

# Вихретоковый контроль резьбы бурового оборудования

**М.Ю. Коротеев ( Санкт-Петербург, Россия )**  
 km@constanta.ru

ведущий специалист,  
 генеральный директор ЗАО «КОНСТАНТА»

**П.В. Соломенчук**

ведущий специалист, аспирант

**В статье описаны трещины, возникающие в замковой резьбе элементов бурильных колонн, проведен обзор видов неразрушающего контроля резьбы. Проведен сравнительный анализ различных типов вихретоковых преобразователей, методов вихретокового контроля резьбы, а так же способов отображения результатов контроля. Описан способ контроля замковой резьбы с применением вихретоковых преобразователей тангенциального типа.**

**Материалы и методы**

Обнаружение и измерение размеров дефектов в замковой резьбе элементов бурильных колонн вихретоковым фазовым методом с применением тангенциальных преобразователей.

**Ключевые слова**

контроль резьбы, вихретоковый, трещины в резьбе, неразрушающий контроль

Eddy current drilling equipment thread inspection

**Authors**

Mikhail Ju. Koroteev  
 ( Saint Petersburg, Russia )

lead specialist, director

Pavel V. Solomenchuk

lead specialist, postgraduate student

**Abstract**

The cracks in tool-joint thread for drill string elements are described in the article, a types for nondestructive thread inspection is overviewed. Eddy current probe types, eddy current thread inspection methods and display the test results way are compared. The method of nondestructive tool-joint thread for drill string elements inspection with application of tangential eddy current probe is described in the article.

Резьбовое соединение является наиболее нагруженным элементом в бурильной колонне. Особенности конструкции замковой резьбы учитывают большие статические и динамические нагрузки, возникающие при её эксплуатации, при этом переменный по высоте профиль резьбы создает естественные концентраторы механических напряжений и очаги возникновения усталостных трещин, рисунок 1.

Возникающие при эксплуатации напряжения принимают максимальное значение в последних трех витках резьбы возле сбега [1]. Данные, полученные моделированием [2], подтверждают статистику отказов и выхода из строя труб вследствие возникновения и развития трещин в резьбе [3].

На рисунке 2 представлена фотография отрезка ниппельного конца трубы, бывшей в употреблении.

Невооруженным взглядом можно обнаружить протяженную трещину в 13–14 витках. На рисунке 3 представлена фотография этой трещины крупным планом.

Обнаруженная трещина имеет большое раскрытие и хорошо видна, однако это не единственный дефект, образовавшийся в резьбе во время эксплуатации трубы.

На рисунке 4 представлены фотографии дефектов, обнаружение которых визуальными методами практически невозможно.

Показанные дефекты, в частности трещины, расположенные в витке 16, могут увеличиваться в размере и привести к обрыву резьбы.

Существует множество средств, реализующих различные виды неразрушающего контроля, каждое из них имеет свои особенности. Широко распространенные методы ультразвукового и магнитного неразрушающего контроля (НК) не обеспечивают требуемую достоверность контроля резьбы, так как переменный по высоте профиль резьбы

оказывает маскирующее воздействие на ультразвуковые и магнитные средства НК.

Чувствительность ультразвуковых методов контроля не позволяет обнаруживать мелкие трещины во впадине резьбы (обеспечено выявление трещин, глубиной от 3 мм, а для труб УБТ – от 5 мм [4], [5]), затруднен контроль резьбы тонкостенных труб. Недостатками магнитных методов являются субъективность оценки результатов контроля, невозможность измерения глубины трещин, затруднения контроля внутренней резьбы и отсутствие методической возможности контроля резьбы изделий, изготовленных из неферромагнитных металлов и сплавов. Также следует указать на необходимость применения при ультразвуковом или магнитном контроле расходных материалов, таких как контактная жидкость и ферромагнитный порошок или суспензия.

Вихретоковые средства НК во многом лишены указанных недостатков. На результаты контроля резьбы не влияет толщина стенки трубы, возможен контроль изделий изготовленных как из ферромагнитных, так и неферромагнитных материалов. Возможно измерение глубины и протяженности трещины. Нет принципиальной необходимости в применении расходных материалов.

Вихретоковый вид НК, основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля (ОК). При проведении контроля на сигналы ВТП влияют как контролируемые параметры – глубина  $Z$  трещины во впадине резьбы, так и мешающие параметры – зазор  $h$  между ВТП и ОК, разброс электромагнитных свойств материала, высота профиля резьбы  $h_s$ , переменная на участке захода и сбега резьбы.

Повсеместному внедрению вихретоковых средств НК для контроля замковой

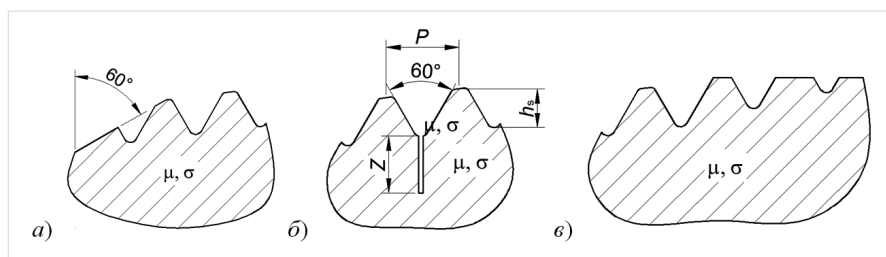


Рис. 1 — Резьба с моделью дефекта (трещины).  $P$  – шаг резьбы,  $h_s$  – высота профиля,  $r$  – радиус скругления впадины,  $Z$  – глубина трещины во впадине резьбы. Профиль резьбы на участке захода (а); в средней части резьбы (б); на участке сбега (в)



Рис. 2 — Фотография трубы с резьбой  $\varnothing 88 \times 123$ , бывшей в употреблении

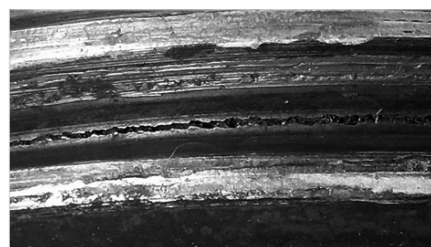


Рис. 3 — Визуально обнаруженная трещина в витке 13–14 крупным планом

резьбы препятствовало сильное влияние мешающих параметров на сигналы традиционно применяемых ВТП с круговыми катушками. Применяемые ныне тангенциальные ВТП с обмотками, повторяющими форму впадины резьбы, испытывают существенно меньшее воздействие мешающих параметров на результаты контроля. На рисунке 5 изображены модели картины распределения плотности вихревых токов ВТП с круговыми обмотками, (а) и тангенциального ВТП с обмотками, повторяющими форму впадины резьбы, (б).

Распределение плотности вихревых токов определяет чувствительность ВТП к свойствам ОК в объеме протекания вихревых токов [6]. Изменение свойств ОК в зоне максимальной плотности вихревых токов обуславливает максимальную чувствительность ВТП к этим изменениям. ВТП, изображенный на рисунке 5, (а) будет максимально чувствителен к параметрам вершины резьбы (высоте и форме профиля резьбы) и минимально чувствителен к трещинам во впадине резьбы. ВТП, изображенный на рисунке 5, (б) – максимально чувствителен к параметрам впадины резьбы, параметры вершин резьбы, высота и форма профиля резьбы, на его сигналы оказывает существенно меньшее воздействие. Этот фактор является особенно актуальным при контроле конической резьбы, так как именно на участке сбеге, в зоне, где наблюдается изменение высоты и формы

профиля резьбы, чаще всего возникают устойчивые трещины.

Сравнить свойства ВТП и степень влияния на их сигналы контролируемых и мешающих параметров возможно анализируя годографы относительного вносимого напряжения:

$$\dot{U}_{\text{ВН}}^* = \dot{U}_{\text{ВН}} / |\dot{U}_{\text{ВН(Н.У.)}}|,$$

где  $\dot{U}_{\text{ВН(Н.У.)}}$  – вносимое напряжение при заданных нормальных условиях контролируемого и мешающих параметров:  $Z = 0$ ;  $h = 0,2$  мм;  $h_s = h_{\text{норм}}$ ;  $\mu = \mu_{\text{норм}}$ .

На рисунке 6, (а) представлены годографы зависимости  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$  от контролируемого и мешающих параметров для ВТП с круговыми обмотками, на рисунке 6, (б) – для тангенциального ВТП с обмотками, повторяющими форму впадины резьбы.

Анализируя годографы, представленные на рисунке 6, становится очевидно, что помимо большей абсолютной чувствительности тангенциального ВТП к  $Z$ , наблюдается меньшее влияние  $h_s$  и  $h$ . Наличие трещины и изменение её глубины оказывает преимущественное воздействие на фазу напряжения  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$ .

Среди способов отображения результатов вихретокового контроля наиболее распространенными являются двухпараметровое отображение напряжения  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$  на комплексной плоскости и однопараметровое

## Materials and methods

Detection and size measurement of the defects of the tool-joint thread for drill string elements by eddy current phase technique with application of tangential probe.

## Results

Eddy current defectoscope with application of tangential probe is developed. Probes are highly sensitive to thread root cracks, and small stray parameter influence. The application of the phase test results display is reasonable.

## Conclusions

Defectoscope implementation in the manufacture of equipment for the oil industry companies improved the reliability of products by preventing release of products with manufacturing defects.

Defectoscope implementation in the operating and service companies reduced the cost of repair of drill pipes and increase the probability of failure of oil well equipment. Non-destructive testing procedures for the non-ferromagnetic stainless steel and aluminum alloys pipe thread is ensured.

## Keywords

thread inspection, eddy current, crack in the thread, non-destructive testing

## References

1. Subbotin S.S., Sokolova N.G., Bruhanov O.F., Mihailenko V.I. Defectoscopy of oil equipment. Moscow: Nedra, 1975. 264 p.
2. Jazikov V.A. Threaded connection stress-strain state finite element analysis. Bulletin of PNU. 2007. № 1 (4), Technical science, p. 111-118
3. Semin V.I. Modern gasoil pipes tread connection design for well building. // Science doctor's degree dissertation. 25.00.15, 05.02.13, Moscow, 2005.
4. RD 39-2-787-82 Drilling pipes defectoscopy methodic. Approved by oil ministry 28.09.1982, commissioning from 01.11.1982. - Kuibishev.: n/a, 1983, 19 p.
5. РД 39-12-1150-84 Swivel nondestructive testing technique. Approved by oil ministry 22.08.1984, commissioning from 01.10.1984. - Kuibishev.: n/a, 1984, 24 p.
6. Koroteev M.Ju., Solomenchuk P.V. Eddy current gasoil branch equipment thread testing. Exposition. Oil. Gas. №4 / 2011, p. 4-8.
7. Syasko V.A., Solomenchuk P.V., Koroteev M.Ju. Eddy current nondestructive tubing pipes thread inspection. Control. Diagnostic, № 10 / 2012.
8. Nondestructive testing. Handbook, Volume 2 / 8, edited by Kljuev V.V. Moscow, «Mashinostroenie», 2006, 687 p.
9. GOST R 50864-96 Tool-joint tapered thread for drill string elements. Profile, dimensions, technical requirements. Commissioning 1997-01-01. - Moscow: Russian State Standard: Standards publisher, 1996, 35 p.
10. Potapov A.I., Solomenchuk P.V., Syasko V.A. Ensure the reliability of eddy current nondestructive thread testing with tangential probe using. University news. Engineering. № 9 / 2012 Moscow state technical university N. E. Bauman. p. 58-64.
11. Eddy current defectoscopes «Constanta VD1». Measurement type description. Annex to the measurement type description Certificate № 39937. St/ Petersburg, VNIIM, 2010.

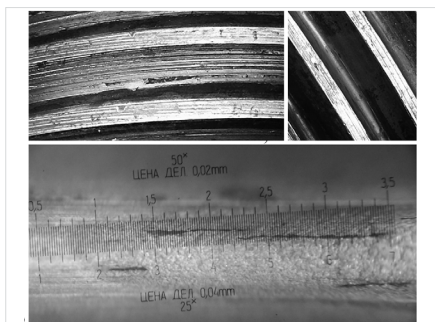


Рис. 4 – Фотографии дефектов, выявляемых средством неразрушающего контроля (а) – прихват в витке 11-12, (б) – группа трещин в витке 16; (в) – группа трещин в витке 16, вид через микроскоп МПБ-3, 50-кратное увеличение

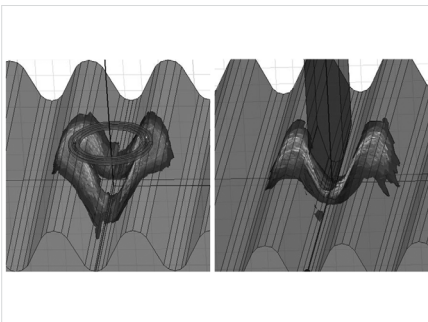
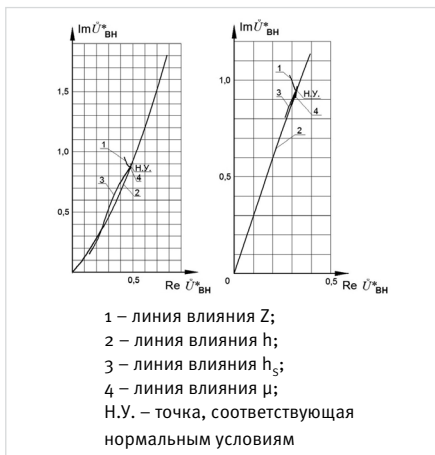
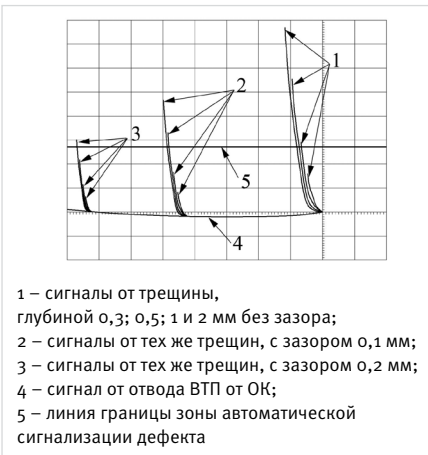


Рис. 5 – Модель картины распределения плотности вихревых токов. (а) – для ВТП с круговыми обмотками; (б) – для тангенциального ВТП с обмотками, повторяющими форму впадины резьбы



1 – линия влияния  $Z$ ;  
2 – линия влияния  $h$ ;  
3 – линия влияния  $h_s$ ;  
4 – линия влияния  $\mu$ ;  
Н.У. – точка, соответствующая нормальным условиям

Рис. 6 – Годографы зависимости  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$  от контролируемого и мешающих параметров, (а) – для ВТП с круговыми обмотками, (б) – для тангенциального ВТП с обмотками, повторяющими форму впадины резьбы



1 – сигналы от трещины, глубиной 0,3; 0,5; 1 и 2 мм без зазора;  
2 – сигналы от тех же трещин, с зазором 0,1 мм;  
3 – сигналы от тех же трещин, с зазором 0,2 мм;  
4 – сигнал от отвода ВТП от ОК;  
5 – линия границы зоны автоматической сигнализации дефекта

Рис. 7 – Изображение дисплея дефектоскопа с комплексной плоскостью

отображение фазы напряжения  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$  (или пропорционального ей параметра). Оба способа имеют свои преимущества и недостатки.

Преимуществом отображения напряжения  $\dot{U}_{\text{ВН}}^*$  на комплексной плоскости является полнота отображения картины результатов контроля, анализируя линии на комплексной плоскости, возможно отделение воздействия контролируемых параметров от мешающих. Обратной стороной этого является перегруженность изображения неинформативными сигналами. Недостатками комплексной плоскости являются затруднение обнаружения мелких дефектов на фоне действия мешающих параметров, значительное снижение чувствительности с увеличением зазора между ВТП и ОК, обусловленного загрязнением поверхности ОК, высокие требования к квалификации оператора.

Недостатком однопараметровой фазовой индикации является относительно низкая информативность. Преимуществами являются простота интерпретации результатов контроля, пренебрежимо малое влияние зазора на чувствительность дефектоскопа и отсутствие ложных показаний при изменении зазора.

При проведении контроля в производственных условиях на поверхности резьбы всегда присутствуют загрязнения, обуславливающие возникновение зазора между ВТП и ОК. На рисунке 7 изображен результат сканирования резьбы трубы через зазор, различной толщины, на дисплее дефектоскопа с комплексной плоскостью.

Как видно из рисунка 7, при увеличении зазора все сигналы смещаются в край дисплея, а их размеры уменьшаются пропорционально увеличению зазора. Таким образом, при настройке пороговой сигнализации на срабатывание на трещине, глубиной 0,5 мм, при увеличении зазора уже

до 0,1 мм сигнализация срабатывать не будет, возникнет пропуск дефекта.

При изменении зазора изменяется амплитуда сигнала, однако фаза сигнала практически не изменяется, что является неоспоримым преимуществом фазовой индикации. На рисунке 8 приведен график зависимости фазы сигнала от изменения зазора между ВТП и ОК.

Как видно из рисунка 8, чувствительность дефектоскопа при увеличении зазора практически не изменяется, это говорит о том, что настройка пороговой сигнализации на контрольном образце сохранит свою актуальность даже при возникновении зазора между ВТП и ОК. По этой причине применение фазовой индикации, не смотря на её относительно низкую информативность, предпочтительно [7]. Описанная методика реализована в вихретоковом дефектоскопе «Константа ВД1» и преобразователях для контроля резьбы ПФ-Р2-0,5х3-Fe.

Для уменьшения влияния геометрических мешающих параметров, применяются приемы стабилизации условий контроля, заключающиеся в применении удерживающего приспособления – каретки [8]. Применение каретки так же позволяет исключить контакт поверхности ВТП с ОК, что исключает износ и повреждение ВТП.

Каретка обеспечивает удержание ВТП над центром впадины резьбы за счет базирования своими колесами за боковые стороны резьбы в том же витке, где расположен ВТП. В качестве опорных поверхностей выбраны боковые стороны резьбы потому, что вершины резьбы могут иметь разную высоту на заходе и сбега, впадина резьбы может быть плотно забита грязью, песком, парафинами. Боковые стороны – единственные поверхности резьбы, остающиеся относительно чистыми и сохраняющие свою форму практически на

всем протяжении резьбы. Внешний вид каретки изображен на рисунке 9.

Каретка предназначена для контроля как метрической [6], так и замковой резьбы по [9] любого профиля, как наружной, ниппельной резьбы, так и внутренней – муфтовой резьбы.

Метрологическое обеспечение дефектоскопа представлено набором контрольных образцов, рисунок 10. Контрольные образцы представляют собой имитаторы резьбовой канавки, во впадине которой методом электроэрозии нанесены искусственные дефекты типа прорези. Прорези имитируют трещины глубиной 0,3 мм; 0,5 мм; 1,0 мм и 2,0 мм, что позволяет обеспечить контроль диапазона и погрешности измерения глубины трещин [10]. Круговая форма имитатора резьбовой канавки, вместо спиральной канавки резьбы, обеспечивает изготовление прорези и измерение её размеров с высокой точностью. Контрольные образцы выпускаются как имитирующие метрическую резьбу, так и замковую, различной формы профиля.

При сканировании резьбы отрезка трубы, показанного на рисунке 2, с применением дефектоскопа «Константа ВД1» были обнаружены все дефекты во впадине резьбы, их размеры были измерены. На рисунке 11 представлена дефектограмма сканирования указанной резьбы.

На дефектограмме, рисунок 11, отчетливо видны 3 группы дефектов:

- 1) Виток 11–12 – остаток прихвата, рисунок 4, (а) внешне напоминает прокатанную плену. Вероятно образовался при развинчивании «прихватившей» резьбы. Направление «языка» плены – в сторону развинчивания. Размеры дефекта: протяженность 7 мм, из них 3 мм закрыты «язычком», глубина эквивалентна трещине, глубиной превышающей 2 мм.
- 2) Виток 13–14 – трещина, рисунок 3. Размеры трещины: протяженность 130 мм, глубина колеблется от 0,5 до значения, превышающего 2 мм.
- 3) Виток 16 – группа из четырех трещин, рисунок 4, (б), (в). Размеры: общая протяженность трещин 2,5 мм, глубина колеблется от 0,5 до 0,8 мм.

Продемонстрированные результаты обосновывают применение дефектоскопа «Константа ВД1» с преобразователем ПФ-Р2-0,5х3-Fe для контроля замковой резьбы элементов буровых колонн. Испытания дефектоскопа и преобразователей производились в лабораторных условиях на контрольных образцах и реальных изделиях и в производственных условиях. Дефектоскоп внесен в Государственный реестр средств измерений [11], включен в ряд методик вихретокового контроля оборудования нефтегазовой промышленности и внедрен на ряде предприятий Пермского края.

## Итоги

Разработан вихретоковый дефектоскоп с преобразователем тангенциального типа, обладающим высокой чувствительностью к трещинам во впадине резьбы, и малым влиянием мешающих параметров. Обосновано применение фазовой индикации результатов контроля.

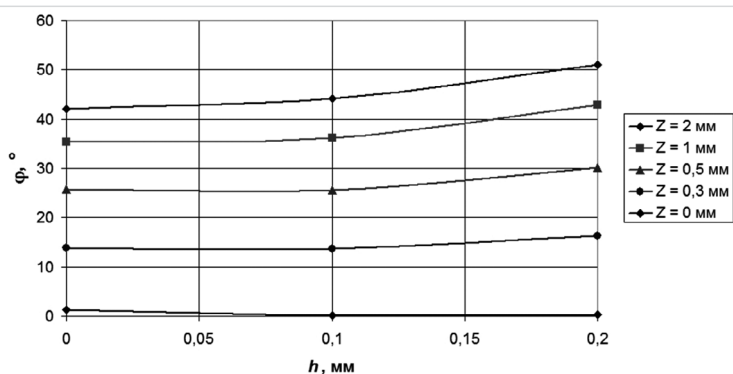


Рис. 8 – Зависимость фазы сигнала ВТП от зазора между ВТП и ОК при различной глубине трещины



Рис. 9 – Каретка с ВТП, установленная на отрезок ниппельного конца буровой трубы



Рис. 10 – Контрольные образцы дефектов резьбы, а) – КО-90Н-4Т-3, б) – КО-102Н-В13-3

### Выводы

Внедрение дефектоскопа на предприятиях, работающих в сфере изготовления оборудования для нефтедобычи, позволило повысить надежность выпускаемой продукции за счет недопущения выхода продукции с заводскими дефектами. Применение дефектоскопа на эксплуатирующихся и сервисных предприятиях позволило снизить издержки на ремонт бурительных труб и повысить вероятность безотказной работы скважного оборудования. Обеспечено проведение процедуры неразрушающего контроля резьбы в случае использования труб, изготовленных из нержавеющей неферромагнитной стали и алюминиевых сплавов.

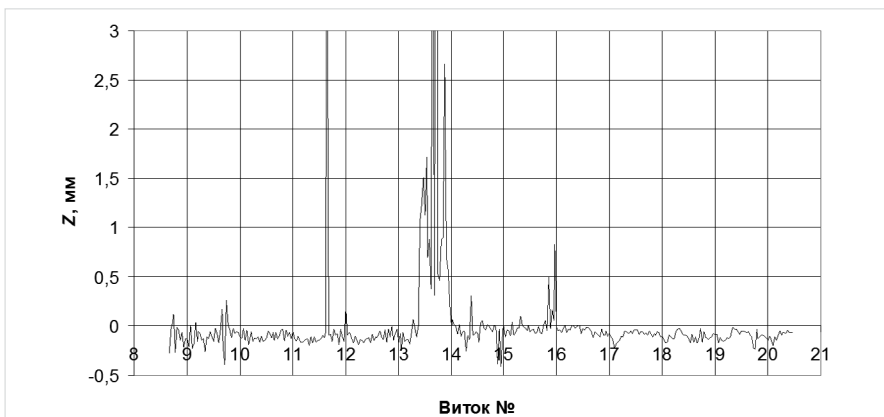


Рис. 11 — Дефектограмма сканирования трубы с резьбой Ø88x123

### Список использованной литературы

1. Субботин С.С., Соколова Н.Г., Брюханов О.Ф., Михайленко В.И. Дефектоскопия нефтяного оборудования [Текст]. М.: Недра, 1975. 264 с.
2. Языков В.А. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния резьбового соединения [Текст], Вестник ТОГУ. 2007. № 1 (4), Технические науки, Стр. 111-118
3. Семин В.И. Современные методы проектирования резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента для строительства скважин. // Дис. д-ра техн. наук 25.00.15, 05.02.13 М, 2005.
4. РД 39-2-787-82 Методика дефектоскопии концов бурительных труб [Текст]. Утв. М-вом нефтяной промышленности 28.09.1982
5. РД 39-12-1150-84 Технология неразрушающего контроля вертлюгов [Текст]. Утв. М-вом нефтяной промышленности 22.08.1984 введ. в действие с 01.10.1984. - Куйбышев.: Б.н., 1984, 24 с.
6. Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В. Вихретоковый контроль резьбы оборудования нефтегазовой отрасли [Текст]. Экспозиция нефть газ, №4/Н (16) август 2011 г., Стр. 4-8.
7. Сясько В.А., Соломенчук П.В., Коротеев М.Ю. Вихретоковый неразрушающий контроль резьбы насосно-компрессорных труб [Текст]. Контроль. Диагностика, № 10 / 2012 г.
8. Неразрушающий контроль [Текст]. Справочник в 8 томах под редакцией Клюева В.В. Том 2. М., «Машиностроение», 2006г., 687 с.
9. ГОСТ Р 50864-96 Резьба коническая замковая для элементов бурительных колонн. Профиль, размеры, технические требования. [Текст]. -Введ. 1997-01-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1996, 35 с.
10. Потапов А.И., Соломенчук П.В., Сясько В.А. Обеспечение достоверности при неразрушающем вихретоковом контроле резьбы с использованием тангенциальных преобразователей [Текст]. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 9 / 2012 Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана. Стр. 58-64.
11. Дефектоскопы вихретоковые «Константа ВД1». Описание типа средств измерений. Приложение к свидетельству № 39937 об утверждении типа средств измерений. С-Пб., ВНИИМ, 2010.

Система менеджмента качества  
сертифицирована на соответствие  
стандарту ИСО 9001:2008

## КОНСТАНТА

Разработка и производство  
приборов неразрушающего контроля

## Многофункциональный вихретоковый дефектоскоп «Константа ВД1»

- Обнаружение и оценка размеров  
поверхностных и внутренних дефектов  
(в том числе через защитное покрытие)
- Контроль многослойных конструкций и  
изделий с повышенной шероховатостью

ЗАО «КОНСТАНТА», Россия, 198095, Санкт-Петербург, а/я 42  
Тел. (812) 372-2903, (812) 372-2904,  
e-mail: office@constanta.ru, www.constanta.ru