

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 620.179.1

**МОДЕРНИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ
ЦИРКОНИЕВЫХ КАНАЛОВ РЕАКТОРА РБМК**

© 2020 А.Г. Родыгин*, Р.В. Пирожков**, Е.А. Цвелик**

* Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Волгодонск, Ростовская обл., Россия
 ** Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В работе рассмотрена модернизация ультразвукового автомата контроля СК-26, применяемого для контроля сварных соединений циркониевых каналов в атомной энергетике. Предложенные изменения в конструкцию автомата и в систему позиционирования автомата на плато приведут к существенному сокращению времени процедуры контроля и повышению безопасности оператора во время проведения операции.

Ключевые слова: дефектоскоп, ультразвуковой контроль, дефект, технологический канал, безопасность.

Поступила в редакцию 03.07.2020
 После доработки 17.07.2020
 Принята к публикации 21.07.2020

Технология ультразвукового контроля построена на простом физическом законе: траектория движения звуковых волн в однородной среде на частотах более 20 кГц остаётся неизменной. Если дефектов нет, они проходят беспрепятственно, без значительного отражения. Если же в материале есть какие-либо неоднородности (пустоты, трещины, инородные включения), то сигналы отражаются от них и регистрируются приёмником. Ультразвуковой метод контроля предполагает использование продольных и поперечных волн. Скорость распространения у первых примерно в 2 раза выше, чем у вторых [1].

Контроль циркониевой части технологических каналов (ТК) обеспечивает выявление несплошностей, расположенных на наружной и внутренней поверхностях канала, эквивалентных по своей отражающей способности искусственному отражателю типа «риска» глубиной 0,5 мм [2, 3]. Плоскости сечений прозвучивания относительно оси каналов составляют 0, 45, 90 и 135 градусов. В каждом сечении контроль проводится прямым и однократно отраженным лучами в двух взаимно противоположных направлениях (рис. 1). Контроль осуществляется в автоматическом режиме при перемещении преобразователя снизу-вверх и одновременном его вращении вокруг своей оси.

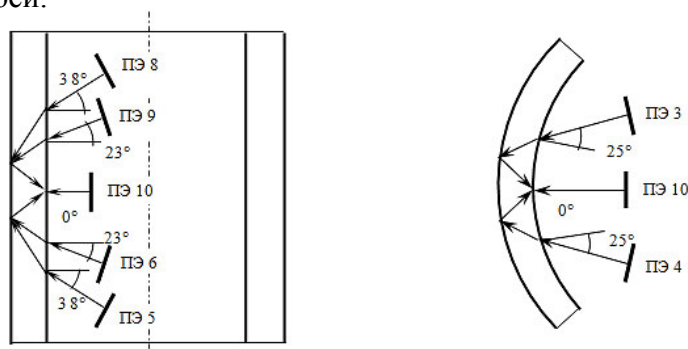


Рисунок 1 – Схема проведения контроля [Control scheme]

Перемещение преобразователя вдоль и вращение его вокруг своей оси в процессе настройки аппаратуры осуществляется в ручном режиме управления. Настройка задержки и длительности развертки каждого такта цикла работы дефектоскопа проводится так, чтобы наибольшая часть развертки на экране дефектоскопа соответствовала пути ультразвукового импульса в контролируемом металле.

Контроль каналов начинается с нижней отметки и заканчивается на верхней. Признаком обнаружения несплошностей в контролируемом канале ТК является наличие в зоне действия строб – импульса любого такта цикла поиска эхо-сигнала, амплитуда которого равна или превышает величину поискового уровня чувствительности [4, 5]. Результаты контроля фиксируются в протоколе контроля с указанием местоположения и условных размеров обнаруженных несплошностей. Несплошность считается недопустимой, если:

- амплитуда эхо-сигнала, полученного от несплошности, равна или превышает амплитуду эхо-сигнала от риски глубиной 1,0 мм;
- амплитуда эхо-сигнала, полученного от несплошности, равна или превышает амплитуду эхо-сигнала от риски глубиной 0,5 мм и при этом протяженность ее составляет 8 мм и более.

Система контроля ТК состоит из основных частей, показанных на рисунке 2. Конструкция автомата с укороченным кронштейном представлена на рисунке 3. [6, 7]

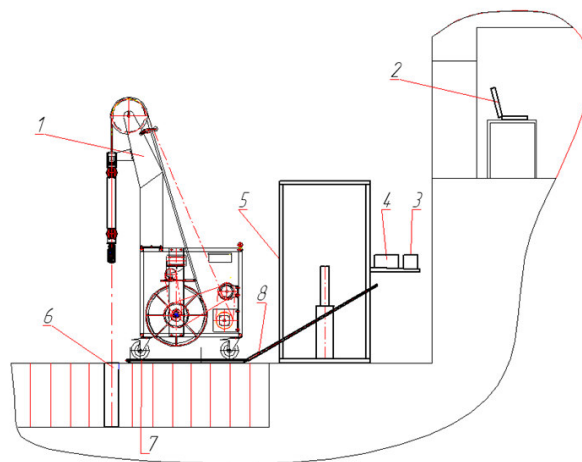


Рисунок 2 – Система контроля каналов РБМК: 1 – автомат контроля каналов РБМК; 2 – аппаратуры сбора и обработки данных УЗК; 3 – блок управления; 4 –дефектоскоп; 5 – стенд; 6 – стенд настроечный; 7 – мойки; 8 – поддон [RBMK channel monitoring system: 1 – RBMK channel monitoring machine; 2 – equipment for collecting and processing ultrasonic data; 3 – control unit; 4 – flaw detector; 5 – stand; 6 – tuning stand; 7 – sinks; 8 – pallet]

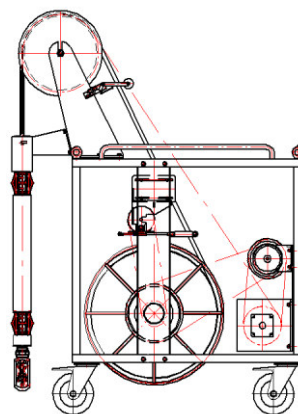


Рисунок 3 – Конструкция автомата с укороченным кронштейном [The design of the machine with a shortened bracket]

Основные параметры и размеры:

- метод контроля – ультразвуковой, эхо – импульсный, тандем;
- марка материала – сплав Э – 125;
- температура воды в канале – не более 70 °С;
- внутренний диаметр контролируемого канала – от 75 до 85 мм;
- толщина стенки контролируемого канала – от 2,5 до 8 мм;
- количество преобразователей – 1 шт;
- скорость вертикального перемещения модуля контрольного – от 0,5 до 70,0 мм/с;
- частота вращения преобразователя – от 0,01 до 2 об/с;
- частоты преобразования – от 5,0 ± 20 % до 10,0 ± 20 % МГц;
- запас условной чувствительности системы относительно риски глубиной 0.5 мм не менее 12 ДБ.

Погрешность отсчёта:

- вертикального перемещения не более 6 мм;
- углового перемещения не более 2 градус;
- время контроля одного канала не более 1 ч.

Электрическое питание системы:

- напряжение 220 ± 10% В;
- частота 50 ± 1 Гц;
- общая потребляемая мощность не более 2 кВА.

Размеры габаритные автомата контроля:

- длина без кабелей не более 1140 мм;
- ширина не более 650 мм;
- высота не более 1550 мм;
- масса автомата контроля не более 70 кг;
- драгоценные материалы – отсутствуют.

В результате проведенных исследований системы контроля каналов РБМК-1000, выполненных расчетов предлагается следующая модернизация узлов системы:

– уменьшение массы аппарата контроля за счет укорочения кронштейна с блоком (см. рис. 3) со 150 кг до 80 кг.

– изменение системы позиционирования аппарата на плато. Изначально на плато размещали подкладной лист, на который ставили аппарат, используя кран. В проработанной конструкции применяется ручное перемещение аппарата по рельсовым направляющим, расположенным вдоль каналов.

– замена двигателя с трёхфазного на шаговый, что повышает точность позиционирования модуля относительно канала реактора. Проведем проверочный расчет двигателя – принимаем шаговый электродвигатель марки ДШР-1.8-1200; характеристики электродвигателя [8]: а) статический момент $M_{t1} - 0.018 \text{ Н}\times\text{м}$; б) min скорость вертикального перемещения модуля 0,03 м/мин; с) число оборотов 480 об/мин; д) масса поднимаемого контура без учета массы троса 12 кг; е) масса поднимаемого контура с поправкой на массу троса 16 кг. Требуемый механический момент, формулы (1) и (2):

$$M_t \times \omega = \frac{F \times v}{\eta}, \quad (1)$$

$$M_t = \frac{F \times v}{\eta \times \omega}, \quad (2)$$

где M_t – требуемый механический момент, Н×м;

F – масса поднимаемого контура с поправкой на массу троса, Н;

v – min скорость вертикального перемещения модуля, м/мин;

ω – число оборотов, об/мин;

η – КПД ($\eta=0,8$).

Тогда $M_t = \frac{160 \times 0,03}{480 \times 0,8} = 0,013 \text{ Н} \times \text{м}$. Таким образом, $M_{t1} > M_t$. Вывод – работоспособность обеспечивается с небольшим запасом;

– применение более тонкого и гибкого кабеля, что снижает вес и исключает обрывы жил кабеля при работе;

– предлагается ультразвуковой контроль проводить преобразователем СК-26 с 10-ю каналами обработки данных вместо 15-и (рис. 4). В измененной конструкции десяти резонаторов вполне достаточно для достоверного контроля;

– в настоящее время в центраторе применяются стальные ролики без подшипников, в проработанной конструкции применяется бронзовая втулка между роликом и валом, что снижает вероятность заклинивания центратора при работе.

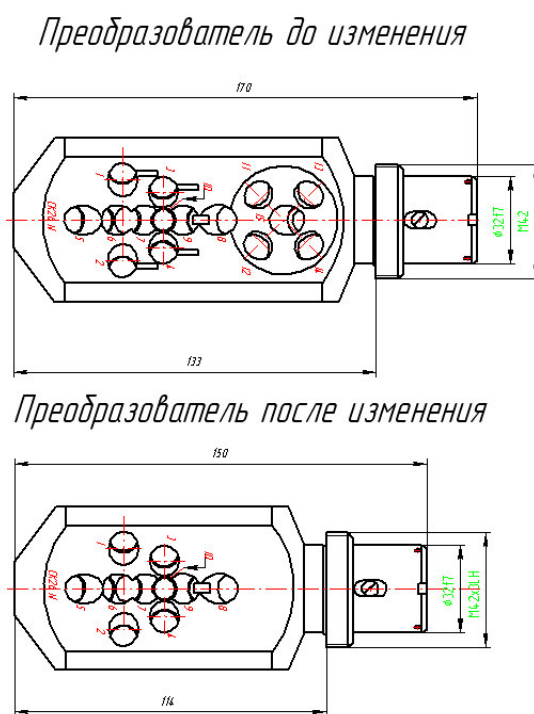


Рисунок 4 – Изменения в преобразователе [Changes in the converter]

В результате проведения модернизации оборудования для ультразвукового контроля циркониевой части технологических каналов уменьшилась металлоемкость оборудования контроля, значительно сокращены время контроля и, соответственно, пребывания человека в радиационно опасной зоне контроля, что повышает безопасность проведения операций неразрушающего контроля.

Правильно подобранный пьезопреобразователь поднимает качество контроля, а также расшифровки полученных сигналов. Поэтому проведем расчет по подбору характеристик требуемого пьезопреобразователя [9, 10].

Расчет углов падения излучающего и приемного резонаторов.

Для определения расслоения в первом зубце наиболее эффективно применение эхо-зеркального метода [11, 12].

Основная часть энергии падающей волны отражается от плоской поверхности слоя. Отраженную волну можно уловить приемным резонатором, для этого следует рассчитать углы наклона резонаторов так, чтобы угол падения отраженной волны на приемный резонатор составил 90° , это обеспечит максимальную амплитуду пришедшего сигнала (рис. 5).

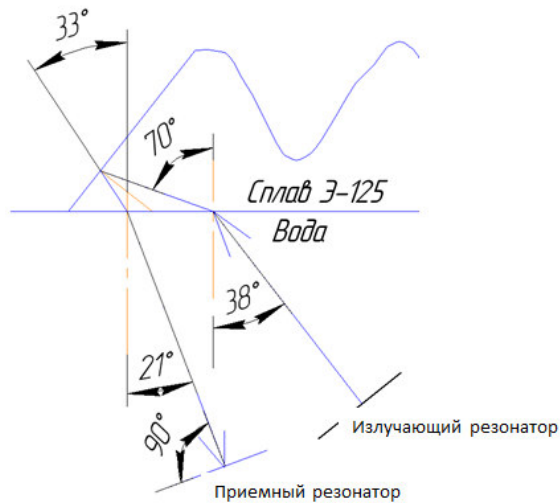


Рисунок 5 – Схема углов наклона излучающего и приемного резонаторов [Diagram of the tilt angles of the emitting and receiving resonators]

Исходные данные для расчета:

- угол ввода излучающего резонатора – 70° ;
- скорость продольной волны в дистиллированной воде – 1500 м/с;
- скорость поперечной волны в сплаве Э-125 – 2250 м/с.

По закону Снеллиуса рассчитаем угол наклона излучающего резонатора:

$$\frac{\sin(70^\circ)}{2250} = \frac{\sin(\beta_1)}{1500} \Rightarrow \beta_1 = 38^\circ.$$

Геометрически находим угол отражения 33° от расслоившегося металла, далее применяем закон Снеллиуса:

$$\frac{\sin(33^\circ)}{2250} = \frac{\sin(\beta_2)}{1500} \Rightarrow \beta_2 = 21^\circ.$$

Таким образом, для наиболее эффективного выявления расслоения по первому зубцу следует использовать следующие характеристики излучающего и приемного резонаторов:

- излучающий резонатор – угол наклона резонатора $\beta_1 = 38^\circ$, угол ввода $\alpha = 70^\circ$, частота $f = 5$ МГц.
- приемный резонатор – угол наклона резонатора $\beta_1 = 21^\circ$, угол ввода $\alpha = 33^\circ$, частота $f = 5$ МГц.

Расчет угла распространения волнового фронта (рис. 6).

Исходные данные:

- $a = 5$ мм;
- $ct = 2250$ м/с;
- $f = 5$ МГц;
- волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$;
- длина волны $\lambda = \frac{c}{f}$.

Применяем формулу (3):

$$x_{0,8} = a \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \sin \varphi, \quad (3)$$

тогда $\lambda = \frac{2,25}{5} = 0,45$ мм

$$1,07 = 5 \times \frac{2 \times 3,14}{0,45} \times \sin \varphi \Rightarrow \varphi = 0,88^\circ \Rightarrow 2\varphi = 1,75^\circ.$$

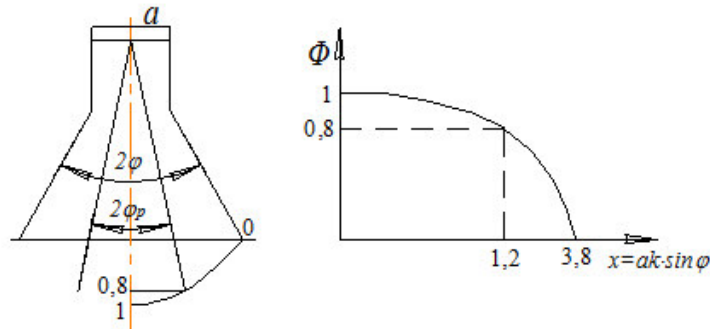


Рисунок 6 – Функция направленности [Directional function]

Расчет мертвой зоны.

Исходные данные:

- $a = 5$ мм;
- $ct = 2250$ м/с;
- время зондирующего импульса $\tau_z = 1 \div 5$ мкс;
- время реверберационных шумов $\tau_p = 1 \div 5$ мкс.

Применяем формулу (4):

$$M = \frac{\tau_z + \tau_p}{2} \times C \times \cos \alpha. \quad (4)$$

Угол ввода $\alpha = 70^\circ$, $f = 5$ МГц, тогда поперечная волна:

$$M = \frac{3 + 3}{2} \times 2,25 \times \cos 70^\circ = 2,3 \text{ мм.}$$

Угол ввода $\alpha = 33^\circ$, $f = 5$ МГц, тогда поперечная волна:

$$M = \frac{3 + 3}{2} \times 2,25 \times \cos 33^\circ = 5,7 \text{ мм.}$$

Расчет ближней зоны (рис. 7).

Исходные данные:

- $a = 5$ мм;
- $ct = 2250$ м/с.

Ближняя зона резонанса с углом ввода 70° , формула (5):

$$r_{бл1} = \frac{a^2}{\lambda} \times \frac{\cos(\beta_1)}{\cos(\alpha_1)}. \quad (5)$$

Ближняя зона резонанса с углом ввода 33° , формула (6):

$$r_{бл2} = \frac{a^2}{\lambda} \times \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\alpha_2)}. \quad (6)$$

Тогда

$$\lambda = \frac{2250 \times 10^3}{5 \times 10^6} = 0,45 \text{ мм.}$$

$$\Gamma_{6л1} = \frac{25}{0,45} \times \frac{\cos(70)}{\cos(38)} = 24 \text{ мм.}$$

$$\Gamma_{6л2} = \frac{25}{0,45} \times \frac{\cos(33)}{\cos(21)} = 49 \text{ мм.}$$

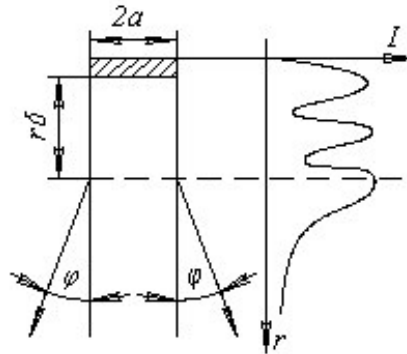


Рисунок 7 – Ближняя зона [Near zone]

Используя характеристики резонаторов, построим зависимости рекомендованных частоты и угла ввода луча от толщины стенки канала реактора (рис. 10, 11).

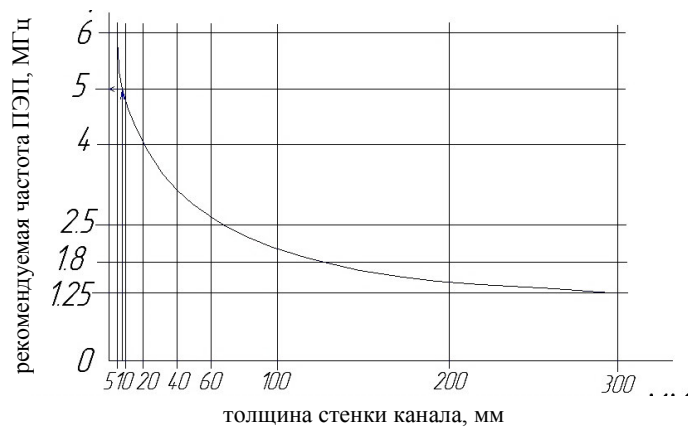


Рисунок 10 – График зависимости рекомендуемой частоты ПЭП от толщины стенки канала [Graph of recommended frequency dependence of the probe on the channel wall thickness]

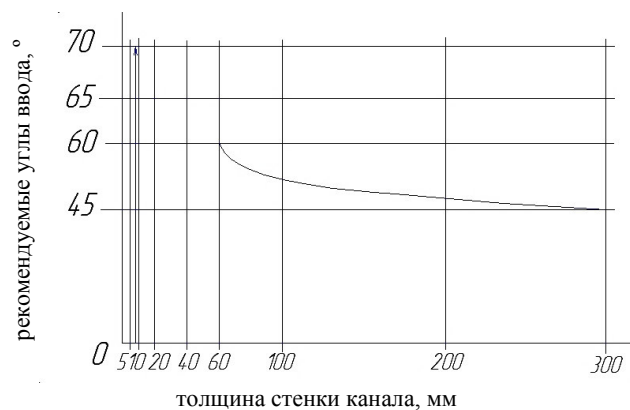


Рисунок 11 – График зависимости рекомендуемого угла ввода от толщины стенки канала [The graph of recommended entry angle dependence on the channel wall thickness]

Для толщины стенки, раной 8 мм, принимаем частоту 5 МГц.

Для толщины стенки 8 мм принимаем угол ввода равный 70°.

В результате, предложенные изменения в конструкции автомата контроля каналов РБМК позволят уменьшить вес оборудования. Кроме того, модернизация сканирующего устройства для автоматизированного ультразвукового контроля циркониевой части канала, а также верхнего и нижнего переходников канала реактора типа РБМК позволит более точно и своевременно выявлять дефекты узлов изделий атомного энергетического машиностроения, а также значительно сократить время пребывания человека в зоне контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Форум по неразрушающему контролю. – URL : <https://defektoskopist.ru/> (дата обращения: 20.06.2020).
2. *Алешин, Н. П.* Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1989. – 456 с.
3. *Алешин, Н. П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н. П. Алешин. – Москва : Машиностроение, 2006. – 368 с.
4. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки. ПНАЭ Г-7-030-91. – Москва : ЦНИИАтоминформ, 1992. – 105 с.
5. *Гетман, А. Ф.* Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А. Ф. Гетман, Ю. Н. Козин. – Москва : Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.
6. *Анурьев, В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. / В. И. Анурьев ; под редакцией И. Н. Жестковой. – Москва : Машиностроение, 2000. – 480 с.
7. ГОСТ 15150-69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 20.06.2020).
8. *Акулов, А. И.* Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – Москва : Машиностроение, 1977. – 432 с.
9. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 20.06.2020).
10. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / под редакцией И. Н. Ермолова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 280 с.
11. Контроль качества сварки / под редакцией В. Н. Волченко. – Москва : Машиностроение, 1975. – 350 с.
12. *Кретов, Е. Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – Санкт-Петербург : Издательство «СВЕН», 2007. – 296 с.

REFERENCES

- [1] Forum po nerazrushayushchemu kontrolyu [Forum on Non-Destructive Testing]. URL: <https://defektoskopist.ru/> (accessed: 06.20.2020) (in Russian).
- [2] Aleshin N.P. [et al.] Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of Acoustic Testing of Metals]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 1989. 456 p. (in Russian).
- [3] Aleshin N.P. Fizicheskiye metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soyedineniy [Physical Methods of Non-Destructive Testing of Welded Joints]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 2006. 368 p. (in Russian).
- [4] Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soyedineniy i naplavki oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ul'trazvukovoy kontrol'. Chast' II. Kontrol' svarnykh soyedineniy i naplavki. PNAE G-7-030-91 [Unified Control Methods for Basic Materials (Semi-Finished Products), Welded Joints and Surfacing of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Ultrasonic Inspection. Part II. Testing of Welded Joints and Surfacing. PNAE G-7-030-91]. Moskva: TSNIIatominform [Moscow: TsNIIatominform]. 1992. 105 p. (in Russian).
- [5] Getman A.F., Kozin Yu.N. Nerazrushayushchiy kontrol' i bezopasnost' ekspluatatsii sosudov i truboprovodov davleniya [Non-Destructive Testing and Safe Operation of Pressure Vessels and

- Pipelines]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1997. 288 p. (in Russian).
- [6] Anuryev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya. V 3-h t. [Reference Designer-Mechanical Engineer. In 3v.]. Pod redaktsiyey I.N. Zhestkovoy [Ed.by I.N. Zhestkovoy]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 2000. 480 p. (in Russian).
- [7] GOST 15150-69. Mezghosudarstvennyy standart. Mashiny, pribory i drugiye tekhnicheskiye izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy [GOST 15150-69. Interstate Standard. Machines, Devices and Other Technical Products. Versions for Different Climatic Regions. Categories, Operating Conditions, Storage and Transportation Regarding the Impact of Climatic Environmental Factors]. URL: <http://www.consultant.ru> (reference date: 06.20.2020) (in Russian).
- [8] Akulov A.I., Belchuk G.A., Demyantsevich V.P. Tekhnologiya i oborudovaniye svarki plavleniyem [Technology and Equipment for Fusion Welding]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 1977. 432 p. (in Russian).
- [9] GOST 14782-86. Kontrol' nerazrushayushchiy. Soyedineniya svarnyye. Metody ul'trazvukovyye [GOST 14782-86. Non-destructive Testing. Welded Joints. Ultrasonic Methods]. URL: <http://www.consultant.ru> (reference date: 06.20.2020) (in Russian).
- [10] Ul'trazvukovyye p'yezopreobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya [Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Non-Destructive Testing]. Pod redaktsiyey I.N. Ermolova [Ed.by I.N. Ermolova]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 1986. 280 p. (in Russian).
- [11] Kontrol' kachestva svarki [Quality Control of Welding]. Pod redaktsiyey V.N. Volchenko [Ed. V.N. Volchenko]. Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering]. 1975. 350 p. (in Russian).
- [12] Kretov E.F. Ul'trazvukovaya defektoskopiya v energomashinostroyenii [Ultrasonic Flaw Detection in Power Engineering]. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo «SVEN» [St. Petersburg: Publishing house «SVEN»]. 2007. 296 p. (in Russian).

Modernization of Ultrasonic Inspection of RBMK-1000 Reactor Zirconium Channels

A.G. Rodygin^{*1}, R.V. Pirozhkov^{**2}, E.A. Tselik^{**3}

* «Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC in Volgodonsk, Zhukovskoe highway, 10, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

** Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹ORCID iD: 0000-0001-6344-4328
WoS Researcher ID: AAT-9674-2020
e-mail: andrii.rodygin@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-1547-6568
WoS Researcher ID: AAD-3193-2020
e-mail: roman-3.14@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0001-9048-275X
WoS Researcher ID: G-3560-2018
e-mail: stvelik@mail.ru

Abstract – The paper considers the modernization of the SK-26 ultrasonic control machine used for monitoring welded joints of zirconium channels in the nuclear power industry. Proposed changes in the design of the machine and positioning system of the machine on the plateau will lead to a significant reduction in treatment time control and greater operator safety during operation.

Keywords: flaw detector, ultrasonic inspection, defect, process channel, safety.