

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25:621.039.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА  
ТРУБОПРОВОДОВ И МОНИТОРИНГ ЕГО РАЗВИТИЯ НА  
ОСНОВЕ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО МЕТОДА**

© 2021 А.К. Адаменков\*, И.Н. Веселова\*\*

\*АО ИК «АСЭ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

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

В рамках проведения экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов АЭС с помощью приборов на основе магнитоанизотропного метода, были получены и оценены изменения толщины стенки локального участка образца трубопровода и величины разности главных механических напряжений (РГМН). Выполненный анализ изменения данных, характеризующих напряженно-деформированное состояние (НДС), таких как: РГМН, первая частная производная РГМН по кольцевой образующей образца, модуль градиента РГМН, указывает на наличие трех зон, характеризующих различное НДС исследуемой области натурального образца трубопровода в течение проведения эксперимента по мере утонения локальной зоны.

*Ключевые слова:* метод магнитоанизотропии, разность главных механических напряжений (РГМН), локальные участки, модуль градиента РГМН, цикличность нагружения, стенд для испытаний.

Поступила в редакцию 05.07.2021

После доработки 08.07.2021

Принята к печати 19.07.2021

Безопасность, надежность, экономичность эксплуатации АЭС в значительной степени зависят от надежного функционирования теплообменного оборудования и трубопроводов конденсатно-питательного тракта. Технологические системы конденсатно-питательного тракта АЭС имеют значительную протяженность, сложную конфигурацию и работают в условиях, при которых основным видом дефектов металла трубопроводов и теплообменного оборудования, изготовленных из углеродистой стали, является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ).

Анализ результатов контроля состояния металла показывает существенную неравномерность эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и оборудования, который зависит от большого числа факторов. Знание механизма эрозионно-коррозионного износа, его зависимости от физико-химических свойств металла, геометрических характеристик, эксплуатационных режимов позволит на стадии эксплуатации АЭС оптимизировать объемы эксплуатационного контроля, уменьшить количество отказов оборудования и внеплановых остановов энергоблоков.

В настоящее время на АЭС России для контроля развития ЭКИ реализуется типовая программа «Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации» [1]. Основное содержание мероприятий указанной программы – периодический контроль толщины предварительно определенных участков (гибы, тройники и т.п.) трубопроводов [2]. Но выполнение данных мероприятий сопряжено с двумя аспектами:

1. Измерение толщины требует выполнения трудоемких подготовительных мероприятий на контролируемых участках.

2. Анализа данных эксплуатационного контроля показывает, что для определенного количества элементов (до 30 % по объему) минимальные толщины стенок равны или превышают значения номинальных толщин. Рассчитать скорость ЭКИ и длительность эксплуатации трубопроводов с минимальными толщинами стенок равными или меньшими номинальных толщин с использованием номинальных толщин не представляется возможным и для этих целей принимаются средние значения толщин [3].

Для оценки возможности определения уровня эксплуатационной надежности трубопроводов в части подверженности ЭКИ альтернативным методом магнитной анизотропии [4-6] был выполнен натурный эксперимент, имитирующий постепенное локальное утонение стенки трубопровода по механизму развития ЭКИ, на стенде для пневматических и гидравлических испытаний и настройки предохранительных клапанов с использованием сканера механических напряжений «STRESSVISION» Expert [7] и УЗ толщиномера.

В качестве натурального образца был использован элемент трубопровода, состоящий из трех деталей: корпус, заглушка и фланец, которые были соединены между собой с использованием сварки. Сварку производили сплошным швом по контуру прилегания деталей. Сварку выполняли в среде углекислого газа сварочной проволокой Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70. Параметры натурального образца приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика деталей трубного образца [Characteristics of pipe sample parts]

Наименование детали	Маркировка	Размеры			Масса, кг
		Диаметр, мм	Длина, мм	Толщина, мм	
Корпус	159×6 ГОСТ 8732-78 Б 20 ГОСТ 8731-87	159	502	6	11,3
Заглушка	6 ГОСТ 19903-2012 СтЗпс ГОСТ 14637-89	152	–	6	3,7
Кольцо	8 ГОСТ 19903-2015 СтЗпс ГОСТ 14637-89	160×219	–	6	0,8

Перед испытаниями на образец была нанесена координатная сетка, с шагом 20x20 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Фотография опытного образца с координатной сеткой на стенде  
[Photo of a prototype with a grid on the stand]

Эксперимент проводился по следующему алгоритму:

1 шаг – с помощью сканера механических напряжений «Stressvision» выполнялась оценка напряженного состояния образца по углам координатной сетки. С помощью ультразвукового толщиномера Transport по этим же углам сетки производилось измерение толщины стенки элемента трубопровода.

2 шаг – образец устанавливался на стенд (рис. 1) подвергался нагружению давлением 2 МПа. После выдержки (двое-трое суток) осуществлялся сброс давления.

3 шаг – повторялись действия шага 1.

4 шаг – с помощью ручной шлифовальной машины выполнялась выборка толщины внутреннего слоя локального участка трубы в зоне разметки.

5 шаг – выполнялись действия шага 2.

6 шаг – выборка толщины, как указано в шаге 4.

Действия алгоритма повторялись до тех пор, пока визуально не было зарегистрировано изменение геометрии наружной поверхности участка трубы в зоне выборки толщины стенки (выпуклость). Всего было выполнено 29 циклов нагружения/разгрузки с выборкой толщины. Все результаты измерений сохранялись в памяти приборов для последующей обработки.

В ходе выполнения эксперимента зарегистрированы следующие основные параметры, фрагмент которых представлены в таблице 2. В таблице использованы следующие сокращения: РГМН – разность главных механических напряжений,  $dX$  – первая частная производная РГМН по кольцевой образующей образца, GRAD – модуль градиента РГМН [8], ТОЛЩ – толщина стенки участка трубы в месте выборки.

Таблица 2 – Основные параметры [Main settings]

№ опыта	1	2	3	...	27	28	29
РГМН	-9,8	-4,49	-5,13	...	-55,78	-34,68	-27,6
$dX$	0,2	0,03	-0,08	...	0,83	0,17	0,2
GRAD	2,9	1,62	2,17	...	4,9	4,12	3,7
ТОЛЩ	7,37	6,421	6,421	...	1,99	1,85	1,65

По результатам экспериментов (см. табл. 1) построены кривые, отражающие изменения параметров, часть из которых представлена на рисунке 2, где горизонтальная ось – номер опыта, а вертикальная – изменение толщины (а), изменение значения РГМН (б).

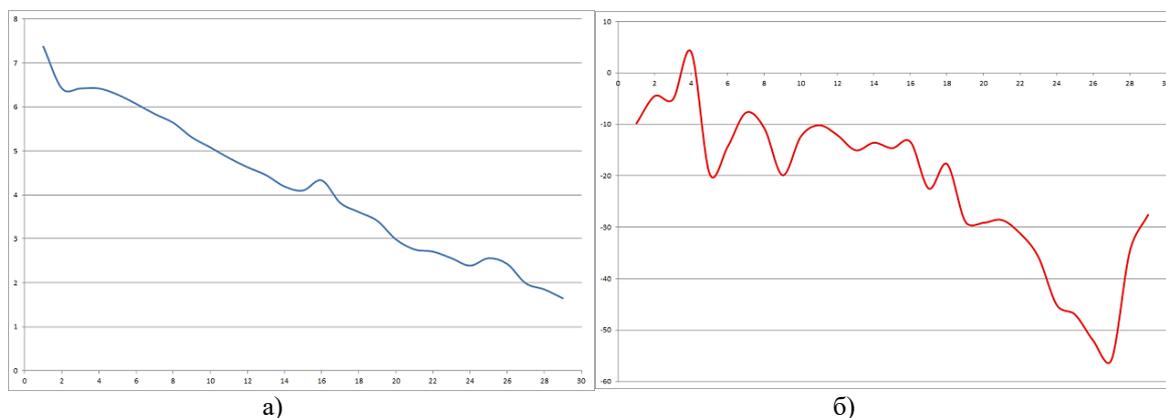


Рисунок 2 – Изменения параметров натурного образца в ходе эксперимента: а) изменение толщины стенки; б) изменение значения РГМН [Changes in the parameters of a full-scale sample during the experiment: a) change in the wall thickness; b) change in the value of the main mechanical stresses]

Предварительный графический анализ изменения нормализованных данных указывает на наличие, по мере утонения локальной области натурального образца, трех зон, характеризующих различное напряженно-деформированное состояние (НДС) [9-11] исследуемой области натурального образца трубопровода в течение проведения эксперимента по мере уменьшения толщины стенки (рис. 3).

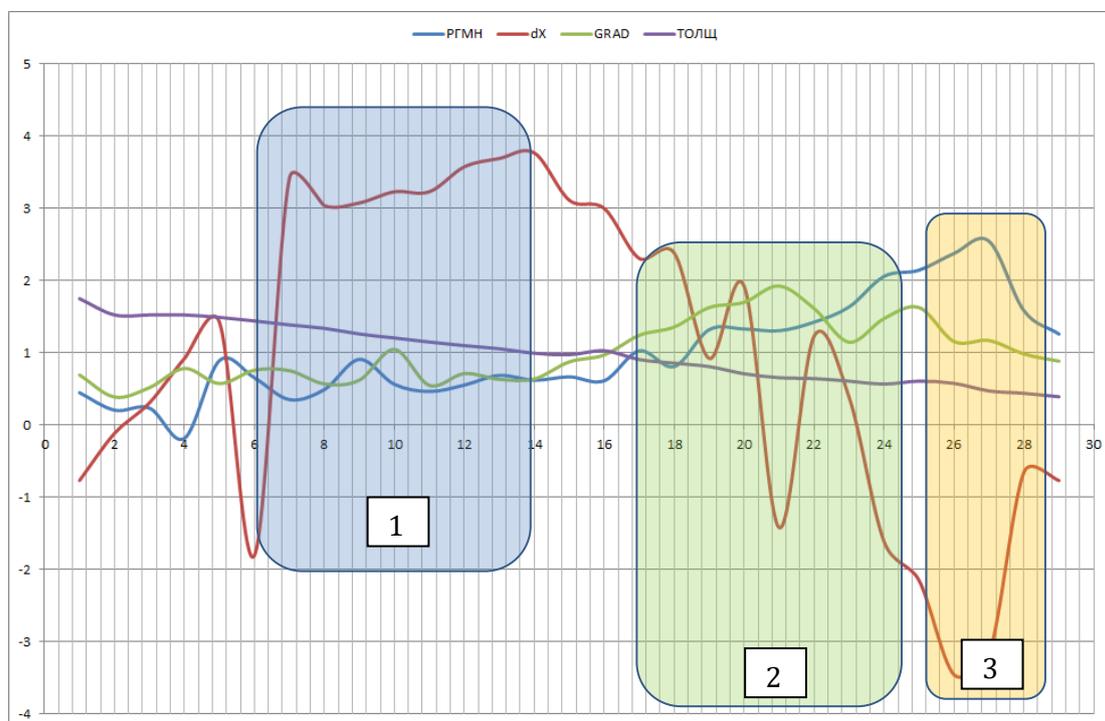


Рисунок 3 – График изменения нормализованных значений параметров, характеризующих напряженное состояние исследуемой зоны, в ходе проведения эксперимента: 1, 2, 3 – зоны различного характера изменений параметров [The graph of the change in the normalized values of the parameters characterizing the stressed state of the investigated zone during the experiment: 1, 2, 3 - zones of different character of parameter changes]

Зона 1. Область, в которой по мере уменьшения толщины (до 45% в абсолютном значении), изменения НДС материала практически не фиксируется.

Зона 2. При уменьшении толщины стенки в области выборки (более чем на 50%), происходит перераспределение напряжений, характеризующее начало пластической деформации участка [12].

Зона 3. Область, определяющая визуально фиксируемую пластическую деформацию участка образца трубопровода. При уменьшении толщины (до 7% от начальной), эксперимент был прекращен в связи с вероятным аварийным разрушением образца.

#### **Выводы:**

В ходе выполнения эксперимента продемонстрирована возможность мониторинга развития ЭКИ трубопроводов с помощью регулярного (периодического) обследования их потенциально опасных участков методом магнитной анизотропии.

При этом никакой предварительной подготовки обследуемого участка не требуется. Оценка РГМН и других параметров с помощью сканера механических напряжений возможна не только в период проведения ремонтных работ, но и в режиме «энергоблок на мощности».

Дальнейшая обработка полученных в ходе испытаний данных, позволит определить критерии, характеризующие эксплуатационную надежность трубопроводов [13], в части подверженности ЭКИ, в соответствии с действующей НТД [1, 2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018. Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации. Типовая программа. Введена в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 16.01.2019 №9/44-П. Разработана Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»). – Москва : Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2018.
2. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». Руководящий документ. Введен в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П. Разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»). – Москва : Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2015.
3. Бараненко, В.И. О разработке нормативной документации по эрозионно-коррозионному износу для энергоблоков АЭС [Электронный ресурс] / В.И. Бараненко, Ю.А. Янченко, О.М. Гулина [и др.]. – URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-052.pdf>.
4. Адаменков, А.К. Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии / А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, В.Я. Шпицер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 113-119.
5. SAKAI Yoshiaki, UNISHI Hiroyuki, YAHATA Teruo. Non-destructive Method of Stress Evaluation in Linerpipes Using Magnetic Anisotropy Sensor. JFE TECHNICAL REPORT No. 3 (July 2004).
6. Ничипурук, А.П. О возможности использования магнитных методов для оценки уровня одноосных пластических деформаций и остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях / Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С. [и др.]. // ИФМ УрО РАН. – Дефектоскопия. – 2015. – С. 201-207.
7. Патент № 2195636. Российская Федерация, МПК G01L1/12 (2006.01). Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления: № 2001106509/28 : заявл. 05.03.2001: опубл. 27.12.2002 / С.В. Жуков, В.С. Жуков, Н.Н. Копица. – 2 с.
8. Новопашин, М.Д. Градиентные критерии предельного состояния / М.Д. Новопашин, С.В. Сукнев // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 316-319.
9. Александров, А.В. Сопrotивление материалов / А.В. Александров. – Москва: Высшая школа, 2003. – С. 380-383.
10. Hosford, W.F. Mechanical Behavior of Materials / W.F. Hosford. – New-York: Cambridge University Press, 2005. – 342 p.
11. Матвиенко, Ю.Г. Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести / Ю.Г. Матвиенко // Вестник научно-технического развития. – 2014. – №7(83). – С.48-51.
12. Соснин, О.В. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов / О.В. Соснин, А.Ф. Никитенко, Б.В. Горев // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т.51. №4. – С.188-196.
13. Никитин, В.Е. Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного метода после применения ультразвуковой ударной обработки / В.Е. Никитин, Я.И. Евстратикова // Наука и техника. Сварка и диагностика. – 2019. – №4. – С. 38-42.

## REFERENCES

- [1] TPRG 1.1.3.09.1515-2018. Kontrol sostoyaniya osnovnogo metalla, svarnykh soedinenii i naplavlennykh poverkhnostei oborudovaniya, truboprovodov i drugikh elementov atomnykh stantsii s reaktornoй ustanovkoi VVER-1000 v proektnom sroке ekspluatatsii. Tipovaya programma. Vvedena v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 16.01.2019 №9/44-P. Razrabotana Aktsionernym obshchestvom «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii» (AO «VNIIAES») [TPRG 1.1.3.09.1515-2018. Monitoring the Condition of the Base Metal, Welded Joints and Weld-On Surfaces of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants with a WWER-1000 Reactor in the Design Life. Typical Program. It was put into effect by order of Rosenergoatom Concern JSC dated January 16, 2019 No. 9/44-P. Developed by the All-Russian Scientific Research Institute for the Operation of Nuclear

- Power Plants Joint Stock Company (VNIIAES JSC)]. Moskva. Aktsionernoe obshchestvo «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Moscow: Joint Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants»]. 2018 (in Russian).
- [2] RD EO 1.1.2.11.0571-2015 «Normy dopuskaemykh tolshchin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh stalei pri erozionno-korroziionnom iznose». Rukovodyashchii document. Vveden v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 06.08.2015 №9/876-P. Razrabotan Aktsionernym obshchestvom «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii» (AO «VNIIAES») [RD EO 1.1.2.11.0571-2015 «Standards for Permissible Wall Thicknesses of Pipeline Elements Made of Carbon Steels During Erosion-Corrosive Wear». Guidance document. It was put into effect by order of Rosenergoatom JSC dated 06.08.2015 No. 9/876-P. Developed by the Joint Stock Company All-Russian Scientific Research Institute for the Operation of Nuclear Power Plants (JSC VNIIAES)]. Moskva. Aktsionernoe obshchestvo «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Moscow: Joint Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants»]. 2015 (in Russian).
- [3] Baranenko V.I., Yanchenko U.A., Gulina O.M. O razrabotke normativnoi dokumentatsiii po erozionno-korroziionnomu iznosu dlya energoblokov AES [The Development of Regulatory Documentation on Erosion and Corrosion Wear for NPP Power Units]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-052.pdf> (in Russian).
- [4] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpicer V.Y. Ocenka razvitiya erozionno-korroziionnogo iznosa s pomoshchiu metoda izmereniya magnitnoy anizotropii [Assessment of the Development of Erosion and Corrosion Wear Using the Method of Measuring Magnetic Anisotropy]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P.113-119 (in Russian).
- [5] SAKAI Yoshiaki, UNISHI Hiroyuki, YAHATA Teruo. Non-destructive Method of Stress Evaluation in Linepipes Using Magnetic Anisotropy Sensor. JFE TECHNICAL REPORT No.3 (July 2004) (in English).
- [6] Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S. O vozmozhnosti ispolzovaniya magnitnikh metodov dlya osienki urovnya odnoosnikh plasticheskikh deformatsiii i ostatochnikh napryazhenii v nizkouglerodistikh stalyakh [Possibility of Using Magnetic Methods to Assess the Level of Uniaxial Plastic Deformations and Residual Stresses in Low-Carbon Steels]. IFM UrO RAN. Defektoskopiya [IFM UrO RAN. Flaw Detection]. 2015. P.201-207 (in Russian).
- [7] Patent RF № 2195636. Russian Federation, MPK G01L1/12 (2006.01). Sposob opredeleniia mekhanicheskikh napriazhenii i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Method for determining mechanical stresses and device for its implementation]. Zhukov S.V., Zhukov V.S., Kopitsa N.N. № 2001106509/28 : zayav 05.03.2001: opubl. 27.12.2002 (in Russian).
- [8] Novopashin M.D., Suknev S.V. Gradientnye kriterii predelnogo sostoianiia [Gradient Criteria of the Limit State]. Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaia seriia [Bulletin of the Samara State University. Natural Science Series]. 2007. №4(54). P.316-319 (in Russian).
- [9] Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]. Moskva: Vysshay shkola [Moscow: High School]. 2003. P.380-383 (in Russian).
- [10] Hosford W.F. Mechanical Behavior of Materials. – New-York: Cambridge University Press, 2005. 342 p. (in English).
- [11] Matvienko U.G. Razvitie modelei i kriteriev razrusheniya v sovremennikh problemakh prochnosti i zhivuchesti [Development of Fracture Models and Criteria in Modern Problems of Strength and Survivability]. Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2014. №7 (83). P.48-51 (in Russian).
- [12] Sosnin O.V., Nikitenko A.F., Gorev B.V. K obosnovaniu energeticheskogo varianta teorii polzuchesti i dlitelnoi prochnosti metallov [Substantiate the Energy Version of the Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals]. Prikladnaya mekhanika i tehniceskaya fizika. [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2010. T.51. №4. P.188-196 (in Russian).
- [13] Nikitin V.E., Evstratikova Y.I. Kontrol ostatochnih svarochnih napryazhenii s pomoshchiu magnitoanizotropnogo metoda posle primeneniya ultrazvukovoi udarnoi obrabotki [Control of Residual Welding Stresses Using the Magnetic Anisotropic Method after the Application of Ultrasonic Shock Treatment]. Nauka i tehnika. Svarka i diagnostika [Science and technology. Welding and Diagnostics]. 2019. №4. P.38-42 (in Russian).

## Modeling of Erosion-Corrosion Wear of Pipelines and Monitoring of its Development Based on Magnetic Anisotropic Method

A.K. Adamenkov <sup>\*1</sup>, I.N. Veselova <sup>\*\*2</sup>

*\*AO EC «ASE», Volgodonsk, Rostov region, Russia*

*\*\*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»*

*Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*<sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0001-7342-0231*

*WoS Researcher ID: O-1921-2018*

*e-mail: anri\_61@mail.ru*

*<sup>2</sup>ORCID iD: 0000-0001-5867-5690*

*WoS Researcher ID: M-1893-2018*

*e-mail: INVeselova@mail.ru*

**Abstract** – As part of the experimental assessment of the stress-strain state of the NPP pipeline elements using devices based on the magnetic anisotropic method, changes in the wall thickness of the local section of the pipeline sample and the difference in the main mechanical stresses are obtained and evaluated. The analysis of changes in the data characterizing the stress-strain state, such as: the main mechanical stresses, the first partial derivative of the main mechanical stresses with respect to the annular generator of the sample, the modulus of the gradient of the main mechanical stresses, indicates the presence of three zones characterizing different of the studied area of the full-scale sample of the pipeline during the experiment as the local zone is thinned.

**Keywords:** magnetic anisotropic method, difference of the main mechanical stresses, local areas, modulus of main mechanical stresses gradient, the cyclicity of loading, the test bench.