

# Применение вихретоковой дефектоскопии и магнитной структуроскопии при комплексном контроле магистральных трубопроводов

**А.Г. Ефимов**

д.т.н., заведующий НИО-12<sup>1</sup>  
efimov@nio12.ru

**А.Е. Шубочкин**

д.т.н., заведующий сектором НИО-12<sup>1</sup>  
aeshubochkin@mail.ru

<sup>1</sup>ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия

**Одним из самых распространенных дефектов магистральных трубопроводов является стресс-коррозионное растрескивание. Применяемые сегодня методы и расчеты оценки остаточного ресурса ремонтных труб не учитывают изменение свойств металла в областях, подверженных данному типу дефектов. В статье рассмотрена проблема определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов при проведении ремонтов участков, подверженных стресс-коррозионному растрескиванию. Предложена методика комплексного контроля, использующая магнитный и вихретоковый методы неразрушающего контроля, с целью повышения точности оценки срока безаварийной эксплуатации трубопровода.**

## Материалы и методы

Трубы магистральных нефте- и газопроводов исследовались вихретоковым и магнитным методами.

## Ключевые слова

неразрушающий контроль, магнитный контроль, вихретоковый контроль, коэрцитивная сила, остаточный ресурс

Безаварийная эксплуатация технически опасных объектов невозможна без использования методов неразрушающего контроля (НК). Диагностика на всех этапах эксплуатации изделий металлопроката позволяет не только определить их текущее состояние и уровень износа, но и оценить возможность и сроки дальнейшей эксплуатации.

Трубная промышленность проводит НК практически всей своей продукции [1, 2, 3]. В ходе эксплуатации магистрального трубопровода нет возможности производить периодический контроль всего объема, и выполняется лишь выборочный контроль. Согласно действующим на сегодняшний день нормативным документам по проведению диагностики состояния металлоконструкций и изделий металлопроката, магнитные и вихретоковые методы НК состояния металла применяются повсеместно в различных отраслях промышленности. Объем контроля, выполняемого данными методами, значительно отличается для различных изделий и объектов. Так, согласно отраслевому стандарту [4] при контроле магистральных нефтегазопромысловых трубопроводов, вихретоковый контроль выполняют в объеме не менее 3% поверхности труб для выявления стресс-коррозионных дефектов глубиной менее 10% от толщины стенки труб, а также определения геометрических размеров стресс-коррозионных дефектов, в том числе выявленных сканером-дефектоскопом. Магнитопорошковая дефектоскопия применяется к 10% выявленных дефектов. В других случаях производится 100% контроль изделий магнитными и вихретоковыми методами НК. Например, при проведении ремонтных работ, контроле ответственных балок металлоконструкций и узлов подъемных механизмов. Самые ответственные изделия контролируются многократно на протяжении всего срока службы.

Естественно, что такой разброс в подходах диагностирования изделий металлопроката не случаен. Существуют многочисленные СНиП, РД, ОСТ и методические указания по проведению диагностики металлоконструкций.

## Существующая практика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов по запасу толщины

Хорошо известно, что результат определения остаточного ресурса металлоконструкций оказывается наиболее близким к действительному значению при периодической диагностике на протяжении всего срока эксплуатации технически опасного объекта. Периодический контроль существующей трубопроводной системы эксплуатирующими

организациями не проводится из-за большого объема сопутствующих диагностике операций и труднодоступности многих участков. Кроме того, по регламенту разрешено проводить диагностику при остановке работы трубопровода, либо значительного снижения рабочего давления в нем.

На практике же во второй раз, после ввода в эксплуатацию, труба контролируется, когда расчетный срок ее службы приближается к завершению, и остро встают вопросы принятия решения о возможности ее дальнейшего использования и определения срока остаточного ресурса. На этом этапе качество поверхности, наличие остатков защитных покрытий и грунтовых наслоений делает использование вихретокового, магнитного и ЭМА методов НК более предпочтительными, по сравнению с ультразвуковым контролем для проведения. Для поиска поверхностных дефектов применяется вихретоковый контроль (ВК). С помощью ручных и автоматизированных вихретоковых дефектоскопов выявляются трещиноподобные и стресс-коррозионные дефекты, питтинговая коррозия. ЭМА-толщинометры позволяют выявить эрозионное утонение стенки, общую коррозию и расслоения [7]. Преимущество использования бесконтактных средств НК [5, 6] заключается в отсутствии необходимости очистки контролируемой поверхности объекта контроля от загрязнений и изоляционных покрытий.

Вихретоковые и магнитные методы контроля позволяют выявлять разнообразные эксплуатационные дефекты металлопроката и сварных соединений. Хорошо детектируются трещиноподобные дефекты (закаты, стресс-коррозия, усталостные трещины, холодные трещины сварных соединений, свищи, питтинговая коррозия и др.). Вихретоковые дефектоскопы позволяют выявлять дефекты на поверхности с большой шероховатостью, через диэлектрический зазор. Применяются не только для детектирования трещин, но и для оценки их габаритных размеров.

С точки зрения своих характеристик наибольший интерес представляет собой многоканальный дефектоскоп ВД-91НМ (рис. 1). Используемые в нем программные и аппаратные решения позволяют в широчайших пределах отстроиться от такого основного мешающего параметра как рабочий зазор преобразователя. На сегодняшний день ВД-91НМ — единственная вихретоковая система в мире, позволяющая работать с переменным зазором до 10 мм без потери чувствительности к трещиноподобным дефектам. При этом глубина порогового дефекта не превышает 0,3 мм. Указанные характеристики позволяют проводить контроль труб, в

том числе и в зоне сварного шва, предназначенных для морских подводных переходов, где толщина изоляции достигает 8 мм.

Наиболее распространенными среди эксплуатационных дефектов являются коррозионные повреждения, подразделяющиеся на сплошную, точечную и язвенную коррозии, причем глубина повреждения варьируется от долей мм до сквозных отверстий и трещины.

Усталостные трещины и стресс-коррозионное растрескивание обычно характеризуются площадью области образования и глубиной. Данный тип несплошностей обнаруживается на поверхности изделий металлопроката, чаще всего в зонах концентрации напряжений на краях вмятин и выпучин, околосварной зоне и зоне сварного шва, местах с поврежденным изоляционным покрытием. Трещины хорошо выявляются вихрековым методом НК, даже при сильно корродированной поверхности ОК. Следует подчеркнуть, что трещины являются самым опасным дефектом. Наличие трещин любых размеров и направлений в металлоконструкциях не допускается, либо регламентируется. В отношении труб с выявленными дефектами выносятся решения об их ремонте либо браковке (полной или частичной). На ремонтпригодных трубах выявленные дефекты должны быть удалены абразивной зачисткой с контролем остаточной толщины стенки трубы.

Дальнейший расчет остаточного ресурса трубы предполагается проводить оценку запаса толщины стенки. В расчете используются значения минимальной остаточной толщины трубы с учетом общего коррозионно-эрозионного износа и ремонта дефектных участков.

Гамма-процентный ресурс рассчитывается с вероятностью 90–95%

#### Применение метода коэрцитивной силы для определения срока безаварийной эксплуатации трубопровода

Магнитный метод НК используется для контроля изделий из металлопроката. Одним из направлений его применения является определение механических свойств ферромагнитных материалов. Известно, что

магнитные и физико-механические свойства металлов зависят от одних и тех же факторов. Среди них не только химический состав и режимы термической обработки материала, но и накапливаемые повреждения микро- и макроструктуры, такие как пластические деформации, микро- и макро дислокации, усталостные повреждения и пр. В ходе эксплуатации в металле происходят структурные изменения, связанные с условиями и режимами работы. Микро- и макродефекты структуры, накопленные в процессе эксплуатации, хранят информацию, связанную с максимальными величинами нагрузок, действовавшими на ОК. Магнитные параметры, однозначно связанные с количественными нарушениями структуры металла, являются отображением режима работы конструкции.

Одним из параметров, применяемых в магнитном методе НК, является коэрцитивная сила  $H_c$ . Данная магнитная величина однозначно связана с остаточной пластической деформацией  $\varepsilon_{np}$  при различных

видах нагружения металлоконструкции в ходе их эксплуатации. Обе величины возрастают при циклическом нагружении ОК.  $H_c$  — напряженность магнитного поля, необходимая для размагничивания ферромагнетика предварительно намагниченного до насыщения.

Большинство марок сталей, применяемых для производства труб, относятся к классу разупрочняемых сталей. Коэффициент упрочнения для них составляет  $n \leq 0,1$ , а коэрцитивная сила в состоянии поставки относительно невелика —  $H_c = 1...10$  А/см. Для металлопроката из таких сталей существует корреляция физико-механических и магнитных свойств с коэффициентом корреляции не менее 0,9. [8]

Проведенные исследования с одновременным использованием магнитного структуроскопа МС-10 и вихрекового дефектоскопа ВД-90НП [9] показывают, что величина коэрцитивной силы в области, подверженной стресс-коррозионному растрескиванию, увеличивается (рис. 2).



Рис. 1 — Система автоматизированного вихрекового контроля труб большого диаметра ВД-91НМ

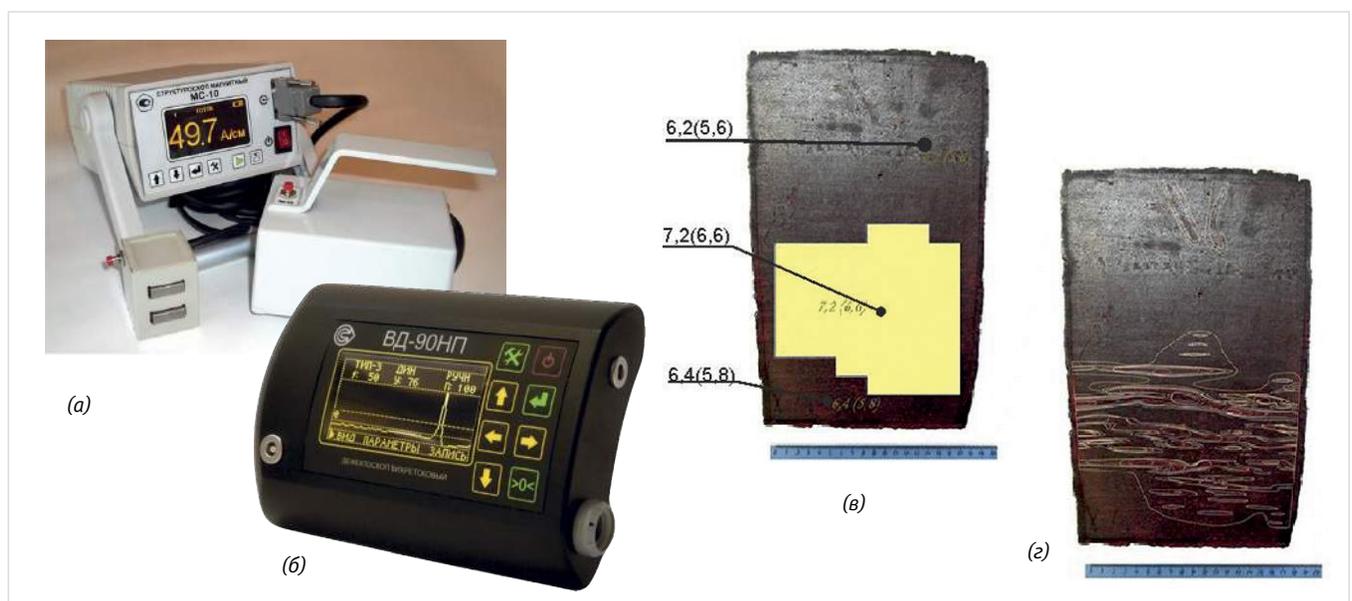


Рис. 2 — Магнитный структуроскоп МС-10 (а), вихрековый дефектоскоп ВД-90НП и результаты магнитного (в) и вихрекового (г) контроля спроецированные на ОК из стали марки 09Г2С

Был использован магнитный структуро-скоп МС-10, так как он имеет наибольшую глубину промагничивания, диапазон и точность измерения среди всех выпускаемых в мире мобильных магнитных коэрцитивметров, а также позволяет проводить измерения при значительных отрицательных температурах.

Повторные замеры, сделанные после проведенного ремонта, однозначно показывают, что данные области имеют аномально высокие значения коэрцитивной силы в сравнении с металлом остального тела трубы. Известно, что коэрцитивная сила металла увеличивается со временем. Также известна корреляционная зависимость между механическими свойствами стали и коэрцитивной силы.

Трубопровод эксплуатируется в режиме малоциклического нагружения. Для такого режима эксплуатации металла нехарактерны резкие скачки коэрцитивной силы. Значит, кривая изменения коэрцитивной силы, с учетом условий нагружения от времени, будет верна для всего металла трубы (кривая 17Г1С режим Q1 на рис. 3). По этой кривой видно, что точка, соответствующая текущему значению коэрцитивной силы в области, подверженной стресс-коррозии, предполагает меньшее остаточное время безаварийной эксплуатации по сравнению с основным материалом тела трубы. Именно это смещение необходимо учитывать при конечном расчете остаточного ресурса.

Из корреляционной зависимости  $\varepsilon(H_c)$  и зависимости

$$\varepsilon_{пл} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — амплитуда нагружения,  $E$  — модуль упругости,  $K$  — коэффициент напряжения, определяется новая величина амплитуды нагружения, чем вносится поправка в расчет оценки малоцикловой долговечности по критерию зарождения трещины из уравнения Менсона-Коффина для определения нового числа циклов нагружения до зарождения трещины [3].

$$e_a = 0,25 \ln \frac{1}{1-\psi_B} N_3^{-N_2} + \frac{\sigma_1}{E}, \quad (2)$$

где  $e_a$  — амплитуда истинных деформаций в вершине дефекта;  $\sigma_1$  — предел усталости металла при симметричном нагружении;  $E$  — модуль упругости;  $\psi_B$  — известная величина относительного равномерного сужения;  $N_2$  — показатель мягкого циклического нагружения, определяется по приближенной формуле:

$$N_2 = 1,2 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} - 0,35.$$

Число циклов зарождения трещин  $N_3$  для случая несимметричного нагружения ОК, характерного для трубопроводов под давлением, определяется, исходя из следующих заключений. Циклы нагрузки характеризуются амплитудой деформаций в вершине дефекта  $e_a$  и средней деформацией  $e_{cp}$ . Каждый из этих параметров обратно пропорционален значению  $N_3$ . Чтобы сохранить постоянным количество циклов  $N_3$  при увеличении параметра  $e_{cp}$ , надо эквивалентно снизить амплитуду деформаций  $e_a$ . При условии  $N_3 = const$  можно построить зависимость типа  $e_{cp} = f(e_a)$ . Такие зависимости монотонно убывающие, и при расчетах они заменяются линейными.

Погрешность этого приближения увеличивает запас долговечности ОК. Учитывая вышеизложенное,  $N_3$  рассчитывается для заданного несимметричного малоциклического нагружения замещением на приближенное эквивалентное симметричное нагружение. У такого эквивалентного нагружения число циклов  $N_{cp}$  будет одинаковым с рассчитываемым нагружением.

В общем случае

$$N_{рес} = N_T(\sigma_0) - N_d(H_c) \quad (3);$$

где  $N_T$  — число циклов, соответствующее пределу выносливости ОК, до его физического разрушения;

$N_d$  — фактическое число отработанных циклов на момент диагностики.

$N_T(\sigma_0)$  определяется по экспериментально полученным зависимостям, либо по справочным данным.

$N_d(H_c)$  определяется при проведении диагностики с учетом режима работы ОК.

Временной ресурс ОК определяется после определения  $N_{рес}$  по номограммам нагружения металла, позволяющим определить по корреляционным коэффициентам ресурс металлоконструкции в циклах, процентах или условных временных сменах в зависимости от режима эксплуатации металлоконструкции и максимального значения коэрцитивной силы  $H_c$ .

Вторая, менее значительная ошибка в расчете надежности по остаточной толщине заключается в том, что скорость утонения материала рассчитывается по линейному закону, а не возрастающему пропорционально росту коэрцитивной силы металла. При проведении дополнительного магнитного контроля по полученным значениям коэрцитивной силы можно провести оценку уровня максимальных нагрузок, приложенных к ОК в процессе эксплуатации, уровня остаточных напряжений и уровня упругопластических деформаций в металлоконструкциях.

Последние два параметра однозначно влияют на увеличение скорости коррозии металла. Следует отметить, что после проведения ремонта выполняется восстановление защитных покрытий трубопровода, что исключает дальнейшую коррозию и на последующее утонение толщины стенки влияет внутренняя эрозия.

### Итоги

Полученные результаты исследования однозначно говорят о необходимости учета магнитных характеристик металла после проведения ремонтных работ областей, подверженных стресс-коррозионному растрескиванию, в прочностных расчетах. Полученные результаты исследования однозначно говорят об изменении магнитных свойств металла в областях подверженных стресс-коррозионному растрескиванию. Данное изменение свойств сохраняется и после проведения ремонтных работ по удалению трещиноподобных дефектов с поверхности контролируемого объекта. Очевидно, что в использующихся на сегодняшний день прочностных расчетах необходимо внести изменения, учитывающие изменение магнитных свойств металла в ремонтных областях.

### Выводы

При проведении диагностики с целью оценки остаточного ресурса трубы необходимо применять комплексное обследование вихретоковым, магнитным и ЭМА методами неразрушающего контроля с целью уточнения результатов расчетов оценки остаточного ресурса контролируемого объекта. Ошибки измерения на каждом из этапов контроля вносят дополнительную погрешность в итоговую оценку. По требованиям отраслевого стандарта заключение должно содержать все результаты контроля и гамма-процентный ресурс с вероятностью 90–95%. А это

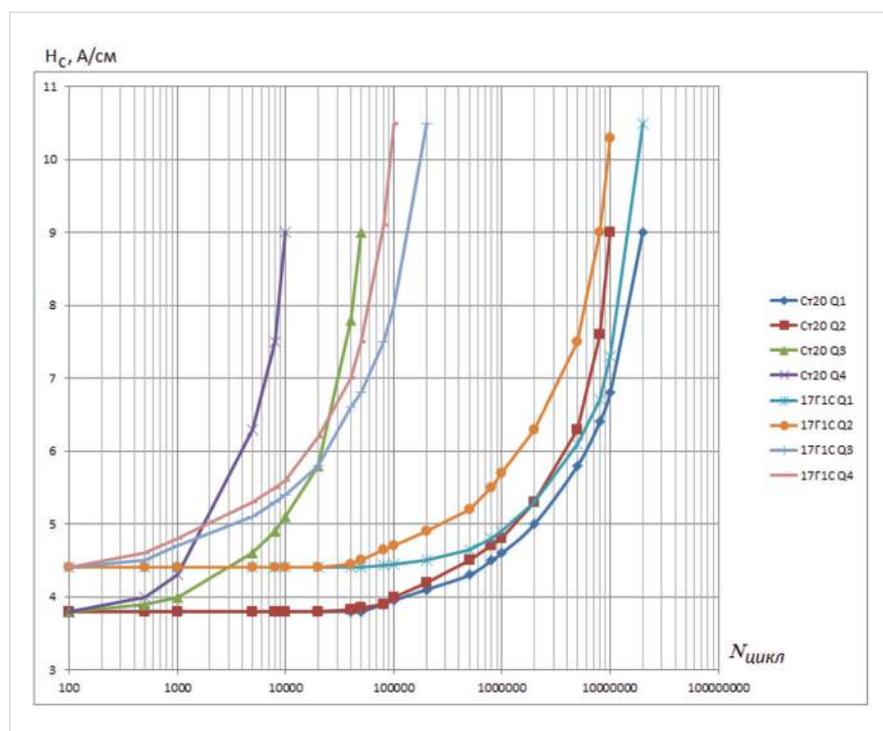


Рис. 3 — Усталостные зависимости стальных листов марок Ст20 и 17Г1С при различных условиях нагружения режим Q1 —  $\sigma = 150$  МПа; режим Q2 —  $\sigma = 200$  МПа; режим Q3 —  $\sigma = 250$  МПа, режим Q4 —  $\sigma = 300$  МПа

означает, что самые высокие требования, предъявляемые к средствам НК оправданы, а своевременное обновление парка приборов необходимо.

#### Список используемой литературы

1. ИСО 3183:2007 Нефтяная и газовая промышленность. Трубы стальные для трубопроводных транспортных систем.
2. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Спектр, 2014. 285 с.
3. Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 68–73.
4. ОСТ 153-39.4-010-2002 Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений.
5. Бакунов А.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Применение современных средств вихретоковой дефектоскопии для контроля различных промышленных объектов // Контроль. Диагностика. 2011. № 4. С. 13–16.
6. Коннов А.В. Автоматический электромагнитный (вихретоковый) сканер-дефектоскоп АСД «Вихрь» // Нефтегазовое дело. 2013. №5. Режим доступа: <http://ogbus.ru/article/avtomatizirovannyj-elektromagnitnyj-vixretkovyj-skanner-defektoskop-asd-vixr/>
7. Детков А.Ю., Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. Бесконтактный портативный электромагнитно-акустический толщиномер ЭМАТ-100. Трехмерное представление акустических полей однофазового излучателя // Дефектоскопия. 2005. № 6. С. 38–46.
8. Мужичкий В.Ф., Безлюдько Г.Я., Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении коэрцитивной силы // Контроль. Диагностика. 2003. № 6. С. 6–14.

ENGLISH

DIAGNOSTICS

## Application of eddy current and magnetic structuroscopy at complex control of pipelines

UDC 620.1

#### Author:

Alexey G. Efimov — Sc.D., head of 12th research department<sup>†</sup>; [efimov@nio12.ru](mailto:efimov@nio12.ru)

Andrey E. Shubochkin — Sc.D., head of subdivision of 12th research department<sup>†</sup>; [aeshubochkin@mail.ru](mailto:aeshubochkin@mail.ru)

<sup>†</sup>JSC RIL “Spectrum”, Moscow, Russian Federation

#### Abstract

A stress-corrosion cracking is one of the most common defects of transfer pipelines. The applied methods and calculations of residual life assessment of pipes repair do not include changes the properties of metal in areas prone to this type of defects. The article considers the problem of determining the residual life of oil and gas pipelines during repair areas prone to stress corrosion cracking. It was proposed the technique of integrated control, using magnetic and eddy current NDT methods, in order to increase the precision in estimating the period of trouble-free operation of the pipeline.

#### Materials and methods

Pipes of the main oil and gas pipelines were tested by eddy current and magnetic methods.

#### Results

Obtained results clearly indicate the need to consider the magnetic characteristics of the metal after the repair areas prone to stress corrosion cracking in the strength calculations.

#### Conclusions

During performing the diagnostics to assess the residual life of the pipe is necessary to apply a complex of the eddy current, magnetic and UAE NDT methods to clarify the

results of calculations of residual life assessment of the controlled object. Measurement errors at each stage of monitoring pay an additional error in the final assessment. According to the requirements of industry standard report should contain all the results of the control and gamma-percent life with a probability of 90–95%. This means that the highest requirements of NDT are reasonable and timely renewal of equipment needed.

#### Keywords

nondestructive testing, magnetic testing, eddy current testing, coercive force, residual life

#### References

1. ISO 3183:2007 Petroleum and natural gas industries. Steel pipes for pipeline transportation systems.
2. Shubochkin A.E. *Razvitiye i sovremennoe sostoyanie vixretkovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya* [Development and current state of an eddy current testing of nondestructive control]. Moscow: *Spectr*, 2014, 285 p.
3. Efimov A.G., Shubochkin A.E. *Sovremennye tendentsii razvitiya vixretkovoy defektoskopii i defektometrii* [Modern trends of eddy current flaw detection and defectometry]. *Testing. Diagnostic*, 2014, issue 3, pp. 68–73.
4. OST 153-39.4-010-2002 Technique of definition the residual resource of oil and gas pipelines and pipelines of main constructions.
5. Bakunov A.S., Efimov A.G., Shubochkin A.E. *Primenenie sovremennykh sredstv vixretkovoy defektoskopii dlya kontrolya razlichnykh promyshlennykh ob"ektov* [Application of modern eddy current means to control various industrial facilities]. *Testing. Diagnostic*, 2011, issue 4, pp. 13–16.
6. Konnov A.V. *Avtomaticheskij elektromagnitnyy (vixretkovyy) skaner-defektoskop ASD «Vikhr»* [Automated electromagnetic (eddy current) scanner-detector ASD "Vikhr"]. *Oil and gas business*, 2013, issue 5. Access mode: <http://ogbus.ru/article/avtomatizirovannyj-elektromagnitnyj-vixretkovyj-skanner-defektoskop-asd-vixr/>
7. Detkov A.Yu., Muzhitskiy V.F., Remezov V.B. *Beskontaktnyy portativnyy elektromagnitno-akusticheskij tolshchinomer ЭМАТ-100. Trekhmernoe predstavlenie akusticheskikh poley odnofazovogo izluchatelya* [Contactless portable electro-magneto-acoustic thickness measurer ЭМАТ-100. Three-dimensional interpretation of acoustic fields of one-phase radiator]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, issue 6, pp. 38–46.
8. Muzhitskiy V.F., Bezlyud'ko G.Ya., *Seriya portativnykh priborov-structuroskopov, osnovannykh na izmerenii koertsetivnoy sily* [A series portable device-structurescopes, based on measurement of coercive field strength]. *Testing. Diagnostic*, 2003, issue 6, pp. 6–14.