

---

---

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

---

---

УДК 621.311.25:621.039.5

**ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ЭРРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА  
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ  
АНИЗОТРОПИИ**

© 2019 А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, В.Я. Шпицер

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

В работе представлена оценка развития эррозионно-коррозионного износа элементов трубопроводов с помощью метода измерения магнитной анизотропии. Целью обследования являлось фиксирование локально-напряженных областей, которые присущи локальным утонениям стенки в зонах с вероятным эррозионно-коррозионным износом и определение параметров магнитной анизотропии, а также формирование базы данных результатов измерений.

*Ключевые слова:* трубопроводы, толщинометрия, эрозионно-коррозионный износ, магнитная анизотропия.

Поступила в редакцию 18.10.2018

После доработки 21.02.2019

Принята к публикации 01.03.2019

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является одним из распространенных механизмов повреждений элементов трубопроводов, изготовленных из углеродистых сталей, на электрических станциях. Анализ аварий по причине ЭКИ на американской АЭС Сарри-2 и на японской АЭС Михама-3 показывает, что результатом бесконтрольного развития ЭКИ, является рост сквозной трещины, ориентированной вдоль направления движения рабочей среды.

В соответствии с требованиями [1], на АЭС концерна Росэнергоатом разработаны перечни элементов и деталей трубопроводов турбинного отделения (ТО), подверженных эрозионно-коррозионному износу. Документ определяет необходимость периодического контроля толщины стенки таких узлов трубопроводов. Выполнение эксплуатационного контроля толщин стенок трубопроводных систем, в части обеспечения положений руководящего документа, обеспечивает надежность элементов трубопроводов по критериям сопротивления разрушению металла А именно, предотвращение [2]:

- 1) образования течей через устойчивые сквозные дефекты ЭКИ;
- 2) гильотинного обрыва трубопровода с двусторонним истечением из него;
- 3) разрыва трубопровода вдоль его оси по образующей.

В период эксплуатации требуемый уровень надежности обеспечивается до следующего срока выполнения толщинометрии (или окончания эксплуатации). С другой стороны, локальный износ (локальное утонение) образует локальные повышенные напряженные зоны, которые при утонении стенки значительно возрастают. Учитывая, что трубопроводы периодически работают в режиме рабочего и атмосферного давления, металл трубопроводов испытывает знакопеременные нагружения, которые в локальных областях в процессе эксплуатации могут приводить к

усталостным малоцикловым повреждениям.[3]

Механизм действия ЭКИ – формирование локальных зон утонения, ориентированных в направлении движения потока (1 критерий развития ЭКИ). При проведении технического обследования технологического трубопровода на одном из энергоблоков электростанции [4] были обнаружены зоны утонения. Для оценки их влияния на техническое состояние трубопроводов были выполнены проверочные расчеты.

По результатам расчетов определено, что в зоне утонения стенки трубопровода общие мембранные напряжения превышают допустимые значения, но не превышают временное сопротивление. Как следствие, это может привести к необратимым локальным пластическим деформациям на участках с утонением в зонах действия местных мембранных напряжений.

С целью выполнения оценки остаточных напряжений в металле трубопроводов, подверженных ЭКИ, фиксирования возможных локальных напряженных зон в период проведения ППР энергоблока Ростовской АЭС проведено обследование методом магнитной анизотропии [5] ряда участков, согласно перечня элементов и деталей трубопроводов ТО энергоблока Ростовской АЭС (табл. 1). Целью обследования являлось фиксирование локально-напряженных областей, которые присущи локальным утонениям стенки в зонах с вероятным ЭКИ. Определение параметров магнитной анизотропии, формирование базы данных результатов измерений[6].

Во время выполнения работ на поверхность контролируемой зоны участков трубопроводов ТО наносилась прямоугольная координатная сетка. Размерность зоны и шаг координатной сетки определяются размером контролируемой зоны.

Таблица 1 – Общие данные обследованных зон методом магнитной анизотропии [General data surveyed areas by the magnetic anisotropy]

| № зоны | Типо-размер | Параметры среды                                 | Примечание   |
|--------|-------------|---|--|
| 1      | 159x9       | Среда – питательная вода (p=0,88 МПа, T=142 °C) | Трубопровод напора вспомогательного питательного насоса            |
| 2      | 159x9       | Среда – питательная вода (p=0,88 Мпа, T=159 °C) | Трубопровод рециркуляции турбопитательного насоса на деаэрактор    |
| 3      | 159x9       | Среда – питательная вода (p=0,88 МПа, T=142 °C) |  |
| ...    | ....        | ....  | ....   |
| 9      | 133x6       | Среда – конденсат (p=2,65 Мпа, T=288 °C)        | Трубопровод сепаратора пароперегревателя на различных участках     |
| 10     | 133x6       | Среда – конденсат (p=2,65 МПа, T=288 °C)        |  |
| 11     | 133x13      | Среда – конденсат (p=5,72 МПа, T=272 °C)        |  |
| ...    | ...         | ...   | ...  |
| 21     | 159x7       | Среда – конденсат (p=1,6 МПа T= 188°C)          | Трубопровод дополнительного слива сепарата в общий сепаратосборник |

В результате выполненного обследования участков трубопроводов ТО энергоблока РоАЭС получены картограммы распределения разности главных напряжений (РГМН (а)) и концентраторов механических напряжений (КМН (б)) для каждой зоны. Графически полученные данные представлены в виде карт (рис. 1), на которых зоны концентрации напряжений показаны светлым (1), а зоны изменения величины РГМН и КМН – изострессами (2). Карты позволяют выделить локальные зоны увеличенных значений РГМН – локально напряженные зоны (1).

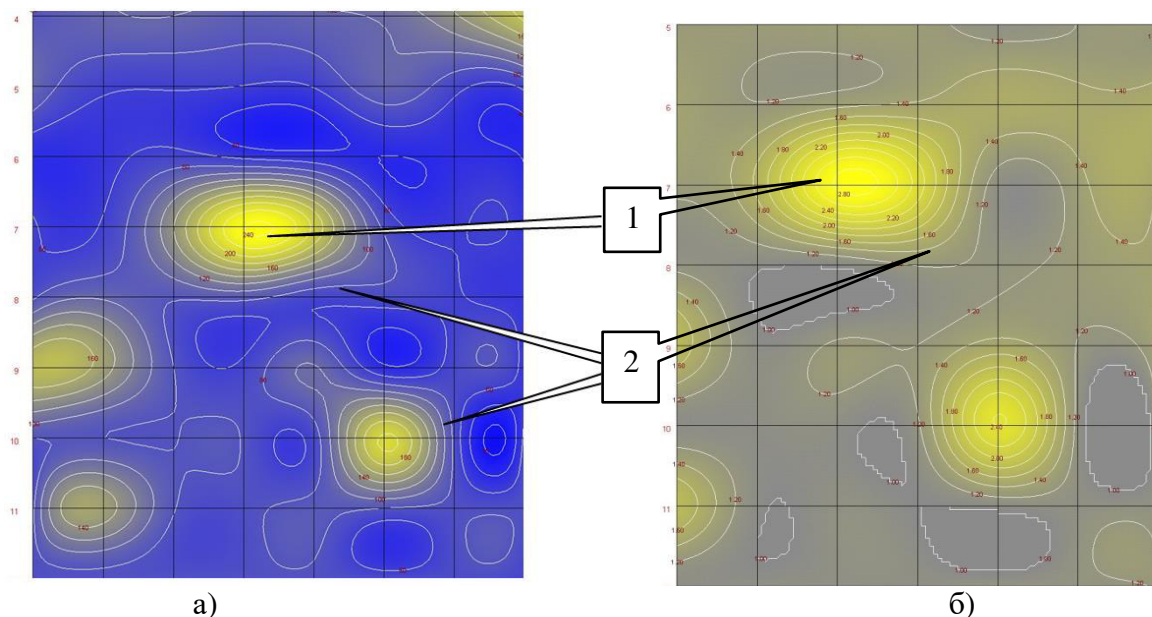


Рисунок 1 – Карта РГМН (а) и КМН (б) зоны №2 (табл.1): 1 – выявленные локальные области увеличенных значений РГМН и КМН; 2 – изострессы [The chart of the distribution of the difference between the main stresses (a) and mechanical stress concentrators (b) of zone No. 2 (Table 1): 1 – identified local areas of increased values; 2 – isostress]

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) каждого участка проводилась статистическая обработка значений РГМН и КМН и визуальный анализ полученных картограмм.

При выполнении анализа значений РГМН и КМН оценивались статистические параметры по каждой из зон, такие как средние, максимальные и минимальные значения РГМН (табл. 2) и КМН, а также значение среднеквадратичного отклонения [7].

Таблица 2 – Статистические данные РГМН [Statistics of main voltage difference distribution]

| №№ зоны | Слой 0-6 мм |           |            |      | Слой 0-3 мм |           |            |      |
|---------|-------------|-----------|------------|------|-------------|-----------|------------|------|
|         | Макс. РГМН  | Мин. РГМН | Сред. РГМН | СКО  | Макс. РГМН  | Мин. РГМН | Сред. РГМН | СКО  |
| Зона 1  | 91,1        | -60,8     | 20,2       | 25   | 166,6       | -116,9    | 31,8       | 47,8 |
| Зона 2  | 121,8       | -2,5      | 35,5       | 17,5 | 124,8       | 16,5      | 53         | 18,7 |
| Зона 3  | 201,1       | -51,6     | 26,7       | 41,3 | 229,9       | -125,4    | 22         | 65,9 |
| Зона 4  | 88,7        | -37       | 12,5       | 27   | 165,7       | -95,8     | 11,1       | 50,8 |
| Зона 5  | 92,8        | -64,9     | 12,6       | 31,8 | 146,9       | -98,3     | 14,5       | 51,3 |
| Зона 6  | 95,9        | -51,5     | 15,4       | 32,6 | 142,3       | -110      | 17,3       | 54,7 |
| Зона 8  | 247,9       | -224,5    | 3,3        | 50,2 | 283,6       | -276,9    | -10,5      | 65,7 |
| Зона 9  | 179,2       | -1,6      | 29,8       | 24,7 | 192,9       | -21,1     | 50,5       | 31,9 |
| Зона 10 | 139         | -77,2     | 1,1        | 40,7 | 151,2       | -145,7    | -16,5      | 69,6 |
| Зона 11 | 271,9       | -56,9     | 19,5       | 44,5 | 298,4       | -93,7     | 18,9       | 55,5 |
| Зона 13 | 110,3       | -80,2     | 15,6       | 46,8 | 180,2       | -140,5    | 14,1       | 81,4 |
| Зона 17 | 116,5       | -64,8     | 17,8       | 36,8 | 214,1       | -140,9    | 26,1       | 73,1 |
| Зона 18 | 55,8        | -66,1     | 14,9       | 20   | 103,1       | -123,8    | 27,1       | 35,9 |
| на 19   | 48          | -61,6     | 8,9        | 20,2 | 82,5        | -121,1    | 16,6       | 38,8 |
| Зона 20 | 93,2        | -45       | 32,3       | 33,9 | 169,2       | -134,7    | 34,9       | 66,8 |
| Зона 21 | 118,7       | -116,8    | 20,1       | 38,3 | 185,2       | -132,9    | 29,3       | 65,6 |

Дальнейшая обработка статистических данных проводилась в пакете Statistica с использованием инструмента «Кластерный анализ».

На первом этапе выполнена иерархическая классификация, при этом в качестве объектов приняты наблюдения (строки). В качестве правила объединения определен

метод полной связи, в качестве меры близости – евклидово расстояние.

Мера близости, определяемая евклидовым расстоянием, является геометрическим расстоянием в  $n$ -мерном пространстве [8]. Результатом, получаемым в результате древовидной кластеризации, является иерархическое дерево (рис. 2). Предварительный анализ указывает на объединение зон с номерами 2, 3, 9 и 11.

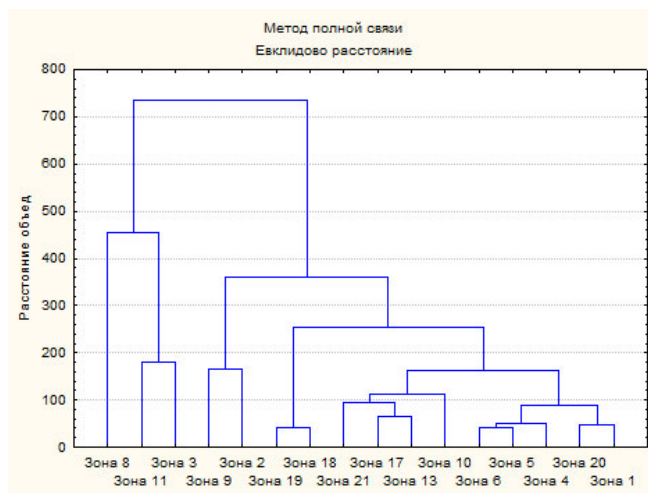


Рисунок 2 – Дендограмма зон наблюдения [Dendogram observation areas]

Для проверки данного предположения выполнялась разбивка исходных данных методом «К-средних» на 4 кластера. Метод заключается в следующем: вычисления начинаются с  $k$  случайно выбранных наблюдений (в нашем случае  $k=4$ ), которые становятся центрами групп, после чего объектный состав кластеров меняется с целью минимизации изменчивости внутри кластеров и максимизации изменчивости между кластерами. Каждое следующее наблюдение ( $K+1$ ) относится к той группе, мера сходства с центром тяжести которого минимальна.

После изменения состава кластера вычисляется новый центр тяжести, чаще всего, как вектор средних по каждому параметру. Алгоритм продолжается до тех пор, пока состав кластеров не перестанет меняться. В результате вычислений получены следующие три кластера (зона № 8 не отнесена ни к одному кластеру) (рис. 3):

|  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Элементы кластера номер 2 (Статистика среднее) и расстояния до центра кластера.<br>Кластер содержит 2 набл.  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|  | Зона 2   | Зона 9   |          |          |          |          |          |          |          |
| Расст.   | 24,04729 | 24,04729 |          |          |          |          |          |          |          |
| Элементы кластера номер 3 (Статистика среднее) и расстояния до центра кластера.<br>Кластер содержит 2 набл.  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|  | Зона 3   | Зона 11  |          |          |          |          |          |          |          |
| Расст.   | 25,83701 | 25,83701 |          |          |          |          |          |          |          |
| Элементы кластера номер 4 (Статистика среднее) и расстояния до центра кластера.<br>Кластер содержит 11 набл. |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|  | Зона 1   | Зона 4   | Зона 5   | Зона 6   | Зона 10  | Зона 13  | Зона 17  | Зона 18  | Зона 19  |
| Расст.   | 10,24996 | 20,92571 | 13,47779 | 10,57309 | 28,01557 | 21,69330 | 29,49007 | 34,95184 | 44,40300 |

Рисунок 3 – Кластеры, полученные в результате вычислений [Calculated clusters]

Таким образом, результаты кластерного анализа указывают на наличие четырех зон, объединенных в кластеры – № 2, 9, 3, 11.

Визуальный анализ полученных картограмм с целью фиксирования локально-напряженных зон и оценки их на соответствие критерию №1 формирования ЭКИ (протяженность вдоль направления движения среды) также показывает, что все четыре вышеуказанные зоны имеют ярко выраженный протяженный характер распределения напряжений (по направлению движения среды). Данное утверждение иллюстрируется сравнением картограмм зон 2 и 3 кластера (рис. 4) и картограммы 4 зоны, отнесенной к 4 кластеру (рис. 5)

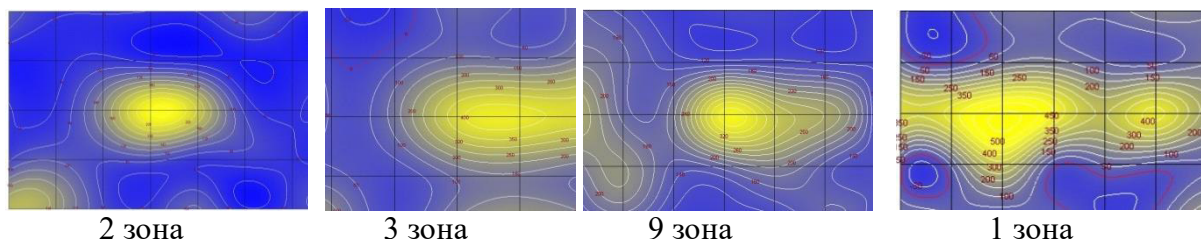


Рисунок 4 – Фрагменты карт РГМН с локально направленными областями действия напряжений [Fragment of chart of main voltage difference distribution with locally undirected stress areas]

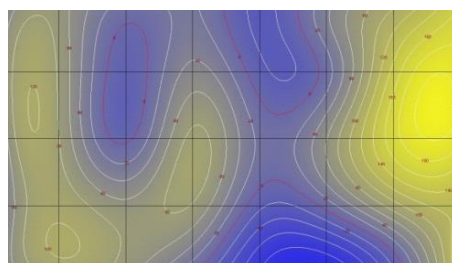


Рисунок 5 – Фрагмент карты РГМН 4 зоны с локально ненаправленными областями действия напряжений [Fragment of chart of main voltage difference distribution of 4th zone with locally undirected stress areas]

Для более полной визуализации ниже приведены 3D картограммы зоны №1 без областей с действующими мембранными напряжениями и зоны №3 с такой областью (рис. 6).

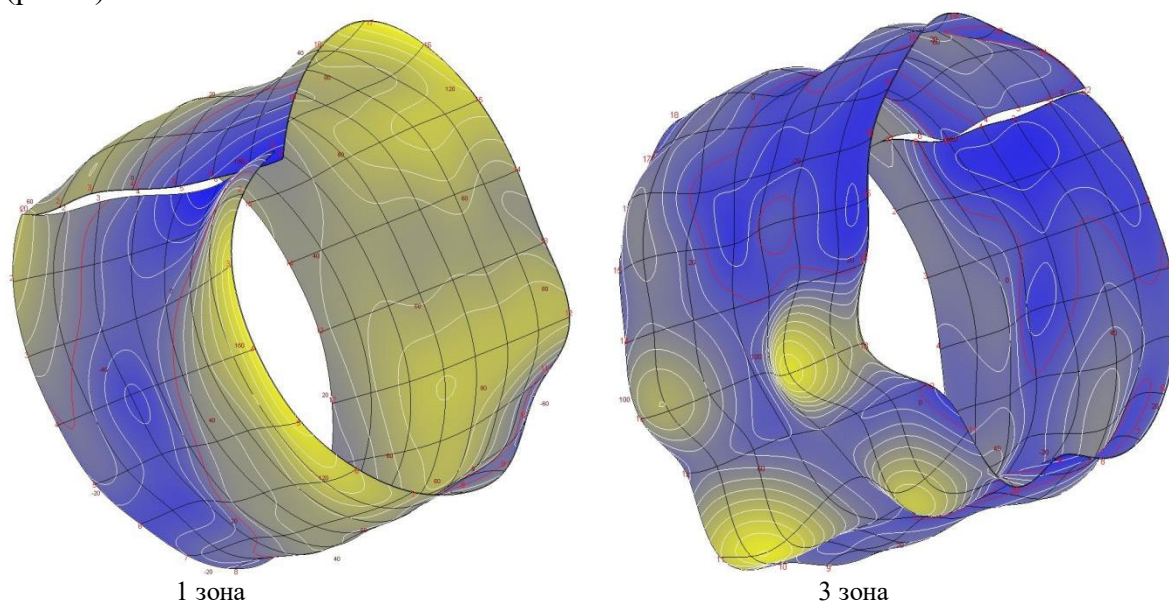


Рисунок 6 – 3D картограммы различных зон [3D cartograms of various zones]

## Выводы

1. Показано, что диагностирование участков трубопроводов, подверженным ЭКИ, методом магнитной анизотропии является дополнительной контрольной операцией, повышающей достоверность оценки эксплуатационной надежности трубопроводов АЭС [9].

2. Проведенное обследование позволило зафиксировать локальные повышенные напряженные зоны на ряде участках трубопроводов ТО, которые образуются при утонении стенки, вызванном вероятным ЭКИ.

3. Сформированная база данных значений параметров НДС позволит в дальнейшем разработать численные критерии повреждаемости трубопроводов по механизму ЭКИ.

4. Дальнейшие исследования данных и аналогичных участков трубопроводов ТО энергоблоков АЭС обеспечит уточнение критериев [10] повреждаемости и, как следствие, достоверность подтверждения эксплуатационной надежности трубопроводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». – Москва : ВНИИАЭС, 2015. – 210 с.
2. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (с изменениями от 10.07.87). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037730> (дата обращения: 12.10.2018)
3. ПНАЭ Г-10-012-89 Нормы расчета на прочность стальных защитных оболочек атомных станций. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200059848> (дата обращения: 12.10.2018)
4. Расчет технологического трубопровода. Интернет-ресурс – URL: <https://proektanti.ru/user/work/34973> (дата обращения: 12.10.2018).
5. Сканер механических напряжений «STRESSVISION». Expert версия 2.013. Паспорт ФЛ 413.175.001 ПС. ТУ 4276-007-82237826-13. – URL: <https://subscribe.ru/archive/tech.tdndt/201406/16144652.html> (дата обращения: 12.10.2018).
6. Wilson J., Liu J., Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. – ECNDT 2014. October 6-10. 2014. Prague. Czech Republic.
7. Гурин, С.А. Сканеры-дефектоскопы серии «Комплекс-2»: новые модели [Текст] / С.А. Гурин, В.С. Жуков, С.В. Жуков, Н.Н. Копица // В мире НК. – 2004. – № 2 (24). – С. 31-33.
8. Барковский, С.С. Многомерный анализ данных методами прикладной статистики [Текст] / С.С. Барковский [и др.]. – Казань : Изд. КГТУ, 2010. – 126 с.
9. Lin J.M., Lin J.C., Sha H. A new nondestructive testing technigue based on magnetic memory effect. – Chinese J. NDT. 2000. Vol. 22. No. 7. P. 297-299.
10. Жуков, С.В. К вопросу о необходимости измерения напряжений [Текст] / С.В. Жуков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль – URL: <http://www.td.ru/content/view/68/20/>. -2007 (дата обращения: 12.10.2018).

## REFERENCES

- [1] RD EO 1.1.2.11.0571.2015 Normy dopuskaemyh tolshchin stenok ehlementov truboprovodov iz ughlerodistykh stalej pri ehrozionno-korrozionnom iznose [1 RD EO 1.1.2.11.0571-2015 "Standarts of Allowable Wall Thicknesses of Carbon Steel Pipeline Elements during Erosion and Corrosion Wear"]. Moskva [Moscow], VNIAS. 2015. P. 210 (in Russian).
- [2] PNAE G-7-002-86 Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskix ustanovok (s izmeneniyami ot 10.07.87) [PNAE G-7-002-86 Standards for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (as amended July 10, 1987).] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037730> (in Russian).
- [3] PNAE G-10-012-89 Normy rascheta na prochnost stalnykh zashhitnykh obolochek atomnykh stancij [PNAE G-10-012-89 Standards for Strength Calculation of Steel Protective Shells of Nuclear Power Plants.]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200059848> (in Russian).

- [4] Raschet texnologicheskogo truboprovoda. Internet-resurs [Calculation of the Technological Pipeline. Internet Resource]. – URL: <https://proektanti.ru/user/work/34973> (in Russian).
- [5] Skaner mexanicheskix napryazhenij «STRESSVISION» Expert versiya 2.013 Passport FL 413.175.001 PS, TU 4276-007-82237826-13 [STRESSVISION Mechanical Stress Scanner Expert version 2.013. Passport FL413.175.001 PS, TU 4276-007-82237826-13]. URL: <https://subscribe.ru/archive/tech.tdndt/201406/16144652.html> (in Russian).
- [6] Wilson J., Liu J., Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. ECNDT 2014. October 6-10. 2014. Prague. Czech Republic.
- [7] Gurin S.A., Zhukov V.S., Zhukov S.V., Kopicza N.N. Skanery-defektoskopy serii «Kompleks-2»: novye modeli [Flaw Detector Scanners of the “Complex-2” Series: New Models]. V mire NK [In the World of NK]. – 2004. – № 2(24). – P. 31-33 (in Russian).
- [8] Barkovskij S.S. [i dr.]. Mnogomernyj analiz dannyx metodami prikladnoj statistiki [Multivariate Data Analysis Methods of Applied Statistics]. Kazan: Izd. KGTU [Kazan: KSTU Publishing House]. – 2010. – 126 p. (in Russian).
- [9] Lin J.M., Lin J.C., Sha H. A new non-destructive testing technique based on magnetic memory effect. Chinese J. NDT. 2000. Vol. 22. No. 7. P. 297-299.
- [10] Zhukov S.V. K voprosu o neobxodimosti izmereniya napryazhenij [On the Need for Measuring Stresses]. Texnicheskaya diagnostika i nerazrushayushhij control [Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing]. – URL: <http://www.td.ru/content/view/68/20/.-2007> (in Russian).

### Assessment of Erosion and Corrosion Deterioration Development Using Magnetic Anisotropy Measurement Method

A.K. Adamenkov<sup>1</sup>, I.N. Veselova<sup>2</sup>, V.Y. Shpitser<sup>3</sup>

*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

<sup>3</sup> ORCID iD: 0000-0002-5051-5091

e-mail: shpitser@mail.ru

**Abstract** – This article presents information on assessment of erosion and corrosion deterioration development of pipeline components using the magnetic anisotropy measurement method. The purpose of the research is fixing of locally stressed areas which are typical for local wall thinning in zones with probable erosion and corrosion deterioration and determination of magnetic anisotropy parameters as well as formation of measurement results database.

**Keywords:** pipelines, thickness, erosion and corrosion deterioration, magnetic anisotropy.