



**ПОТАПОВ**

Анатолий Иванович  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедры  
«Приборостроение»  
(«Национальный  
минерально-сырьевой  
университет «Горный»,  
Санкт-Петербург)



**СОЛОМЕНЧУК**

Павел Валентинович  
ведущий специалист  
(ЗАО «Константа»)



**СЯСЬКО**

Владимир Александрович  
кандидат технических  
наук, доцент  
кафедры  
«Приборостроение»  
(«Национальный  
минерально-сырьевой  
университет «Горный»,  
Санкт-Петербург)  
e-mail: apot@mail.ru

## Обеспечение достоверности при вихретоковом неразрушающем контроле резьбы с использованием тангенциальных преобразователей

**А.И. Потапов, П.В. Соломенчук, В.А. Сясько**

*Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения достоверности вихретокового контроля резьбы труб. Описаны контролируемые и мешающие параметры при проведении неразрушающего контроля, конструктивные особенности контрольных образцов и методики проведения контроля.*

**Ключевые слова:** контроль резьбы, вихретоковый, контрольный образец, неразрушающий контроль.

## Assurance of reliability under eddy current nondestructive thread testing using tangential probe

**A.I. Potapov, P.V. Solomenchuk, V.A. Syasko**

*The article describes the metrological support problems during the pipe thread eddy current inspection. Being tested and stray parameters under nondestructive testing, reference block design features and the examination procedure are considered.*

**Keywords:** thread testing, eddy current, reference block, nondestructive testing.

В России традиционно большое внимание уделяется метрологическому обеспечению измерений. В данной статье рассмотрены вопросы метрологического обеспечения вихретокового неразрушающего контроля резьбы труб — объекта контроля (ОК).

На достоверность контроля влияют:

- характеристики и настройки вихретокового дефектоскопа (к основным из них относятся частота тока возбуждения, чувствительность, параметры фильтров и порог срабатывания сигнализации «дефект»);
- тип, конструкция и схема подключения первичного измерительного вихретокового преобразователя (ВТП);
- выбранные информативные, а также мешающие параметры.

Для обеспечения контроля при производстве и в процессе эксплуатации необходима корректная установка характеристик дефектоскопа [1].

При контроле резьбы в соответствии с [1–3] информативным параметром является глубина  $Z$  трещины во впадине резьбы. Все осталь-

ные параметры при контроле резьбы — мешающие. Основные из них можно условно подразделить на две группы:

1) определяемые взаимным расположением ВТП и ОК:

- зазор  $h$  между ВТП и ОК;
- смещение  $S$  ВТП вдоль оси резьбы;

2) определяемые свойствами объекта контроля:

- высота профиля резьбы  $h_s$ ;
- относительная магнитная проницаемость материала ОК и ее девиация по площади поверхности ОК;
- электропроводность  $\sigma$  материала ОК и ее девиация по площади поверхности ОК.

Рассмотрим влияние характеристик ОК и мешающих параметров на примере абсолютного тангенциального трансформаторного трехобмоточного ВТП с обмотками, повторяющими форму профиля впадины резьбы [4], взаимное расположение которых представлено на рис. 1.

Напряжение на измерительной обмотке  $\dot{U}_и$  равно сумме напряжения  $\dot{U}_0$ , возникающего в отсутствие ОК, и вносимого (разностного) напряжения  $\dot{U}_вн$ , возникающего при взаимодействии ВТП и ОК:  $\dot{U}_и = \dot{U}_0 + \dot{U}_вн$ .

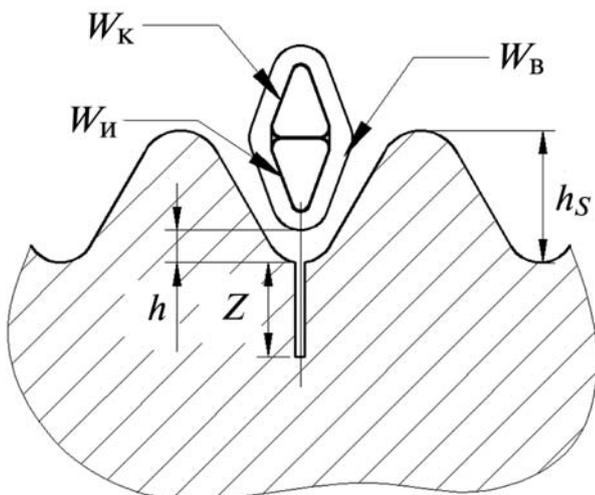


Рис. 1. Абсолютный тангенциальный трансформаторный трехобмоточный ВТП с обмотками, повторяющими форму профиля впадины резьбы:

$W_и$  — обмотка измерительная;  $W_к$  — обмотка компенсационная;  $W_в$  — обмотка возбуждения

Для анализа влияния различных параметров на сигналы ВТП будем рассматривать комплексное относительное вносимое напряжение:

$$\dot{U}_{вн}^* = \dot{U}_{вн} / |\dot{U}_{вн}(НУ)|, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_{вн}(НУ)$  — вносимое напряжение при заданных нормальных условиях контролируемого и мешающих параметров.

На рисунке 2 приведена зависимость  $\dot{U}_{вн}^*$  от контролируемого и мешающих параметров.

Для измерения глубины  $Z$  трещины целесообразно в качестве информативного параметра использовать фазу  $\varphi$  напряжения  $\dot{U}_{вн}^*$  [5].

На рисунке 3, а изображена зависимость  $\varphi$  от  $Z$ , на рис. 3, б — зависимость чувствительности  $S_Z = \Delta\varphi/\Delta Z$  от глубины трещины.

На рисунке 3, б видно, что в диапазоне малых глубин трещины  $S_Z \approx 3$  град/мм, с дальнейшим увеличением глубины трещины чувствительность снижается. Изменение  $h$  приводит к изменению  $S_Z$ .

На рисунке 4 приведены зависимости  $\varphi$  от мешающих параметров, определяемых взаимным расположением ВТП и ОК.

На рисунке 5 представлены зависимости  $\varphi$  от  $h_s$  при заходе и сбега резьбы, от  $\Delta\mu^*$  и  $\Delta\sigma^*$ .

Для уменьшения влияния мешающих параметров, определяемых взаимным расположением ВТП и ОК, используют приемы стабилизации условий проведения контроля [5], удерживающие приспособления, каретки (рис. 6). Каретка колесами опирается на боковые стороны резьбы, обеспечивая надежное позиционирование ВТП над впадиной резьбы.

Влияние мешающих параметров, определяемых свойствами ОК, можно уменьшить двумя способами:

1) линии влияния  $h_s$  (см. рис. 2) по форме и направлению аналогичны линиям влияния  $h$ . Отстройка от  $h$ , реализованная по фазовому принципу, также уменьшает влияние изменения  $h_s$ . Таким образом, влияние изменения  $h_s$  на результаты контроля незначительны (см. рис. 5, а);

2) линии влияния  $\Delta\mu^*$  аналогичны линиям влияния  $Z$ , по этой причине отстройка от влияния  $\Delta\mu^*$  невозможна. Однако, на реальных объ-

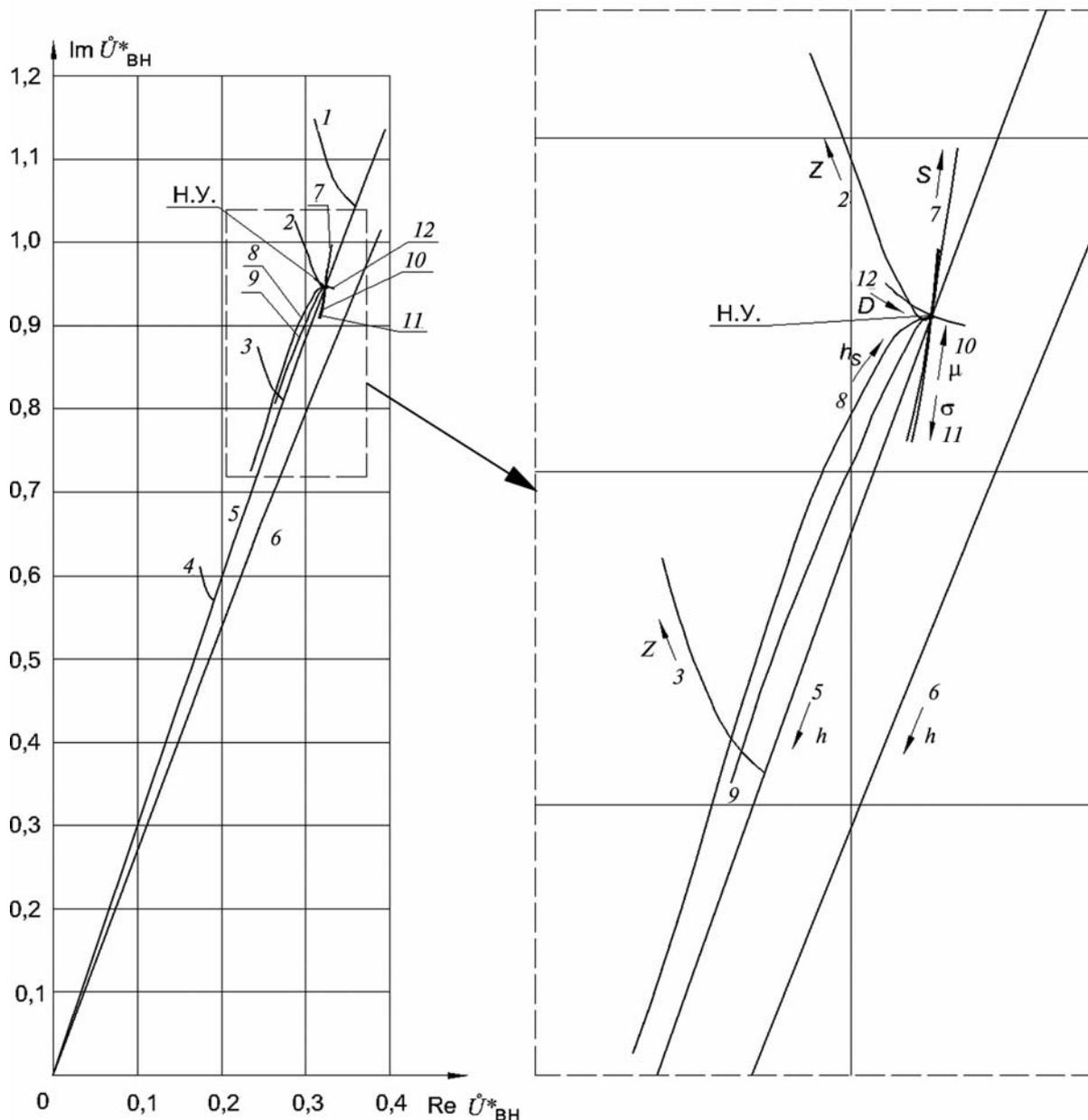


Рис. 2. Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения  $\hat{U}_{BH}^*$  от контролируемого и мешающих параметров:

1, 2, 3, 4 — линии влияния  $Z$  при  $h = 0$  мм;  $h = 0,1$  мм;  $h = 0,2$  мм;  $h = 0,4$  мм; 5, 6 — линии влияния  $h$  при  $\mu = \mu_n$  и  $\mu = \mu_{min}$ , где  $\mu_n$  — номинальное значение относительной магнитной проницаемости материала ОК; 7 — линия влияния смещения  $S$  ВТП вдоль оси резьбы; 8, 9 — линии влияния  $h_s$  на участке захода и сбега резьбы; 10 — линия влияния  $\Delta\mu^* = (\mu - \mu_n)/\mu_n$ ; 11 — линия влияния  $\Delta\sigma^* = (\sigma - \sigma_n)/\sigma_n$ , где  $\sigma_n$  — номинальное значение удельной электропроводности материала ОК; 12 — линия влияния диаметра резьбы  $D$ ; НУ — точка, соответствующая нормальным условиям:  $Z = 0$ ,  $h = 0,3$  мм,  $P = 2,54$  мм,  $D = 60$  мм,  $h_s = h_{слом}$ ,  $\mu = \mu_{ном}$ ,  $\sigma = \sigma_{ном}$

ектах изменение  $\Delta\mu^*$  носит плавный характер, тогда как изменение  $Z$  имеет резкий скачкообразный характер. Следовательно, для уменьшения влияния  $\Delta\mu^*$  возможно применение цифровой фильтрации [4].

Линия влияния  $\Delta\sigma^*$  по форме практически совпадает с линией влияния  $\mu$ , но противоположна по направлению. Отстройка от  $\Delta\sigma^*$  также не возможна, но на реальных объектах значительной девиации  $\Delta\sigma^*$  не наблюдается, т. е. ее влиянием можно пренебречь.

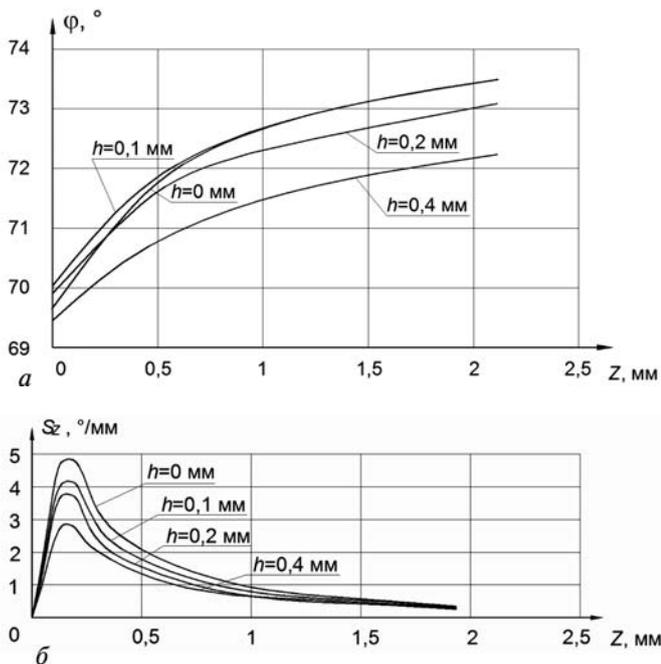


Рис. 3. Зависимости  $\varphi$  от  $Z$  (а) и  $S_z$  от  $Z$  (б)

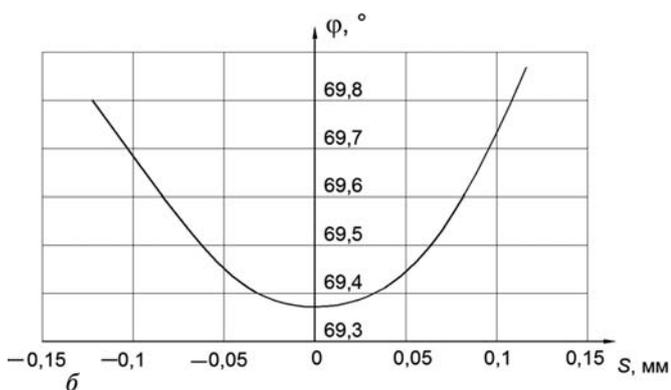
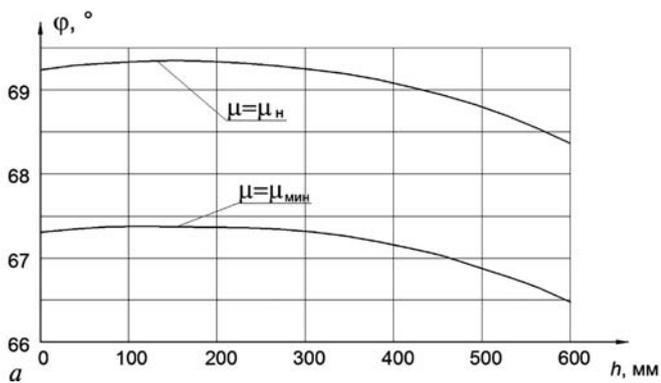


Рис. 4. Зависимость  $\varphi$  от  $h$  при различных значениях  $\mu$  (а) и зависимость  $\varphi$  от  $S$  (б)

Для увязывания характеристик и установок параметров дефектоскопа с характеристиками ОК, а также с некоторыми мешающими пара-

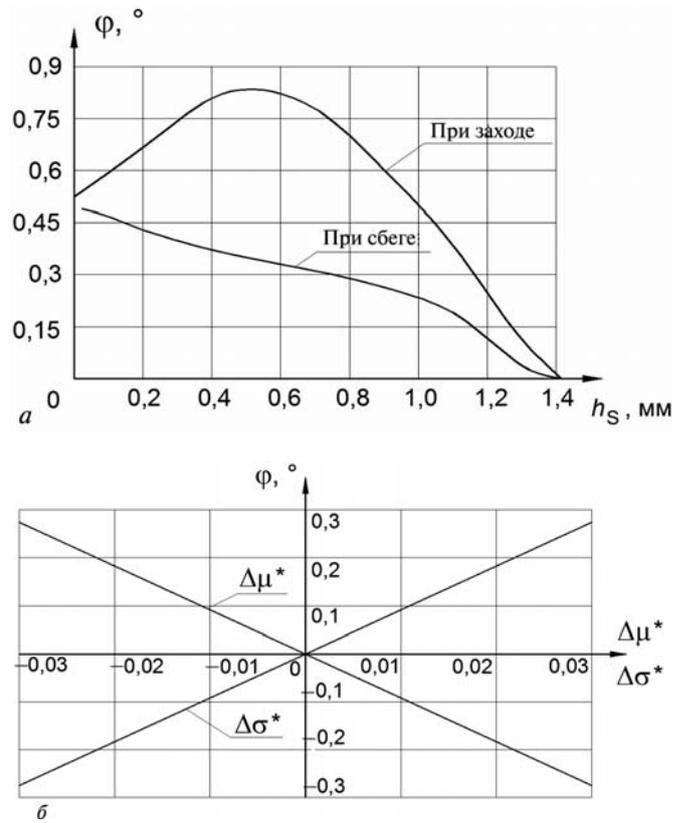


Рис. 5. Зависимость  $\varphi$  от  $h_s$  (а),  $\varphi$  от  $\Delta\mu^*$  и  $\Delta\sigma^*$  (б)



Рис. 6. Каретка ККТ1 с преобразователем на резьбе  
 метрами следует применять контрольные образцы (КО) [6], предназначенные для передачи значения информативного параметра, определенных характеристик ОК и мешающих параметров дефектоскопу с целью проведения градуировки, проверки работоспособности,

настройки чувствительности, калибровки или поверки [1].

Контрольные образцы должны передавать только требуемые характеристики ОК и мешающие параметры. В таблице приведены характеристики КО, соответствующие им передаваемые характеристики ОК и передаваемые мешающие параметры.

Таблица

Перечень характеристик КО, соответствующие им передаваемые актуальные характеристики ОК и передаваемые мешающие параметры

№ п/п	Характеристика КО	Передаваемая характеристика ОК	Передаваемый мешающий параметр
1	Материал КО	$\sigma$ и $\mu$ материала ОК	Девияция $\sigma$ и $\mu$ материала ОК по площади поверхности
2	Форма профиля резьбы	Форма профиля резьбы	Мешающие параметры формы и размеров элементов резьбы
3	Высота профиля резьбы	$h_s$	
4	Шаг резьбы	$P$	
5	Средний диаметр резьбы	$D$	

Контрольные образцы должны иметь форму и размеры аналогичные ОК в зоне контроля.

Для упрощения технологии изготовления, а также для уменьшения погрешностей задания размеров, конструкция КО может отличаться от конструкции ОК и может быть упрощена. Эквивалентность конструкции или технологического процесса изготовления должна быть подтверждена в ходе разработки и испытания КО [1]. Упрощения должны учитывать особенности вида и метода контроля, а также конструкции ВТП, который будет использоваться совместно с КО.

Ввиду того, что ОК выпускают из широкого наименования сплавов, изготовление соответствующего набора КО при поставке дефектоскопа может оказаться экономически не целесообразным. При этом, сигнал ВТП, установленного на КО, изготовленный из стали 40 имеет незначительное смещение относительно сигналов ВТП, установленных на КО из сплавов 40Х или Р6М5. Изменение чувствительности ВТП к глубине трещины будет пренебре-

жимо мало [3]. Это объясняется тем, что значительные отличия в химическом составе и механических свойствах большинства сталей не приводят к существенным различиям электромагнитных свойств стали. Однако некоторые высоколегированные стали, такие как 20Х13 или 40Х13 имеют существенно большее значение  $\mu$ , это приводит к смещению сигнала ВТП и изменению чувствительности в 2 раза, что является существенным. Таким образом, марки сталей следует разделить на группы по электромагнитным параметрам, а контрольные образцы следует изготавливать из марок, являющимися типичными представителями своей группы.

Большую часть номенклатуры сталей можно разделить на следующие группы [7]:

- конструкционные ферромагнитные стали;
- коррозионно-стойкие ферромагнитные стали ( $M \gg 1$ );
- коррозионно-стойкие слабомагнитные стали ( $M \approx 1$ );
- неферромагнитные стали ( $\mu = 1$ ) или их аналоги по электромагнитным свойствам.

Создание трещины заданных размеров и измерение ее размеров — трудоемкая задача. Трещина может быть заменена узкой прорезью. Прорези во впадине наружной резьбы могут быть нанесены методом проволоочной электроэрозии [8]. Прорези, нанесенные таким методом, имеют ровные стенки и дно.

КО должен содержать такую протяженность поверхности резьбы, чтобы можно было достоверно точно различать расположенные рядом искусственные дефекты, с учетом разрешающей способности ВТП. Также КО должен содержать достаточную протяженность бездефектного участка для установки нуля и балансировки дефектоскопа с ВТП.

Винтовая форма канавки резьбы имеет сложную конфигурацию. При нанесении прорези во впадине винтовой канавки необходимо учитывать наклон прорези относительно оси резьбы, а также кривизну проекции винтовой канавки. В связи с этим изготовление относительно протяженной и глубокой прорези во впадине винтовой канавки резьбы затруднено. Вместо винтовой можно использовать круго-

вую канавку. Разница в угле подъема резьбы [9], отличном от нуля и угле подъема круговой канавки, равным нулю, не обуславливает возникновение значимых показаний, требующих оценки [6].

Диаметр резьбы  $D$  является актуальной характеристикой до тех пор, пока его изменение оказывает воздействие на сигналы ВТП. Для преобразователя с зоной контроля 3 мм изменение диаметра  $D$  практически не оказывает воздействие при  $D \geq 90$  мм. Следовательно, образцы, имитирующие резьбу большого диаметра, могут быть плоскими.

Для магнитного или ультразвукового контроля резьбы на полый трубе или на монолитном прутке не идентичны. Материал внутри прутка используется для передачи пробной энергии от преобразователя к впадине резьбы [10, 11]. При вихретоковом контроле накладными ВТП полости внутри ОК не влияют на результаты контроля. Полость внутри КО уменьшает его вес, допускаемая минимальная толщина  $T_{\min}$  стенки в самом узком месте (под искусственным дефектом максимальной глубины) вычисляется исходя из глубины проникновения вихревых токов по формуле

$$T_{\min} \geq 2,5\delta, \quad (2)$$

где  $\delta = \frac{503}{f\sigma\mu_0}$ ;  $f$  — частота тока возбуждения ВТП.

В соответствии с [12], на поверхности стандартного образца должна быть нанесена маркировка. Аналогичная маркировка должна наноситься на поверхность КО:

- знак утверждения типа (если процедура утверждения типа СИ для данного КО проведена);
- наименование или товарный знак организации изготовителя;
- наименование КО, его индекс, если таковой имеется;
- серийный номер КО;
- актуальные размеры (глубина) искусственных дефектов;
- указание мест расположения искусственных дефектов.

В соответствии с [13], нормируемыми должны быть следующие характеристики средства измерения:

- для определения результатов измерений;
- погрешностей средств измерений;
- чувствительности средств измерений к влияющим величинам;
- динамические характеристики средств измерений;
- средств измерений, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений вследствие взаимодействия средств измерений с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов;
- неинформативные параметры выходного сигнала средства измерений.

Для КО нормированию подлежат следующие характеристики:

- глубина искусственных дефектов;
- допускаемые отклонения от номинального значения глубины искусственных дефектов;
- предел доверительного диапазона погрешности измерения глубины искусственных дефектов;
- размеры и форма поверхности КО (тип, шаг, диаметр, число витков имитируемой резьбы);
- характеристики материала КО.

Для определения характеристик материала КО следует указывать марку стали и подтверждать ее соответствие сертификатом установленной формы.

В большинстве методик вихретоковой дефектоскопии [14, 15], предписывается выполнять настройку конкретной модели дефектоскопа по данным, приведенным в регламентирующем документе и проверять выявляемость дефекта установленного размера по срабатыванию сигнализации на КО с искусственным дефектом установленного размера. В других методиках, например, [16], предписывается настраивать дефектоскоп в соответствии с руководством по эксплуатации и проверять выявляемость дефекта установленного размера по срабатыванию сигнализации на КО.

Описанная конструкция и метод контроля резьбы реализованы в дефектоскопе «Константа ВД1» и преобразователях ПФ-Рх-0,5х3-Fe.

Объектом контроля может быть как наружная, так и внутренняя резьба:

- метрическая с шагом 2...8 мм;
- треугольная закругленная резьба насосно-компрессорных труб с шагом 2,54 и 3,175 мм;
- замковая резьба буровых колонн;
- трубопроводная резьба с шагом от 11,5 витков на 25,4 мм.

Дефектоскоп прошел испытания и внедрен на ряде предприятий машиностроения.

## Литература

1. ГОСТ Р ИСО 15549–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. Введ. 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2011, 7 с.
2. ГОСТ Р ИСО 12718–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый Термины и определения. Введ. 2010-12-01. М.: Стандартинформ, 2011, 35 с.
3. ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый, термины и определения. Введ. 1988-07–01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004, 9 с.
4. Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В. Вихретоковый контроль резьбы оборудования нефтегазовой отрасли // Экспозиция нефть газ. август 2011. №4/Н (16). С. 4–8.
5. Неразрушающий контроль: справочник. В 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. Кн.2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
6. ГОСТ Р 53697–2009. Контроль неразрушающий, основные термины и определения. Введ. 2011-01–01. М.: Стандартинформ, 2010, 19 с.
7. Комплект мер моделей дефектов КММД-21. Описание типа средств измерений. Приложение к свидетельству № 42267 об утверждении типа средств измерений. М., ВНИИОФИ, 2011.
8. Satish S. Udpa, Patrick O. Moore. Electromagnetic testing // Nondestructive testing handbook. 2004. Vol. 5. American Society for Nondistructive Testing. P. 524.
9. ГОСТ 11708–82. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба. Термины и определения. Введ. 1984-01–01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1987, 31 с.
10. РД 39-2-787–82. Методика дефектоскопии концов буровых труб. Утв. М-вом нефтяной промышленности 28.09.1982 введ. в действие с 01.11.1982. Куйбышев.: Б.н., 1983, 19 с.
11. ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Введ. 1988-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004, 27 с.
12. ГОСТ 8.315–97. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. Введ. 1998-07–01. Минск: Изд-во стандартов, 1997, 45 с.
13. ГОСТ 8.009–84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. Введ. 1986-01–01. М.: Стандартинформ, 2006, 76 с.
14. РД 13-03–2006. Методические рекомендации о порядке проведения вихретокового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Утв. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.12.2006. введ. в действие с 25.12.2006. М., 2006. 33 с.
15. Инструкция по неразрушающему контролю деталей и узлов локомотивов и моторвагонов подвижного состава. Вихретоковый метод. МПС РФ, Департамент локомотивного хозяйства. Утв. МПС РФ департамент локомотивного хозяйства 29.12.1999. Введ. в действие с 29.12.1999. М.: ТЕХИНФОРМ, 2001. 127 с.
16. Общие технические условия по ремонту поршневых компрессоров. Мин-во нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Утв. М-вом нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности 06.03.1985. Введ. в действие с 06.03.1985. Волгоград, 1985. 192 с.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012