

## ВИХРЕТОКОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ТРУБ

© 2019 г. Е.К. Киселев<sup>1,\*</sup>, А.Е. Гольдштейн<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634034 Томск, пр-т Ленина, 30  
E-mail: \*kasha.92y@yandex.ru; \*\*algol54@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.11.2018; после доработки 11.12.2018;  
принята к публикации 13.12.2018

Предложен метод вихретокового контроля внутреннего диаметра электропроводящих труб. Описаны конструкция вихретокового преобразователя, алгоритм преобразования сигналов измерительной информации, структурная схема системы контроля внутреннего диаметра труб, позволяющей осуществлять контроль в условиях значительных радиальных смещений вихретокового преобразователя внутри трубы. Оценена эффективность предлагаемых технических решений.

*Ключевые слова:* контроль внутреннего диаметра, вихретоковый преобразователь, система вихретокового контроля, амплитудно-фазовое преобразование, отстройка от радиальных смещений.

DOI:10.1134/S0130308219030059

### ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации труб в различных сферах их применения возникает необходимость периодического контроля внутреннего диаметра. Такая задача может быть связана с возможным изменением внутреннего диаметра в результате пластической деформации, вызванной механическими воздействиями на наружную или внутреннюю поверхности (сопряженными часто с одновременными термическими воздействиями) либо значительными коррозионными повреждениями внутренней поверхности под действием агрессивных сред.

В случае, если труба изготовлена из электропроводящего материала и ее длина не превышает десятка метров, может быть обеспечен доступ внутрь нее и применен вихретоковый метод контроля [1—4]. Преимуществами вихретокового метода по сравнению с альтернативными методами контроля являются отсутствие необходимости контакта с поверхностью трубы (что особенно актуально в случае наличия механических и коррозионных повреждений поверхности, а также различных загрязнений), высокая скорость контроля, широкий диапазон измеряемых диаметров труб, простота настройки, малое влияние внешних факторов, отсутствие необходимости доступа к наружной поверхности трубы, возможность автоматизации процесса контроля и протоколирования его результатов. При определенных условиях контроля абсолютная погрешность измерений может не превышать десятых долей миллиметра, что удовлетворяет требованиям широкого круга практических задач [5].

Вихретоковые методы контроля внутреннего диаметра могут быть реализованы с использованием как проходных, так и накладных вихретоковых преобразователей (ВТП).

Вихретоковый метод контроля с использованием внутреннего проходного ВТП основан на возбуждении на внутренней поверхности трубы переменным магнитным полем обмотки возбуждения размещенного внутри контролируемой трубы проходного ВТП вихревых токов, измерении обусловленного этими токами вносимого напряжения и определении внутреннего диаметра трубы с использованием функциональной связи амплитуды вносимого напряжения ВТП и внутреннего диаметра контролируемой трубы [6]. Недостатком этого метода является зависимость результата измерения внутреннего диаметра трубы от радиального смещения обмоток ВТП относительно продольной оси трубы и отсутствие возможности отстройки от влияния этого фактора.

Вихретоковый метод контроля линейных размеров, реализуемый с применением накладных ВТП, основан на измерении амплитуд вносимых напряжений двух расположенных соосно на фиксированном расстоянии друг от друга взаимодействующих с объектом контроля накладных вихретоковых преобразователей, преобразовании двумя измерительными каналами измеренных сигналов в пару значений зазоров между вихретоковыми преобразователями и поверхность объекта контроля, определении значения контролируемого параметра суммированием значений зазоров и расстояния между рабочими торцами вихретоковых преобразователей [7]. Недостатком метода является низкая достоверность контроля линейных размеров в случае криволинейной поверхности объекта контроля и наличия не только продольных смещений вихретоковых преобразователей вдоль их общей оси, но и поперечных смещений, как это имеет место в случае контроля внутрен-

него диаметра труб. Указанные поперечные смещения при отличии формы поверхности объекта от плоской вызывают изменения амплитуд вносимых напряжений вихретоковых преобразователей и, соответственно, влияют на результат измерения контролируемого параметра.

По этой же причине ранее разработанный нами вариант реализации описанного выше метода контроля с использованием ВТП с пятью расположенными в разных плоскостях коаксиальными обмотками является эффективным только при условии выполнения жестких ограничений на диапазон радиальных смещений ВТП внутри трубы [8].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструкция упомянутого выше ВТП с пятью обмотками схематично показана на рис. 1.

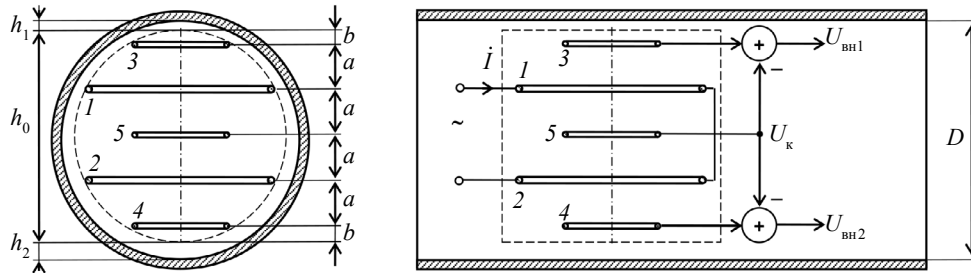


Рис. 1. ВТП внутри контролируемой трубы:  
1, 2 — обмотки возбуждения; 3, 4 — измерительные обмотки; 5 — компенсационная обмотка.

При осуществлении контроля переменный ток  $I$ , протекающий через последовательно соединенные и согласно включенные обмотки возбуждения 1 и 2, создает переменное магнитное поле, которое в свою очередь наводит вихревые токи в стенках объекта контроля. При помощи измерительных обмоток 3 и 4 осуществляется измерение магнитных полей индуцированных вихревых токов. Для компенсации начальных напряжений измерительных обмоток используется обмотка 5. Число витков обмотки 1 —  $w_1$  равно числу витков обмотки 2 —  $w_2$ , число витков обмотки 3 —  $w_3$  равно числу витков обмотки 4 —  $w_4$ , а соотношение чисел витков компенсационной и измерительной обмоток должно обеспечивать равенство начальных напряжений этих обмоток.

Конструктивно блок ВТП представляет собой измерительный зонд с цилиндрическим корпусом, наружный диаметр которого должен быть меньше внутреннего диаметра контролируемой трубы, что обеспечивает беспрепятственное продольное перемещение зонда внутри трубы (рис. 2).

По физике взаимодействия с объектом контроля используемый ВТП является накладным, хотя формально он и имеет конструктивные признаки проходного. По сути можно считать, что в данном случае, как и в [7], используются два накладных ВТП с обмотками  $w_1—w_3—w_5$  и  $w_2—w_4—w_5$ .

Задача измерения внутреннего диаметра трубы сводится, таким образом, к классической для вихретокового контроля задаче измерения зазоров  $h_1$  и  $h_2$  между поверхностью электропроводящего объекта и первым и вторым накладными ВТП [9—11].

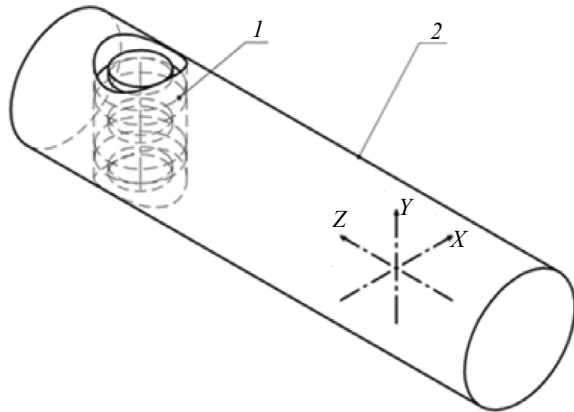


Рис. 2. Общий вид измерительного зонда:  
1 — ВТП, 2 — корпус.

На рис. 3 приведена структурная схема устройства, реализующего метод вихретокового контроля внутреннего диаметра металлических труб. Устройство содержит генератор высокочастотного гармонического сигнала 1, измерительный зонд 2 с двумя накладными ВТП, блок аналогового амплитудно-фазового преобразования 3, плату сбора данных 4, персональный компьютер 5.

Гармонические выходные напряжения измерительного зонда, пропорциональные вносимым напряжениям  $\dot{U}_{вн1}$  и  $\dot{U}_{вн2}$ , преобразуются

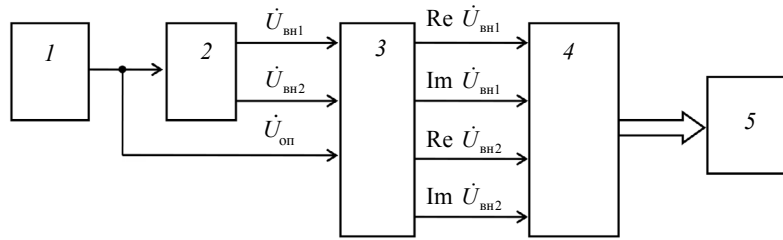


Рис. 3. Структурная схема измерителя внутреннего диаметра труб с двумя накладными ВТП.

амплитудно-фазовыми детекторами блока 3 в постоянные напряжения, пропорциональные действительным и мнимым составляющим вносимых напряжений. Далее эти напряжения преобразуются в цифровую форму и передаются в персональный компьютер с помощью платы сбора данных. Программа вычислительной обработки сигналов измерительной информации предусматривает цифровую фильтрацию сигналов, определение амплитуд вносимых напряжений  $\dot{U}_{вн1}$  и  $\dot{U}_{вн2}$  либо их проекций на направление отстройки, вычисление значений зазоров  $h_1$  и  $h_2$  с использованием функций преобразования амплитуд вносимых напряжений в значения зазоров, вычисление значения внутреннего диаметра трубы  $D$

$$D = h_1 + h_2 + h_0, \tag{1}$$

где  $h_0$  — диаметр зонда (см. рис. 1).

Далее проводится сравнение измеренного значения диаметра с установленными пороговыми значениями и индикация результатов контроля.

Для определения функции обратного преобразования амплитуды вносимого напряжения в значение зазора  $h = f_2(U_{вн})$  использовали полученные экспериментально зависимости амплитуды вносимого напряжения от зазора  $U_{вн} = f_1(h)$  (функции прямого преобразования). Для определения этих функций применяли двухкоординатный стол, обеспечивающий возможность поперечных перемещений зонда по осям  $X$  и  $Y$  (см. рис. 2).

На рис. 4 показана зависимость относительного значения амплитуды вносимого напряжения  $U_{вн}^*$  от зазора для значений внутреннего диаметра трубы 28,2 мм и диаметра зонда 17,3 мм при отсутствии поперечного смещения зонда по оси  $X$ . Нормирование значений амплитуды вносимого напряжения производилось по ее максимальному значению, соответствующему отсутствию зазора ( $h = 0$ ).

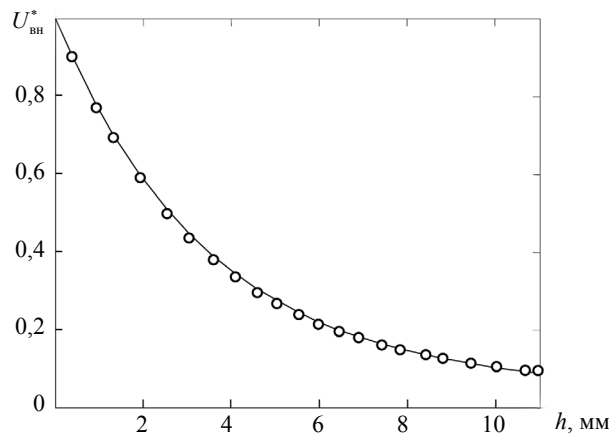


Рис. 4. Зависимость амплитуды относительного вносимого напряжения от зазора.

На рис. 5 показана функция обратного преобразования, которая с достаточной степенью точности может быть аппроксимирована логарифмической зависимостью вида

$$h = a \ln \left( \frac{U_{вн}}{U_{max}} + b \right) + c, \tag{2}$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты, зависящие от геометрических параметров ВТП и внутреннего диаметра трубы.

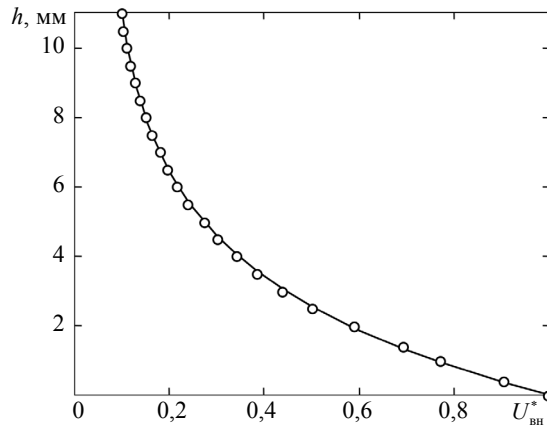


Рис. 5. Обратная функция преобразования амплитуды вносимого напряжения в зазор.

Недостатком описанного метода контроля является зависимость амплитуды вносимого напряжения ВТП не только от смещения зонда в направлении  $Y$ , параллельном общей продольной оси обмоток, но и от поперечного смещения зонда в направлении оси  $X$  (см. рис. 2). При таком поперечном смещении зонда имеет место увеличение амплитуды сигнала и соответственно уменьшение измеренного значения зазора, определяемого по формуле (2).

На рис. 6 показаны результаты измерений внутреннего диаметра, определяемого с использованием формул (2) и (1) для указанных ранее значений внутреннего диаметра трубы  $D = 28,2$  мм и диаметра зонда  $h_0 = 17,3$  мм при различных сочетаниях значений поперечных смещений зонда вдоль осей  $X$  и  $Y$ . Диапазон изменения смещений составлял  $\pm 5,4$  мм. Анализ этих результатов показывает, что при отсутствии смещения зонда вдоль поперечной оси  $X$  абсолютная погрешность измерения не превышает  $\pm 0,15$  мм. При наличии смещений зонда по оси  $X$  погрешность может достигать по модулю 1,5 мм.

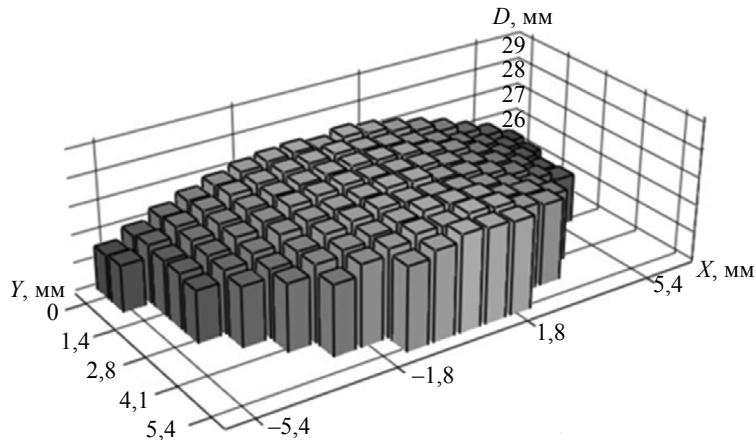


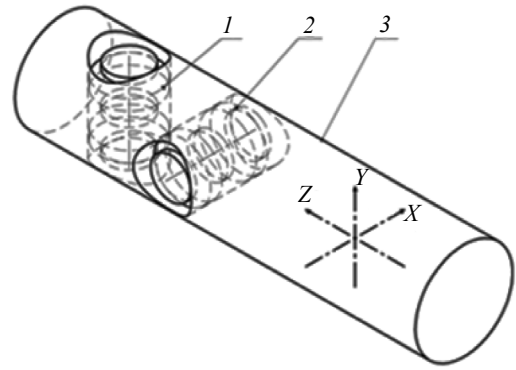
Рис. 6. Результаты измерений внутреннего диаметра без отстройки от влияния поперечных смещений зонда вдоль оси  $X$ .

### ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Для устранения указанного недостатка предлагается использовать вторую пару накладных ВТП, идентичных по конструкции с первой, но ориентированную ортогонально относительно ее продольной оси (рис. 7). Использование двух пар ортогональных ВТП позволяет измерять поперечные смещения зонда вдоль осей  $X$  и  $Y$  и таким образом отстроиться от их влияния на результат измерения.

Структурная схема измерительного устройства с двумя парами ортогональных накладных ВТП показана на рис. 8. В ее состав входят те же блоки, что и в случае использования одной пары ВТП. Отличие заключается в увеличении вдвое числа каналов измерительного преобразования сигналов ВТП.

Рис. 7. Общий вид модернизированного измерительного зонда:  
1, 2 — ВТП, 3 — корпус.



Преобразование сигналов измерительной информации осуществляется аналогично случаю использования измерителя с одной парой накладных ВТП. В результате вычислений с использованием функции (2) определяются наряду с зазорами  $h_1$  и  $h_2$ , обусловленными смещением зонда по оси  $Y$ , зазоры  $h_3$  и  $h_4$ , обусловленные смещением зонда по ортогональной оси  $X$ . При этом принимается, что  $h_1 > h_2$  и  $h_3 > h_4$ .

Далее осуществляется вычисление коэффициентов  $\varepsilon_Y$  и  $\varepsilon_X$ , характеризующих смещения зонда соответственно по осям  $Y$  и  $X$ :

$$\varepsilon_Y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}; \quad \varepsilon_X = \frac{h_3 - h_4}{h_3 + h_4}. \quad (3)$$

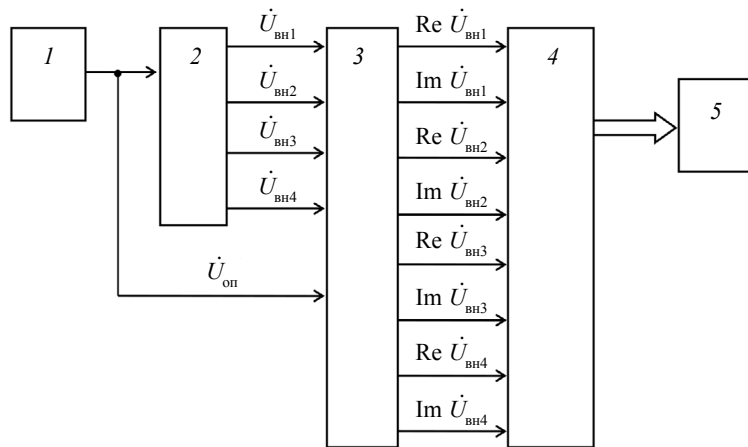


Рис. 8. Структурная схема измерителя внутреннего диаметра труб с двумя парами накладных ВТП.

Эти коэффициенты используются для внесения корректирующих поправок  $\Delta D_Y$  и  $\Delta D_X$  в измеренные значения внутреннего диаметра трубы  $D_Y$  и  $D_X$  по осям  $Y$  и  $X$ :

$$\Delta D_Y = k_0 + k_1 \varepsilon_X + k_2 \varepsilon_X^2; \quad \Delta D_X = k_0 + k_1 \varepsilon_Y + k_2 \varepsilon_Y^2; \quad (4)$$

$$D_Y = h_1 + h_2 + h_0 + \Delta D_Y; \quad D_X = h_3 + h_4 + h_0 + \Delta D_X,$$

где  $k_i$  — коэффициенты полинома второй степени, зависящие от геометрических параметров ВТП и внутреннего диаметра трубы, определяемые на этапе первичной настройки измерителя с использованием экспериментальных зависимостей величин  $\Delta D_Y$  и  $\Delta D_X$  от соответствующих смещений.

Далее определяются средний диаметр  $D_{cp}$  и разница диаметров  $\Delta D$ , характеризующая отличие формы внутренней поверхности трубы от круглой:

$$D_{cp} = \frac{D_Y + D_X}{2}; \quad \Delta D = |D_Y - D_X|. \quad (5)$$

Эффективность предлагаемого вихретокового метода измерения внутреннего диаметра в условиях значительных радиальных смещений измерительного зонда внутри объекта контроля была подтверждена результатами лабораторных испытаний опытного образца устройства при контроле труб теплообменников из ферромагнитной и аустенитной сталей.

На рис. 9 показаны результаты измерений внутреннего диаметра для указанных ранее значений внутреннего диаметра трубы и измерительного зонда с использованием предлагаемого метода отстройки от влияния поперечных смещений.

При осуществлении измерений имитировались радиальные смещения зонда во всевозможных направлениях. Анализ приведенных результатов показал, что при использовании предлагаемого метода контроля в указанном диапазоне изменений влияющих параметров абсолютная погреш-

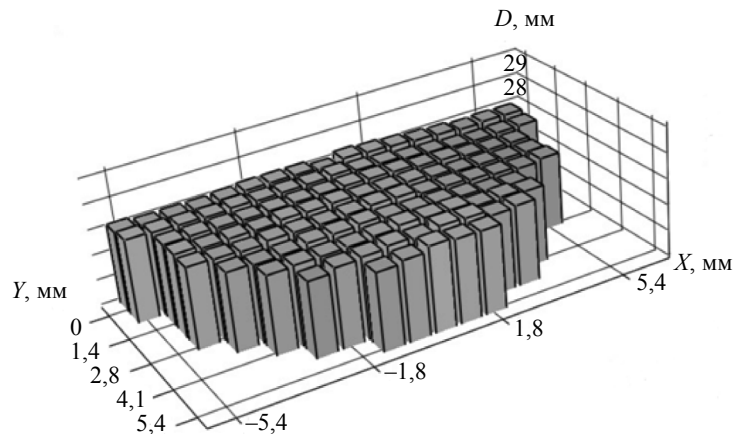


Рис. 9. Результаты измерений внутреннего диаметра с использованием отстройки от влияния поперечных смещений зонда.

ность измерения внутреннего диаметра не превышает по модулю 0,35 мм. Без использования отстройки от влияния радиальных смещений погрешность измерения возрастает минимум в 4 раза.

В рассматриваемом примере диапазон радиальных смещений составлял порядка 38 % от внутреннего диаметра трубы. При уменьшении диапазона радиальных смещенийкратно может быть уменьшена и погрешность измерений.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, показана эффективность предложенного вихретокового метода контроля внутреннего диаметра электропроводящей трубы в условиях значительных радиальных смещений ВТП внутри трубы. Особенностью предлагаемого решения является использование измерительного зонда с двумя парами ортогональных ВТП, что позволяет измерять значения диаметра по двум ортогональным осям, а также значения поперечных смещений ВТП по этим осям, что дает возможность осуществлять отстройку от их влияния на результаты контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Изд. дом «Спектр», 2014. 288 с.
2. Неразрушающий контроль / Справочник. Под ред. В.В. Клюева. В 7 т. Т. 2: в 2-х кн. Кн. 1. Контроль герметичности. Кн. 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
3. Moore P.O. (Ed.) Nondestructive Testing Handbook. V. 5. Electromagnetic Testing (ET). 3rd ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2004. 524 p.
4. Петин С.В., Сидоренко В.Г. Обзор методов дефектоскопии при обследовании трубопроводов // Молодой ученый. 2016. № 2. С. 194—199.
5. Киселев Е.К., Гольдштейн А.Е. Измерение внутреннего диаметра проводящей трубы с применением вихретокового преобразователя // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 59—62.
6. Кашаев Ю.Г. Вихретоковый преобразователь проходного типа. Авт. свид. СССР № 1558172. МПК G01N27/90 // Бюл. изобр. 1994. № 27.
7. Вяхорев В.Г., Никульшин В.С., Трахтенберг Л.И. Токовихревое устройство для измерения линейных размеров. Авт. свид. СССР 524071. МПК G01B7/02, G01N 27/90 // Бюл. изобр. 1976. № 29.
8. Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф. Контроль внутреннего диаметра труб вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2013. № 11. С. 51—58.
9. Маишков А.С., Батырев Ю.П., Дунаевский В.П., Чирков А.М. Способы выделения информации при контроле зазоров вихретоковыми датчиками / Сб. науч. тр. Московский гос. университет леса, 2000. Вып. 302(11). С. 177—189.
10. Sandoval V.A. Measurements of the thickness and electrical conductivity of nonmagnetic plates by an eddy-current method // Measurement Techniques. 2013. I. 55(10). P. 1201—1208.
11. Задворный И.В. Применение вихретокового метода в сенсорах неразрушающего контроля внутритрубных приборов нефтегазового комплекса // Молодой ученый. 2018. № 31. С. 31—34.