

УДК.621.643.053.008.6

**П.В. Володин<sup>1</sup>**, e-mail: pavelv@10v9.ru; **С.М. Коваленко<sup>1</sup>**, e-mail: kovalenko@mirea.ru;

**С.И. Коршаковский<sup>1</sup>**, e-mail: korshakovsky.mirea@gmail.com

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (МИРЭА) (Москва, Россия).

## Контроль механической целостности магистралей трубопроводного транспорта

При воздействии различных факторов внутренней и внешней среды на элементы магистралей трубопроводного транспорта при добыче, хранении и распределении природного газа, нефти и нефтепродуктов возникает опасность преждевременного разрушения трубопроводов и дестабилизации потока жидкости, газа или их смеси в коммуникационных системах. При этом актуальной задачей является обеспечение безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта путем создания системы его аварийной защиты. Для решения этой задачи предлагается использовать новую разработанную авторами технологию контроля и диагностики целостности нефтегазовых труб, базирующуюся на модифицированном вихретоковом методе диагностики. Метод основан на создании в зоне контроля изделия постоянного магнитного поля, иницировании в ней вихревого электрического поля и вихревых токов в проводящей среде. Вторичное магнитное поле, созданное этими токами, формирует в обмотке специального датчика, устанавливаемого снаружи трубопровода, полезный информационный сигнал, форма и амплитуда которого зависят от механической целостности трубопровода. Предложенная технология предусматривает создание относительного движения датчика и контролируемого изделия за счет вращения трубы или орбитального вращения датчика.

При экспериментальной отработке метода в зависимости от условий эксперимента были получены устойчивые сигналы с амплитудой 5 В – 50 мВ при минимальной линейной скорости моделируемого дефекта относительно рабочей поверхности датчика 1–5 м/с без использования усилительных устройств. Амплитуда и форма полученных сигналов зависят от характера моделируемого дефекта, угловой скорости вращения модели, величины зазора между рабочей поверхностью датчика и трубой. Разрешающая способность датчиков, использованных в экспериментальных исследованиях, составляла около 7–8 мм. Эта величина может быть существенно снижена за счет введения в конструкцию датчика редкоземельных металлов в качестве источников постоянного магнитного поля. Диагностика и контроль магистралей трубопровода могут осуществляться для труб, рекомендованных к применению нормативными документами ПАО «Газпром».

Предложенный модифицированный вихретоковый метод неразрушающего контроля и диагностики целостности нефтегазовых труб может использоваться как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Полученные экспериментальные данные и сравнительный анализ показали экономическую целесообразность применения метода для решения проблем надежности и безопасности эксплуатации магистралей трубопроводного транспорта.

**Ключевые слова:** магнитное поле, вихревые токи, электрический сигнал, датчик измерения магнитного поля, механическая целостность труб.

.....

**P.V. Volodin<sup>1</sup>**, e-mail: pavelv@10v9.ru; **S.M. Kovalenko<sup>1</sup>**, e-mail: kovalenko@mirea.ru;

**S.I. Korshakovsky<sup>1</sup>**, e-mail: korshakovsky.mirea@gmail.com

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow Technological University” (MIREA) (Moscow, Russia).

## The Mechanical Integrity Control of Main Pipelines of Pipeline Transport

The influence of different factors of the external and internal environment on the elements of main pipelines of pipeline transport during the recovery, storage and distribution of natural gas, oil and oil products causes a danger of early fracture of the pipelines and of destabilization of the flow of liquid, gas or their mixture in the communication systems. The safety control of pipeline transport by creating an emergency protection system is an urgent problem. To solve this task, the authors developed and propose to use the new technology of the integrity control and diagnostics of oil and gas pipes which is based on a modified eddy current diagnostics method. The method is based on creating the constant

magnetic field in the unit of equipment's control zone, initiating an eddy electric field in it and eddy currents in the conductive medium. The secondary magnetic field, created by these currents, forms a desired information-bearing signal in the winding of a special sensor installed outside a pipeline; the signal's form and amplitude depend on the mechanical integrity of the pipeline. In the proposed technology, the creation of relative motion of the sensor and the controlled unit of equipment is provided by rotating a pipe or by orbital revolution of the sensor.

During experimental testing of the method, the constant signals with amplitude of 5 V – 50 mV, depending on the experiment conditions, were obtained with a minimum linear ground speed of a simulated defect to the sensor's work surface of 1–5 m/s, without using any amplifying devices. The amplitude and form of obtained signals depend on the nature of the simulated defect, the model rotational speed, and the distance between the sensor's work surface and the pipe. The resolution capacity of the sensor used in experimental tests was approximately 7–8 mm. This value can be significantly decreased by including the rare-earth metals as sources of the constant magnetic field into the sensor's design.

The main pipelines diagnostics and control can be performed for pipes recommended for use by the regulatory documents of Gazprom PJSC.

The proposed modified eddy current method of non-destructive testing and diagnostics of the integrity of oil and gas pipelines can be used both during their production and during their operation. The obtained experimental data and the comparative analysis showed that it is economically expedient to use the method to solve problems with operational integrity and safety of main pipelines of pipeline transport.

**Keywords:** magnetic field, eddy currents, electric signal, magnetic field sensor, mechanical integrity of pipes.

Воздействие различных факторов внутренней и внешней среды на элементы магистрального транспорта углеводородов повышает опасность преждевременного разрушения и выхода трубопроводов из строя [1, 2]. В то же время одной из наиболее актуальных задач нефтегазовой отрасли является обеспечение надежности и безопасности эксплуатации производственных объектов. Количественной мерой единичных свойств надежности являются показатели надежности, из числа которых для многокомпонентных систем наиболее используемым является вероятность безотказной работы, под которой, согласно ГОСТ 53480, понимается вероятность выполнения объектом или системой требуемой функции в заданном интервале времени [3, 4]. При этом подразумевается разбивка систем на отдельные элементы и оценка вероятности безотказной работы каждого из них [4]. Оценка вероятности безотказной работы трубопроводов показывает, что, согласно статистике, наиболее часто выходят из строя участки в местах соединений сварными швами [5, 6]. Предотвратить развитие

аварий можно за счет своевременных и полномасштабных мероприятий по контролю и диагностике магистралей трубопроводов, в том числе с помощью системы аварийной защиты для устранения ситуаций, связанных с разрушением труб и дестабилизацией потока жидкости, газа или их смеси в коммуникационных системах. Для решения этой задачи предлагается использовать разработанную технологию контроля движущихся электропроводящих элементов изделия, основанную на модифицированном вихрековом методе диагностики [7–12].

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Предложенный метод технической диагностики и контроля состоит в следующем. Вблизи контролируемого электропроводящего узла (например, трубопровода, ротора турбины) устанавливают специальное устройство – датчик с намагниченным сердечником, создающий постоянное магнитное поле (рис. 1). Контролируемая деталь или датчик приводятся в движение. Поскольку для фиксированной точки проводящей среды магнитное поле

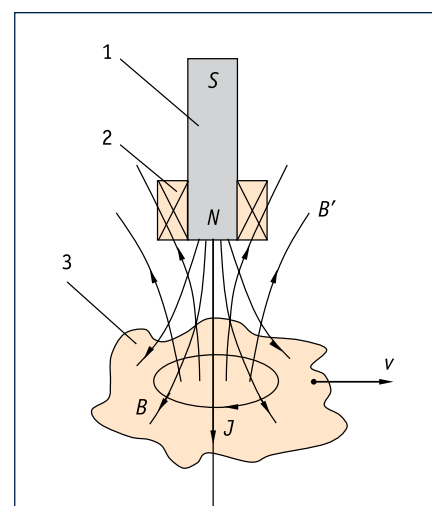


Рис. 1. Схема применения модифицированного вихрековом методе диагностики:

1 – постоянный магнит; 2 – измерительная катушка; 3 – контролируемый элемент

Fig. 1. Application diagram of the modified eddy current diagnostics method:

1 – constant magnet; 2 – measuring coil; 3 – controlled element

переменное, в ней согласно уравнению Максвелла  $\text{rot}E = -\partial B/\partial t$  наводится вихревое электрическое поле. В соответствии с законом Ома  $J = \gamma E$  в зоне

Ссылка для цитирования (for citation):

Володин П.В., Коваленко С.М., Коршаковский С.И. Контроль механической целостности магистралей трубопроводного транспорта // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 11. С. 18–23.

Volodin P.V., Kovalenko S.M., Korshakovskiy S.I. The Mechanical Integrity Control of Main Pipelines of Pipeline Transport (In Russ.). Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2017, No. 11, P. 18–23.

Таблица 1. Технические характеристики индукционных датчиков

Table 1. Technical characteristics of induction sensors

| Тип датчика<br>Sensor type | Наружный диаметр корпуса, мм<br>Frame outside diameter, mm | Высота корпуса с крышкой, мм<br>Frame height with a cap, mm | Диаметр провода, мм<br>Wire diameter, mm | Число витков<br>Number of coils | Сопротивление обмотки, Ом<br>Winding resistance, ohm |
|----------------------------|--|---|--|---------------------------------|--|
| Д-1<br>D-1                 | 25,5   | 28,5  | 0,065                                    | 2100                            | 280  |
| Д-2<br>D-2                 | 36,0   | 22,5  | 0,065                                    | 3000                            | 443  |

Таблица 2. Параметры сердечников

Table 2. Parameters of cores

| Тип датчика<br>Sensor type | Марка ферромагнетика<br>Ferromagnetic alloy mark | Диаметр, мм<br>Diameter, mm | Длина, мм<br>Length, mm | Индукция на торце, Тл<br>Face induction, T |
|----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------|--|
| Д-1<br>D-1                 | ЮНДК35Т5АА<br>YuNDK35T5AA                        | 10                          | 67                      | 0,067                                      |
| Д-2<br>D-2                 | ЮНДК35Т5АА<br>YuNDK35T5AA                        | 10                          | 91                      | 0,086                                      |

контроля возникают замкнутые вихревые токи с плотностью  $J$ , зависящие от удельной электрической проводимости среды  $\gamma$ , скорости движения  $v$ , индукции магнитного поля  $B$ . Эти вихревые токи создают собственное (вторичное) магнитное поле с индукцией  $B'$ , подчиняющейся уравнению Максвелла  $\text{rot} B' = J + \partial D / \partial t$ , где слагаемым  $\partial D / \partial t$  при сравнительно малых частотах вращения объекта (до 400–600 об/с) можно пренебречь. Переменное потокоцепление  $\psi$  в измерительной катушке датчика согласно закону электромагнитной индукции Фарадея  $e_i = -d\psi/dt$  создает в ней напряжение, равное  $e_i$ , а сам датчик может быть установлен снаружи на корпусе изделия. Таким образом, в зоне контроля индуцируются вихревые токи, магнитное поле которых связано с возможными механическими нарушениями структуры контролируемого элемента изделия. Если в процессе ее испытания или эксплуатации изделия в ней возникает дефект, например трещина, то сигналы с датчика будут отличаться от сигналов в отсутствие дефекта. Сравнение этих сигналов по форме и амплитуде дает возможность судить о механической целостности контролируемой детали.

Конструкции датчиков предусматривают их установку как на неподвижную, так и на подвижную платформу. В первом случае контролируемый



Рис. 2. Экспериментальная установка

Fig. 2. Test facility

объект (труба) приводится во вращение, например, при приемосдаточных испытаниях в заводских условиях. Во втором случае в движение приводится датчик. При этом диагностика изделия может быть выполнена с помощью реализующих технологию орбитального контроля механической целостности компактных автоматов, которые используются при контактной орбитальной сварке труб [5, 6]. В зависимости от условий реализации технологических операций применяют рекомендованные нормативными документами ПАО «Газпром» трубы из углеродистых, низкоуглеродистых и низколегированных, высоколегированных аустенитных сталей. Помимо трубопроводов большого диаметра (до 1420 мм) на компрессорных станциях, играющих важную роль в Единой системе газоснабжения России, для транспортировки газа ис-

пользуется целый ряд трубопроводов малого диаметра – от 18 до 219 мм с толщиной стенок 3–4 мм. Это, в свою очередь, диктует необходимость разработки оптимального конструктивного облика датчика.

Экспериментальная проверка работоспособности модифицированного вихревого метода диагностики для решения проблемы контроля трубопроводов проводилась на испытательном стенде кафедры вычислительной техники МИРЭА. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

Установка содержит: трубу из сплава Д16Т длиной 1 м с наружным диаметром 50 мм и толщиной стенок 4 мм, закрепленную на концах с помощью фланцев в подшипниках; электродвигатель, имеющий 2800 об/мин, ременную передачу, позволяющую ступенчато увеличивать частоту вращения трубы с коэффициентом передачи от 1 до 5; датчик, параметры которого приведены в табл. 1 и 2; устройство для крепления датчика с подвижной платформой, позволяющей регулировать расстояние между рабочей поверхностью датчика и трубой от 0 до 30 мм; компьютер; линии связи.

Сигнал с датчика подавался на вход звуковой платы компьютера (Realtek AC97). Далее этот сигнал обрабатывался по стандартной программе в реальном

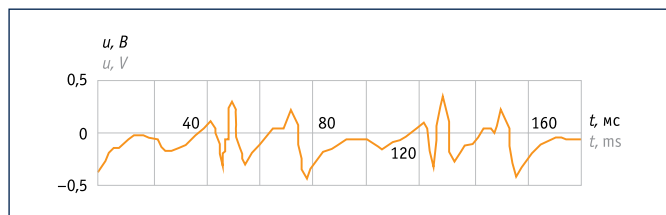


Рис. 3. Осциллограмма сигнала с датчика: имитация дефекта в виде отверстия:

$d = 2 \text{ мм}; D = 2 \text{ мм}$

Fig. 3. Oscillogram of a signal from the sensor: imitation of a hole-shaped defect:

$d = 2 \text{ мм}; D = 2 \text{ мм}$

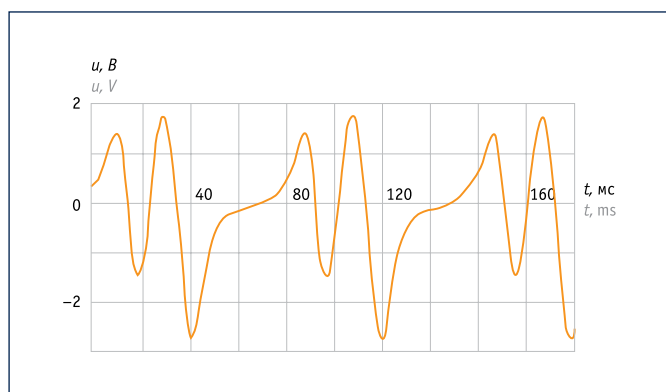


Рис. 4. Осциллограмма сигнала с датчика: имитация дефекта в виде щели ( $d = 7 \text{ мм}$ )

Fig. 4. Oscillogram of a signal from the sensor: imitation of a crack-shaped defect ( $d = 7 \text{ мм}$ )

времени, записывался на магнитный носитель информации и выводился на монитор.

Для имитации дефектов в трубе были проделаны отверстия диаметром 1–10 мм, щели шириной 1,5 мм и длиной ~25 мм, вмятины в форме углублений, а также поперечный сварной шов с моделированием его повреждения в виде сквозного пропила шириной 1,5 мм и длиной ~25 мм. В экспериментах использовались также трубы из низкоуглеродистой стали. Полученный сигнал является сложной суперпозицией в пространстве и во времени сигналов электродвижущей силы (ЭДС) электромагнитной индукции, созданных вторичным магнитным полем вихревых токов от каждого элемента объема в рабочей зоне действия внешнего магнитного поля датчика. Генерирование этих сигналов в измерительной катушке датчика сопровождается электродинамическими эффектами, обусловленными фундаментальными физическими законами [13]. Несмотря на то что эти процессы во вращающейся трубе и в последовательно расположенных друг за другом уступах (выступах) при их движении идентичны, форма сигналов существенно отличается от случаев, рассмотренных в [13]. Ожидаемая форма этого сигнала при возникновении дефекта зависит от многих факторов, в первую очередь – от ширины зоны действия первичного магнитного поля, определяемой прежде всего геометрическими параметрами источника поля датчика. При этом, например,

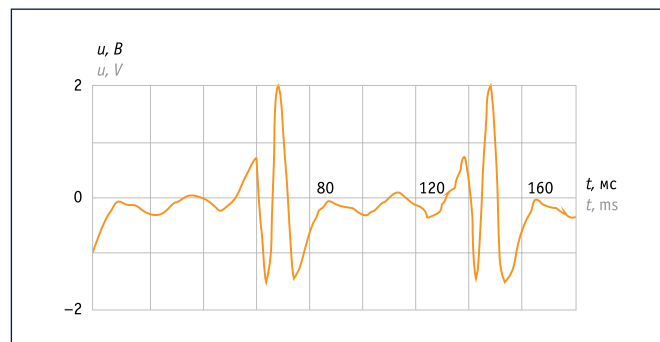


Рис. 5. Осциллограмма сигнала с датчика: имитация дефекта в виде пяти отверстий по окружности цилиндра с шагом 4 мм ( $d = 3 \text{ мм}; D = 2 \text{ мм}$ )

Fig. 5. Oscillogram of a signal from the sensor: imitation of a defect in the form of five holes around the circumference of a cylinder spaced at intervals of 4 mm ( $d = 3 \text{ мм}; D = 2 \text{ мм}$ )

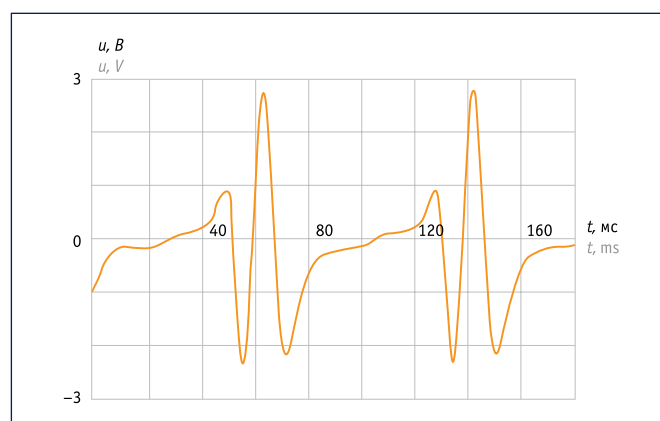


Рис. 6. Осциллограмма сигнала с датчика: имитация дефекта в виде пяти отверстий по окружности цилиндра с шагом 7 мм ( $d = 1 \text{ мм}; D = 5 \text{ мм}$ )

Fig. 6. Oscillogram of a signal from the sensor: imitation of a defect in the form of five holes around the circumference of a cylinder spaced at intervals of 7 mm ( $d = 1 \text{ мм}; D = 5 \text{ мм}$ )

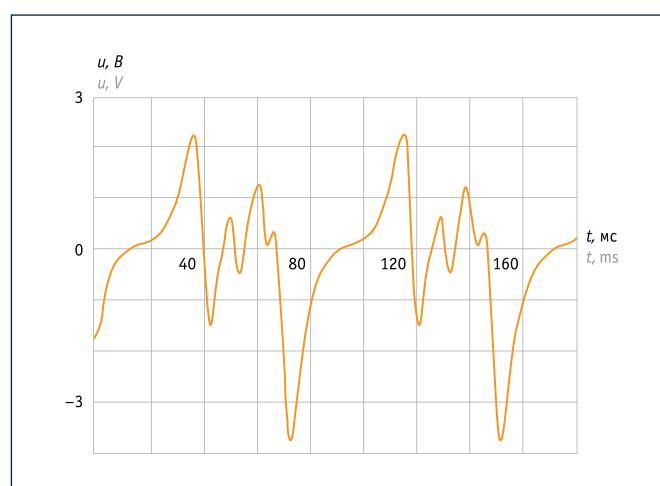


Рис. 7. Осциллограмма сигнала с датчика: имитация дефекта в виде пяти отверстий по окружности цилиндра с шагом 12 мм ( $d = 7 \text{ мм}; D = 10 \text{ мм}$ )

Fig. 7. Oscillogram of a signal from the sensor: imitation of a defect in the form of five holes around the circumference of a cylinder spaced at intervals of 12 mm ( $d = 7 \text{ мм}; D = 10 \text{ мм}$ )

Таблица 3. Сравнение используемых методов неразрушающего контроля

Table 3. Comparison of the used non-destructive testing methods

| Параметр сравнения<br>Comparison parameter   | Методы диагностики<br>Diagnostic methods  |   |   |
|--|---|---|---|
|  | Вихретоковый<br>Eddy current  | Ультразвуковой<br>Ultrasound  | Рентген<br>X-ray  |
| Объем первоначальных инвестиций в приобретение комплексов диагностики<br>Volume of initial investments into the acquisition of the diagnostics package | Низкий. Приобретается программно-аппаратный комплекс, состоящий из датчика и пакета программ для ПК<br>Low. One acquires a hardware and software package consisted of a sensor and a software package for PC    | Средний. Приобретается специальный программно-аппаратный комплекс<br>Medium. One acquires a specialized hardware and software package   | Высокий. Приобретаются специальное оборудование и средства его транспортировки<br>High. One acquires specialized equipment and means for its transportation   |
| Объем затрат на содержание и эксплуатацию комплекса диагностики<br>Expenses on the maintenance and operation of the diagnostics package                | Низкий. Датчик, вышедший из строя, заменяется новым. Пакет программ может быть установлен на любом ПК<br>Low. An out-of-order sensor is replaced by a new one. A software package can be installed on every PC  | Средний. Комплекс диагностики требует поверки на регулярной основе с использованием специального оборудования<br>Medium. A diagnostics package requires calibration with the use of specialized equipment on a regular basis  | Высокий. Требуется обслуживание как самого специального оборудования, так и средств транспортировки<br>High. Both specialized equipment and means for its transportation require maintenance                |
| Человеческие ресурсы<br>Human resources  | Контроль может осуществлять один человек<br>One man can exercise control  | Контроль может осуществлять один человек<br>One man can exercise control  | Контроль может осуществляться несколькими людьми<br>Several persons can exercise control  |
| Экологическая безопасность<br>Environmental safety   | Безопасен. Использует электрическую энергию для питания. Не производит вредных выбросов и излучений<br>Safe. It uses electric energy for power supply. It does not produce any hazardous emission and radiation | Условно безопасен. Использует электрическую энергию для питания. Не производит вредных выбросов. В процессе работы генерируется УЗ-излучение<br>Relatively safe. It uses electric energy for power supply. It does not produce any hazardous emission. Ultrasonic radiation is generated during operation | Условно безопасен. Используются радиоактивные элементы. Системы транспортировки используют углеводородное топливо<br>Relatively safe. Radioactive elements are used. Transport systems use hydrocarbon fuel |

сигнал, полученный от единичного отверстия или щели (в форме пропила) не симметричен относительно момента прохождения дефекта оси датчика (при полной симметрии магнитного поля). При достаточно малом радиусе трубы и широкой зоне действия магнитного поля, а также значительных размерах катушки имеет место отмеченная асимметрия сигнала. Для устранения этого эффекта целесообразно уменьшить габаритные размеры датчика с переходом на источник магнитного поля с использованием редкоземельных металлов [14, 15]. Это позволит также увеличить разрешающую способность датчика. В проведенных исследованиях она составляла около 7–8 мм.

На рис. 3–7 представлены некоторые результаты экспериментального исследования при обработке предложенного метода контроля механической целостности труб ( $u_m$  – амплитуда сигнала,  $d$  – расстояние между датчиком и трубой,  $D$  – диаметр отверстия; масштабная единица по оси времени равна 20 мВ).

Во всех проведенных опытах получены устойчивые сигналы электромагнитной индукции без использования усилительных средств. Амплитуда сигналов в зависимости от расстояния между датчиком и трубой (2–25 мм) составляла 5 В – 50 мВ. С увеличением размера дефекта амплитуда увеличивается. Проведенные исследования показали работоспособность предложенного способа неразрушающего контроля. Дальнейшее развитие метода связано с совершенствованием конструкции датчика и системы сбора данных, а также с созданием базы данных характерных дефектов в трубопроводе, проведением экспериментальных исследований на натуральных объектах в целях отработки метода.

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Подавляющее большинство современных систем неразрушающего контроля, применяемых в нефтегазовой

отрасли, используют контроль на основе ультразвука или ионизирующего рентгеновского излучения. У этих систем есть как свои преимущества, так и недостатки. К числу последних можно отнести сложность диагностического оборудования и его высокую стоимость. Так, например, системы неразрушающего контроля для нефтегазовой отрасли, использующие ионизирующее излучение, представляют собой аппаратный комплекс, размещаемый на автомобильной платформе. Более детальная информация представлена в табл. 3.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно утверждать, что вихретоковые системы неразрушающего контроля являются достойной и недорогой альтернативой традиционно используемым в нефтегазовой отрасли рентген-установкам. Разумеется, вихретоковые системы неразрушающего контроля не могут полностью заменить традиционные системы. Од-

нако благодаря своей компактности и высокой надежности они способны стать эффективным и надежным инструментом для решения большого числа производственных задач. В совокупности с невысокой стоимостью вихретоковых систем и простотой работы это может позволить предприятиям нефтегазового сектора снизить расходы как на приобретение и обслуживание оборудования, так и на оплату выполнения работ.

## Литература:

1. Ямалеев К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов. М.: ВНИИОЭНГ, 1990. 64 с.
2. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков Ю.А., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. М.: Недра-бизнесцентр, 2001. Ч. 2. 343 с.
3. ГОСТ Р 53480–2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2010. 32 с.
4. Елагина О.Ю., Вышегородцев Г.И., Гантимиров Б.М. и др. Прогнозирование вероятности безотказной работы газораспределительных сетей с использованием показателей технического состояния отдельных элементов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2012. № 3. С. 22–27.
5. Шипилов А.В. Особенности автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом в аргоне трубопроводов малого диаметра из низкоуглеродистых сталей // Сварка и диагностика. 2010. № 5. С. 42–47.
6. Шипилов А.В., Вышемирский Е.М., Полосков С.И. Технические требования к технологиям и оборудованию для автоматической орбитальной сварки трубопроводов малых диаметров на компрессорных станциях // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2012. № 3. С. 58–61.
7. Додонова Л.Г., Коршаковский С.И., Красненков М.А., Соловьев В.А. Способ контроля целостности электропроводных элементов изделия. Авторское свидетельство СССР № 1829620, 1992. БИ № 37.
8. Коршаковский С.И., Красненков М.А., Маклашевский В.Я. Индукционный метод неразрушающего контроля электропроводных изделий в динамическом режиме. М.: Машиностроение, 1997. Т. 3. С. 14–15.
9. Коршаковский С.И., Красненков М.А. Способ неразрушающего контроля для создания системы управления и аварийной защиты энергоемких технических объектов // Контроль. Диагностика. 2008. № 4 (118). С. 51–56.
10. Патент RU № 2125276. Индукционный датчик / С.И. Коршаковский, М.А. Красненков, В.Я. Маклашевский, Ю.Г. Путников [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2125276> (дата обращения: 03.11.2017).
11. Патент RU № 2151390. Устройство для регистрации механических разрушений лопаток ротора турбины / С.И. Коршаковский, М.А. Красненков, В.Я. Маклашевский [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2151390> (дата обращения: 03.11.2017).
12. Красненков М.А., Коршаковский С.И., Коршаковский К.С. Повышение эффективности инструментальных средств обеспечения неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2012. № 4 (166). С. 23–36.
13. Коршаковский С.И., Красненков М.А. Формирование электрических сигналов при неразрушающем контроле элементов турбин в авиационной и космической технике // Вестник МАИ. 2008. Т. 15. № 4. С. 118–125.
14. Сергеев В.В., Булыгина Т.И. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.
15. Белов К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980. 240 с.
16. Михайлов В.А., Андреев Е.Д., Желтов В.П. и др. Основы теории систем и решения творческих технических задач. Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та имени И.Н. Ульянова, 2012. 387 с.

## References:

1. Yamaleev K.M. Pipe Metal Aging during the Operation of Oil Pipelines. Moscow, All-Russian Research Institute for the Organization, Management and Economics of the Oil and Gas Industry, 1990, 64 p. (In Russian)
2. Lanchakov G.A., Zorin E.E., Pashkov Yu.A., Stepanenko A.I. Working Capacity of Pipelines. Moscow, Nedra-Business Center, 2001, P. 2, 343 p. (In Russian)
3. Russian National Standard GOST R 53480–2009. Reliability in Engineering. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform, 2010, 32 p. (In Russian)
4. Elagina O.Yu., Vyshgorodtsev G.I., Gantimirov B.M., Tarasov V.V., Konovalov N.N., Sergeev A.A. Forecasting the Probability of Fault-Free Operation of Gas Distribution Networks with the Use of Technical State Values of Separate Elements. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2012, No. 3, P. 22–27. (In Russian)
5. Shipilov A.V. Peculiarities of Automatic Orbital Welding with a Nonconsumable Argon Electrode of Small-Diameter Pipes Made from Low-Carbon Steels. Svarka i Diagnostika = Welding and Diagnostics, 2010, No. 5, P. 42–47. (In Russian)
6. Shipilov A.V., Vyshemirsky E.M., Poloskov S.I. Technical Requirements to Technologies and Equipment for Automatic Orbit Welding of Small-Diameter Pipelines at Compressor Stations. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2012, No. 3, P. 58–61. (In Russian)
7. Dodonova L.G., Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A., Solovjev V.A. Method for Controlling the Integrity of Electrically-Conductive Elements of the Unit of Equipment. USSR Certificate of Authorship No. 1829620, 1992, Bulletin Issue No. 37. (In Russian)
8. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A., Maklashevsky V.Ya. Induction Method of Non-Destructive Testing of Electrically-Conductive Elements of the Unit of Equipment in the Dynamic Mode. Moscow, Machine Engineering, 1997, Vol. 3, P. 14–15. (In Russian)
9. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A. New Technology of Non-Destructive Testing for Leading and Alarm Systems of Powerful Technical Objects. Kontrol. Diagnostika = Control. Diagnostics, 2008, No. 4 (118), P. 51–56. (In Russian)
10. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A., Maklashevsky V.Ya., Putnikov Yu.G. Patent RU No. 2125276. Induction Sensor [Electronic source]. Access mode: <http://www.freepatent.ru/patents/2125276> (Access date: November 3, 2017). (In Russian)
11. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A., Maklashevsky V.Ya. Patent RU No. 2151390. A Device for Registering Mechanical Break-Downs of Turbine Rotor Blades [Electronic source]. Access mode: <http://www.freepatent.ru/patents/2151390> (Access date: November 3, 2017). (In Russian)
12. Krasnenkov M.A., Korshakovsky S.I., Korshakovsky K.S. Improving the Effectiveness of Tools to Ensure Non-Destructive Testing. Kontrol. Diagnostika = Control. Diagnostics, 2012, No. 4 (166), P. 23–36. (In Russian)
13. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A. Formation of Electric Signals during the Non-Destructive Testing of Turbine Elements in the Aviation and Space Engineering. Vestnik MAI = Bulletin of Moscow Aviation Institute, 2008, Vol. 15, No. 4, P. 118–125. (In Russian)
14. Sergeev V.V., Bulygina T.I. Hard-Magnetic Materials. Moscow, Energetika, 1980, 224 p. (In Russian)
15. Belov K.P. Rare-Earth Magnetics and their Application. Moscow, Nauka, 1980, 240 p. (In Russian)
16. Mikhaylov V.A., Andreev E.D., Zheltov V.P., Gal'etov V.P. Fundamentals of the Systems Theory and Solving Creative Engineering Tasks. Cheboksary, Publishing House of Ulianov Chuvash State University, 2012, 387 p. (In Russian)