrilov, L.R. and Hand, J.W. High-Power Ultrasound Phased Arrays for Medical Applications..: Nova Science Publishers. 2014. 124 p.
6. Jorne, F., Henriques F.M. and Baltazar L.G. Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography. Constr. Build. Mater. 2014. pp: 494-506.



7. Андронникова Ю.А. Реализация алгоритма SAFT на жесткой логике для ультразвукового исследования // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г.: 2 т. Томск: ТПУ, 2015. С. 227-232.

8. Родыгин А.Г., Пирожков Р.В., Цвелик Е.А. Модернизация ультразвукового контроля циркониевых каналов реактора РБМК // Глобальная ядерная безопасность. 2020. №3. С. 54-62.

9. Schickert, M., Krause M. and Müller W. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, pp: 235-246.

10. Abbate, A, Nguyen N., LaBreck S. and Nelligan T. Ultrasonic signal processing algorithms for the characterization of thin multilayers. Electrical & Computer Eng. Dept., Boston University, Boston, MA USAceedings Date, 10. 2002. URL: ndt.net/article/ecndt02/176/176.htm.

References

1. Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №3. URL: [ivdon.ru/magazine /archive/n3y2012/915/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/915/).
2. Litvinova T.A, Mogilevskiy D.V., Metsler A.A., Yegorov S.N., Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2240/.
3. Sinitsyn A.A., Sokolov I.V. 19 Mezhdunarodnaya NT konferentsiya studentov i aspirantov: Tez.dok. T.2. M: MEI, 2012. P. 126
4. Slyusar V.I. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. 1999. №5. pp. 50-53.
5. Gavrilov, L.R. and Hand, J.W. High-Power Ultrasound Phased Arrays for Medical Applications. N.Y.: Nova Science Publishers. 2014. 124 p.
6. Jorne, F., Henriques F.M. and Baltazar L.G. Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography. Constr. Build. Mater. 2014. pp: 494-506.
7. Andronnikova YU.A. Nerazrushayushchiy kontrol': elektronnoye priborostroyeniye, tekhnologii, bezopasnost': sbornik trudov V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchënykh, Tomsk, 25-29 maya 2015 g.: 2 t. Tomsk: TPU, 2015. pp. 227-232.
8. Rodygin A.G., Pirozhkov R.V., Tselik E.A. Global'naya yadernaya bezopasnost'. 2020. №3. pp. 54-62.
9. Schickert, M., Krause M. and Müller W., 2003. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 235-246.
10. Abbate, A, Nguyen N., LaBreck S. and Nelligan T. Ultrasonic signal processing algorithms for the characterization of thin multilayers. Electrical &



Computer Eng. Dept., Boston University, Boston, MA USAcedings Date, 10.
2002. URL: ndt.net/article/ecndt02/176/176.htm.