

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25:621.039.5

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
НАГРУЖЕННОСТИ УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРА  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К ПАТРУБКУ Ду1200  
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000**

© 2015 А.К. Адаменков\*, И.Н. Веселова\*\*, И.В. Малахов\*

\* Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция»,  
Волгодонск, Ростовская обл., Россия

\*\* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского  
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В статье рассмотрена возможность выполнения одного из мероприятий, направленных на снижение вероятности повреждения зоны сварного соединения коллектора парогенератора ВВЭР-1000, а именно, мониторинг термомеханической нагруженности сварного шва №111 при эксплуатации парогенератора.

Выполненный анализ механизма разрушения сварного соединения позволил определить, что повреждение металла в зоне приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 происходит в направлении горячей нитки ГЦТ со стороны короткой образующей патрубка, вблизи зоны с максимальными механическими напряжениями.

С целью осуществления контроля механической нагруженности зоны сварного соединения №111 коллекторов парогенератора ПГВ-1000 на Ростовской АЭС выполнили операции диагностирования указанной зоны сканером (индикатором) механических напряжений Stressvision. Принцип действия устройства основан на явлении магнитной анизотропии изделий из ферромагнитных материалов, т.е. изменении магнитного состояния под влиянием механических напряжений.

Анализ распределения градиента и концентраторов механических напряжений позволяет сделать вывод о том, что зона сварного соединения в области короткой образующей коллектора в 2-3 раза более напряжена, чем зона сварного соединения в области длинной образующей, что согласуется с данными, приведенными другими исследователями как о зоне, наиболее подверженной возможному появлению дефектов.

Таким образом, периодическое диагностирование индикатором Stressvision зоны сварного шва № 111 ПГВ1000 позволит выявить и оценить возможные изменения градиента и концентраторов механических напряжений и обеспечить контроль термомеханической нагруженности узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000.

*Ключевые слова:* сварное соединение №111, коллекторы парогенератора, магнитная анизотропия, градиенты и концентраторы механического напряжения, термомеханическое воздействие, stressvision индикатор.

Поступила в редакцию 25.11.2015 г.

Повреждения зоны сварного соединения №111 коллекторов парогенератора ПГВ-1000 фиксируются с ноября 1998 года. В настоящее время выполнено 11 ремонтов поврежденных зон, все парогенераторы находятся в эксплуатации.

Выполненный анализ механизма разрушения сварного соединения [1] позволил определить, что повреждение металла в зоне приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 происходит по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания (ЗДКР).

Установлено, что:

- 1) Для реализации механизма ЗДКР необходимо сочетание нескольких факторов:
  - высокий уровень механических напряжений;
  - наличие скорости деформирования на уровне  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  1/с, что реализуется в некоторых проектных режимах эксплуатации энергоблоков;
  - воздействие коррозионного фактора  $RH < 9$ ;
  - температурный диапазон  $\sim 160 \div 290^{\circ}C$ .

2) Зона первоначальных повреждений расположена во всех случаях в направлении горячей нитки ГЦТ со стороны короткой образующей патрубка, вблизи зоны с максимальными механическими напряжениями (рис.1).

В настоящее время разработан комплекс мероприятий, направленный на снижение вероятности повреждения зоны сварного соединения №111, среди которых, относящихся в первую очередь, к жесткому соблюдению регламентных ограничений (скорость разогрева/охлаждения, поддержание ВХР, и т.п.), необходимо выделить одно – это постоянный контроль термомеханической нагруженности узла при эксплуатации и анализ фактического состояния.

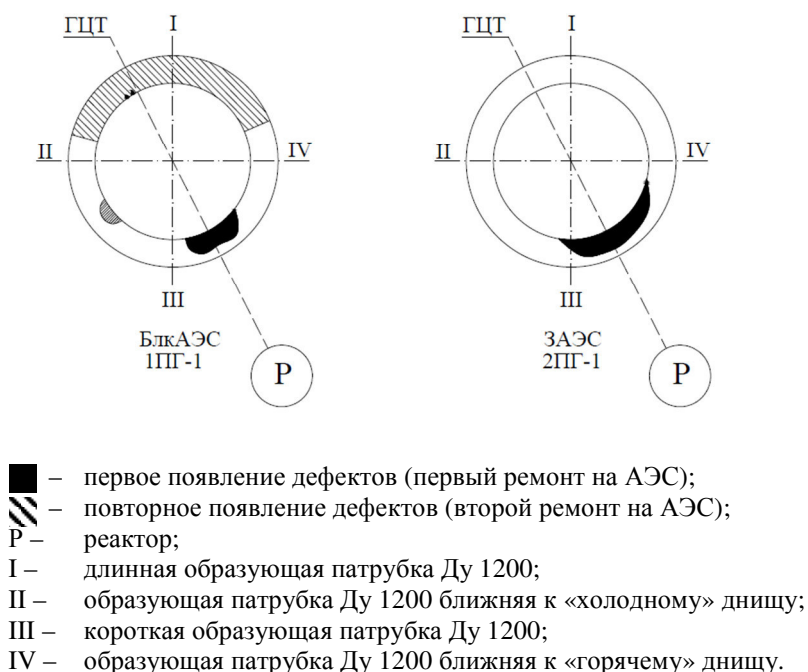


Рис. 1. – Зоны появления дефектов

С целью осуществления контроля механической нагруженности зоны сварного соединения №111 коллекторов парогенератора ПГВ-1000 на Ростовской АЭС, аналогично опыту исследования неразрушающего контроля металла первого контура охлаждения реактора ВВР-К [2], выполнили операции диагностирования указанной зоны сканером (индикатором) механических напряжений Stressvision. Принцип действия устройства основан на явлении магнитной анизотропии изделий из ферромагнитных материалов, т.е. изменении магнитного состояния под влиянием механических напряжений. Под воздействием внешних факторов, или физико-механических характеристик материала фиксируется местное изменение поля механических напряжений (концентрация напряжений), поэтому в местах возникновения концентраторов напряжений наблюдается изменение магнитных свойств металла [3].

В настоящее время выполнено сканирование зоны сварного соединения №111

парогенераторов одного из действующих энергоблоков в период проведения планово-предупредительного ремонта. Сканирование выполнялось по сетке (30x30) с числом рядов 6 и количеством строк 25. Сканирование проводилось от патрубка продувки карманов коллектора парогенератора против часовой стрелки для холодного, и по часовой стрелки для горячего коллектора (рис. 2).

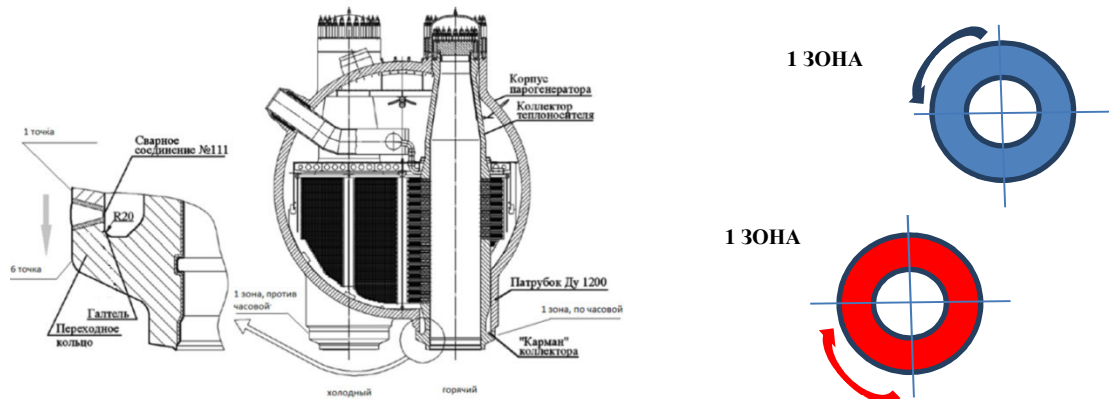
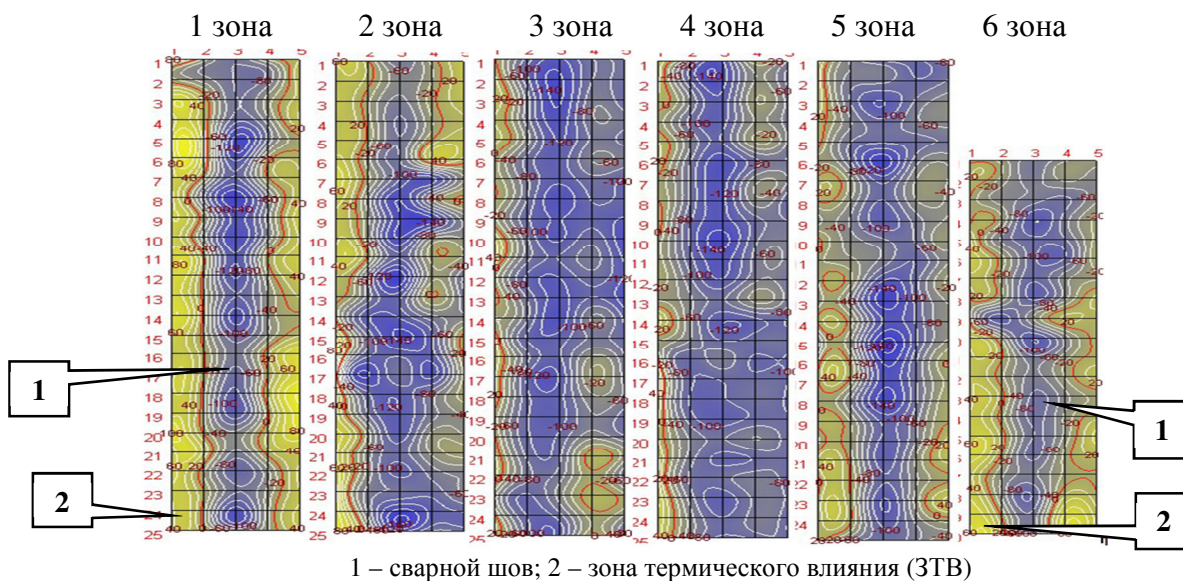


Рис. 2. – Схема сканирования коллектора парогенератора

Таким образом, формировалось 6 зон (карт) контроля. Неравномерность (протяженность) карт контроля объясняется доступностью для сканирования в реальных условиях энергоблока.

В результате сканирования и последующей обработки данных были получены графические карты и обобщенные статистические характеристики как для каждой из зон, так и для каждого из обследованных коллекторов. Выполненное диагностирование позволяет провести качественную и количественную оценку коэффициента концентрации механических напряжений (КМН), оценку уровней разности главных механических напряжений (РГМН) по «направлению».

Графически полученные данные представлены в виде 2-D карт РГМН (рис. 3), на которых зоны растяжения показаны темным цветом, а зоны сжатия – светлым. Карты позволяют выделить зону сварного шва (1), зону термического влияния (ЗТВ) (2).



1 – сварной шов; 2 – зона термического влияния (ЗТВ)

Рис. 3. – Карты РГМН зоны сварного соединения №111 холодного коллектора парогенератора ПГВ-1000

Статистическая обработка карт позволяет количественно оценить распределение РГМН в каждой из зон (табл. 1).

**Таблица 1.** – Распределение РГМН в зонах

	Сумма слоёв					Слой 0-6 мм					Слой 0-3 мм				
	Макс. РГМН	Мин. РГМН	Сред. РГМН	СКО	дисп.	Макс. РГМН	Мин. РГМН	Сред. РГМН	СКО	дисп.	Макс. РГМН	Мин. РГМН	Сред. РГМН	СКО	дисп.
Зона 1 (5x25)	113,02	-156,02	-19,87	61,37	3766,71	89,88	-68,45	-6,86	32,43	1051,8	67,63	-98,72	-13,02	32,28	1042,2
Зона 2 (5x25)	94,19	-165,83	-50,66	55,54	3084,59	86,42	-82,34	-18,31	30,55	933,5	43,19	-102,44	-32,35	28,84	832,03
Зона 3 (5x25)	49,92	-147,31	-73,09	40,85	1646,97	70,02	-68,18	-21,84	26,45	699,53	5,1	-90,51	-51,25	17,5	306,09
Зона 4 (5x25)	61,01	-149,07	-72,32	37,77	1426,32	65,57	-71,88	-19,5	25,72	661,49	5,14	-82,23	-52,82	14,75	217,65
Зона 5 (5x25)	49,68	-168,28	-57,33	46,04	2120,03	52,98	-79,75	-18,1	27,78	771,98	17,58	-96,14	-39,23	21,57	465,27
Зона 6 (5x20)	90,62	-121,25	-28,51	47,16	2228,84	77,98	-64,39	-8,91	30,72	944,01	28,87	-63,32	-19,6	19,94	397,62

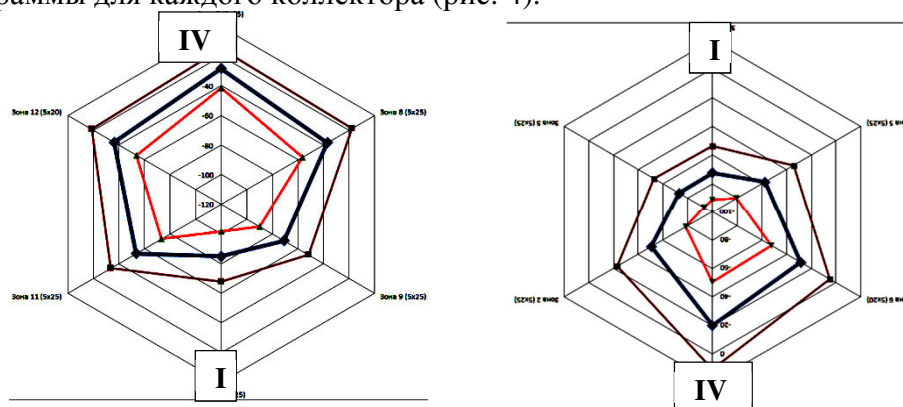
В таблице показано распределение РГМН по каждому из слоев карты: поверхностный (0-3 мм), глубокий (0-6 мм). Указаны максимальное, минимальное и среднее значение РГМН для каждой зоны. Приведена величина среднеквадратичного отклонения, характеризующая отклонения величины РГМН от среднего значения.

Аналогичные измерения проведены для каждого из восьми коллекторов. Данные, сведенные в таблицу 2, показывают, что, в среднем, все контролируемые зоны находятся в зоне действия растягивающих напряжений, причем, зона сварного соединения коллекторов парогенератора № 4 характеризуется наибольшей разгруженностью и удовлетворительной однородностью распределения напряжений (незначительная величина отклонения).

**Таблица 2.** – Данные контролируемых зон коллекторов парогенераторов

Контролируемая зона парогенератора	Среднее значение РГМН	Отклонение
ПГ1 холодный	-79,5	26,1
ПГ1 горячий	-75,8	28,6
ПГ2 холодный	-78,7	23,0
ПГ2 горячий	-68,5	32,5
ПГ3 холодный	-50,3	26,7
ПГ3 горячий	-51,8	19,6
ПГ4 холодный	-130,3	29,7
ПГ4 горячий	-91,9	21,3

Согласно распределению РГМН по длине окружности, построены круговые диаграммы для каждого коллектора (рис. 4).



а) холодный коллектор

б) горячий коллектор

**Рис. 4.** – Распределение РГМН по окружности зоны сварного шва №111 холодного (а) и горячего (б) коллекторов



Аналогично распределению РГМН строятся карты распределения КМН (рис. 5) также каждой зоны.

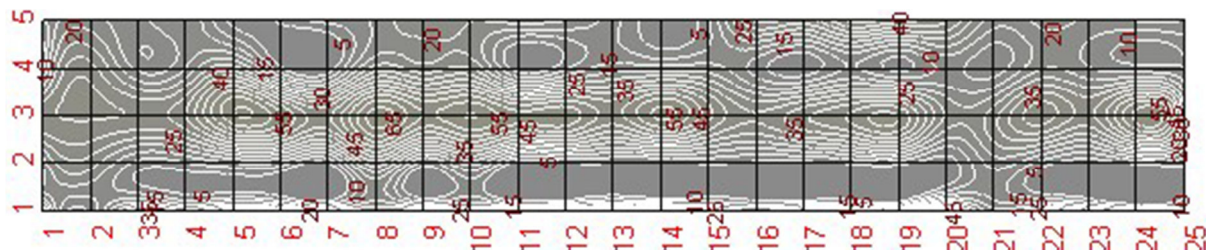


Рис. 5. – Распределение КМН первой карты зоны сварного соединения №111 холодного коллектора парогенератора ПГВ-1000

Анализ распределения РГМН и КМН позволяет сделать вывод о том, что зона сварного соединения в области короткой образующей коллектора в 2-3 раза более напряжена (I), чем зона сварного соединения в области длинной образующей (IV), что согласуется с данными, приведенными другими исследователями [1], как о зоне, наиболее подверженной возможному появлению дефектов.

Контроль параметров магнитной анизотропии зоны сварного соединения №111 ПГВ 1000 позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии концентраторов механических напряжений, выполнить оценку уровней разности главных механических напряжений в зоне сварного шва.

Таким образом, периодическое диагностирование сканером (индикатором) механических напряжений Stressvision зоны сварного шва № 111 ПГВ1000 позволит выявить и оценить возможные изменения РГМН (КМН) и обеспечить контроль термомеханической нагруженности узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трунов, Н.Б. Разработка и обоснование мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сварных соединений № 111 парогенератора ПГВ-1000М. [Текст] / Н.Б. Трунов и др. // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. тез. 6-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 26-29 мая 2009. – Подольск, 2009.
2. Ермаков, Е.Л. и др. Некоторые результаты неразрушающего контроля металла первого контура охлаждения реактора ВВР-К. [Текст] / Е.Л. Ермаков, О.В. Тиванова. // Ядерная и радиационная физика: сб. тез. 9-ой Междунар. конф., Казахстан, Алматы, 24-27 сент. 2013 г. – Алматы, 2013.
3. Сканер механических напряжений STRESSVISION. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://www.stressvision.ru/> – 21.10.2015.
4. Capabilities of the method for evaluation of stressed-deformed state at inspection of nuclear power facilities. Available at: [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_12\\_06.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_12_06.pdf)
5. Applied magnetic field and stress induced anisotropy dependence of energy for oriented ferromagnetic thick films. Available at: [http://www.kln.ac.lk/uokr/journals/J4/Journal\\_4-1.pdf](http://www.kln.ac.lk/uokr/journals/J4/Journal_4-1.pdf)
6. Jensen, P.J. & H. Dreyse. 2002. In-plane magnetic reorientation in coupled ferro and antiferromagnetic thin films. Physical Review B 66: 220407-1-4.
7. Samarasekara, P. 2006. A solution of the Heisenberg Hamiltonian for oriented thick ferromagnetic films. Chinese Journal of Physics 44(5): 377-386.
8. Shan-Ho. Tsai. D.P. Landau & C Thomas Schulthess. 2003. Effect of interfacial coupling on the magnetic ordering in ferro-antiferromagnetic bilayers. Journal of Applied Physics 93(10): 8612-8614.

## REFERENCES

- [1] Trunov, N.B. Razrabotka i obosnovaniye meropriyatiy po obespecheniyu nadiozhnoy i bezopasnoy ekspluatatsiyi svarnykh soyedineniy № 111 parogeneratora PGV-1000M [Elaboration and grounds of measures for ensuring safe and reliable operation of welded connections 111 of steam generator

- PGV-1000M]. Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER: sbornik tezisov Shestoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsyi – Podolsk: OKB «Gidropress», 26-29 maya 2009 [Ensuring safety of NPPs with WVER type reactor: collected theses of 6<sup>th</sup> International scientific and technical conference – Podolsk: OKB «Gidropress», May 26-29, 2009], Podolsk, 2009 (in Russian)
- [2] Yermakov, E.L. Nekotoriye rezultaty nerazrushayuschego kontrolya metalla pervogo kontura okhlazhdeniya reaktora VVR-K. [Some results of nondestructive metal testing of WWR-K type reactor coolant circuit] Yadernaya i radiatsyonnaya fizika: sbornik tezisov Devyatoy Mezhdunarodnoy konferentsyi, Kazakhstan, Almaty, 24-27 sent. 2013 [Nuclear and radiation physics: collected theses of 9<sup>th</sup> International conference, Kazakhstan, Almaty, September 24-27, 2013]. Almaty, 2013, ISBN 9965-675-85-6 (in Russian)
- [3] Skaner mekhanicheskikh napryazheniy STRESSVISION. [The mechanical stress scanner STRESSVISION]. Available at: <http://www.stressvision.ru> (in Russian)
- [4] Capabilities of the method for evaluation of stressed-deformed state at inspection of nuclear power facilities. Available at: [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_12\\_06.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_12_06.pdf) (in English)
- [5] Applied magnetic field and stress induced anisotropy dependence of energy for oriented ferromagnetic thick films. Available at: [http://www.kln.ac.lk/uokr/journals/J4/Journal\\_4-1.pdf](http://www.kln.ac.lk/uokr/journals/J4/Journal_4-1.pdf) (in English)
- [6] Jensen. P.J. & H. Dreyse. 2002. In-plane magnetic reorientation in coupled ferro and antiferromagnetic thin films. Physical Review B 66: 220407-1-4. ISSN 1098-0121 (in English)
- [7] Samarasekara, P. 2006. A solution of the Heisenberg Hamiltonian for oriented thick ferromagnetic films. Chinese Journal of Physics 44(5): 377-386. ISSN 0577-9073 (in English)
- [8] Shan-Ho. Tsai. D.P. Landau & C Thomas Schulthess. 2003. Effect of interfacial coupling on the magnetic ordering in ferro-antiferromagnetic bilayers. Journal of Applied Physics 93(10): 8612-8614. ISSN 0021-8979 (in English)

## Thermomechanical Loading Monitoring of Heat Carrier Collector Welding Joint to Steam Generators PGV-1000 Du1200 Branch Pipe

A.K. Adamenkov\*, I.N. Veselova\*\*, I.V. Malakhov\*

\* «Rostov nuclear power plant» the branch OJSC «Rosenergoatom Concern»,  
Volgodonsk-28, Rostov region, Russia 347340

\*\* Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
e-mail: INVeselova@mephi.ru

**Abstract** – In article possibility of one of operations directed to decrease in probability of welded joint zone damage of the VVER-1000 steam generator collector, namely, monitoring of thermomechanical loading of №111 welded seam at the steam generator operation is considered. The made analysis of welded joint destruction mechanism allowed to define that metal damage in the welding zone of the heat carrier collector to Du1200 branch pipe happens in the direction of MCP hot string from short forming a branch pipe, near a zone to the maximum mechanical tension.

Diagnosing operations of № 111 welded joint zone of steam generator collectors were made by the Stressvision mechanical tension scanner (indicator) at the Rostov NPP for the purpose of mechanical loading control. The principle of the device operation is based on the phenomenon of magnetic anisotropy of ferromagnetic material products, i.e. magnetic state change under the influence of mechanical tension.

The analysis of gradient distribution and of mechanical tension concentrators allows to draw a conclusion that the welded joint zone in the field of collector short forming is 2-3 times more strained than welded joint zone in the field of long forming that will be coordinated with the data provided by other researchers as the most possible emergence defect zone.

Thus, periodic diagnosing by the Stressvision indicator of № 111 welded seam zone will allow to reveal and estimate possible changes of gradient and mechanical tension concentrators and to provide thermomechanical loading monitoring of heat carrier collector welding joint to steam generators Du1200 branch pipe.

**Keywords:** № 111 the weld joint, steam collectors, magnetic anisotropy, the gradients and mechanical tension concentrators, thermomechanical loading, Stressvision indicator.