

---

---

# ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

---

УДК 620.179.16, 620.1.051  
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-798-804

## РОБОТИЗИРОВАННЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

С. Н. СОМОВ, Г. В. БАРАНОВ, М. А. ПОЛЯШОВ, А. А. ПЫРКИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: s.somov@corp.ifmo.ru*

Представлен роботизированный комплекс для диагностики состояния трубопроводов и сварных соединений. В состав комплекса входят роботизированное средство доставки, датчик, выполненный по технологии фазированных антенных решеток с электромагнитно-акустическими преобразователями, а также система удаленного управления. Отличительные особенности разработанного комплекса — проведение диагностирования без предварительной обработки от загрязнения исследуемой поверхности металла трубопровода и автоматизированное удаленное управление роботом-дефектоскопом по беспроводному каналу связи.

***Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, внутритрубная ультразвуковая диагностика, неразрушающий контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, роботизированный дефектоскоп*

**Введение.** Обширная сеть трубопроводов, компрессорных и насосных станций, существующая на сегодняшний день в мире, предназначена для транспортировки и хранения сырой нефти и природного газа. Большинство используемых трубопроводов, как правило, претерпевают разрушение и деформацию, что обусловлено дефектами, которые вызваны коррозией, старением и механическими повреждениями, а также несоблюдением технологических процессов при изготовлении труб. При несвоевременных диагностике и устранении указанные дефекты могут стать причиной техногенных аварий и катастроф на производственных объектах. В связи с этим актуальной является задача диагностирования труб и сварных соединений без вскрытия труб и их замены с целью своевременного предупредительного ремонта.

К основным современным методам неразрушающего контроля (НК) в области дефектоскопии можно отнести акустические, молекулярные, радиационные, радиоволновые, магнитные и электромагнитные [1—7]. Наиболее широкое распространение получили акустические методы контроля металла и металлоизделий. Эти методы используются в дефектоскопах, обеспечивающих визуализацию внутренней структуры материала. Такой подход позволяет исследовать сечение сварного соединения и определить тип дефекта и его координаты при возбуждении ультразвуковой (УЗ) волны в области шва при различных углах ввода. Для возбуждения и приема УЗ-колебаний в диагностике используются лазеры [8] либо фазированные антенные решетки (ФАР), выполняемые, как правило, на УЗ-пьезопреобразователях [9]. С помощью лазерного метода возбуждение и прием УЗ-волн может производиться на достаточно большом расстоянии (несколько метров) от объекта контроля. Однако этот метод тре-

бует применения мощных лазеров, использование которых может быть недопустимо с точки зрения безопасности. Кроме того, для проведения точной диагностики требуется тщательная обработка участка поверхности объекта контроля от загрязнений, так как из-за их наличия энергия лазера будет рассеиваться, что приведет к ослаблению принимаемых эхосигналов. Использование широко применяемых ФАР на пьезопреобразователях требует подготовки рабочей поверхности объекта контроля и непосредственного контакта с применением специальных жидкостей. К недостаткам следует отнести и дороговизну таких датчиков.

Один из новых способов диагностики — использование ФАР, выполненных на электромагнитно-акустических преобразователях (ЭМАП) [10]. Отличительной особенностью применения датчиков ЭМАП-ФАР является возможность проведения диагностики без предварительной зачистки поверхности исследуемых труб.

Рассмотрим некоторые технические решения на рынке приборов и систем НК для ультразвуковой диагностики металла и сварных соединений. В настоящее время роботизированные дефектоскопы с ФАР на базе ЭМАП не имеют широкого распространения на практике. Известные системы на антенных решетках, например, роботизированный УЗ-сканер-дефектоскоп УСД-60-8К [11], TVP128 (Eclipse Scientific Inc) [12] и сканер-дефектоскоп A2072 (IntroScan) [13] работают с применением пьезоэлектрических преобразователей или акустических датчиков с сухим точечным контактом. Использование таких дефектоскопов осложняет диагностику из-за дополнительных работ, связанных с очисткой рабочей поверхности от загрязнений. Зазор между объектом контроля и датчиком при использовании этих систем недопустим.

**Роботизированный дефектоскоп.** В настоящей статье представлено конструктивное решение по использованию ФАР на ЭМАП — мобильный роботизированный дефектоскоп, разрабатываемый Университетом ИТМО совместно с АО „Диаконт“ (Санкт-Петербург). Необходимость создания роботизированного дефектоскопа с ФАР на ЭМАП вызвана высокой потребностью в обеспечении безопасности жизнедеятельности и повышении техногенной безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов газовой, нефтяной, химической, атомной и судостроительной отраслей в России и за рубежом. Разрабатываемое конструктивное решение позволяет проводить диагностику в автоматизированном режиме без участия человека непосредственно в области проведения контроля. Общий вид робота с ФАР представлен на рис. 1.

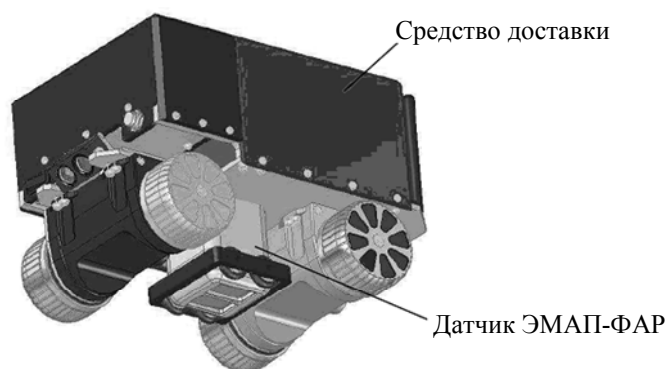


Рис. 1

Робот с ФАР представляет собой автономное средство доставки, оборудованное аккумуляторной батареей и модулем беспроводной связи, что позволяет оператору работать удаленно от места проведения контроля. Для проведения сплошного визуального контроля (100 %-ное покрытие) на роботе установлены телевизионные камеры с осветителями. Для диагностирования различных конфигураций трубопроводов (при различных диаметрах труб) предусмотрен набор сменных датчиков ЭМАП-ФАР, входящих в комплект робота.

*Структура и функциональное назначение элементов.* На рис. 2 представлена схема деления робота с ФАР, демонстрирующая структуру роботизированного комплекса, включающего в себя средство доставки (СД), датчик ЭМАП-ФАР и систему управления. Расположение основных элементов роботизированного дефектоскопа показано на рис. 3: *а* — вид спереди, *б* — вид слева.

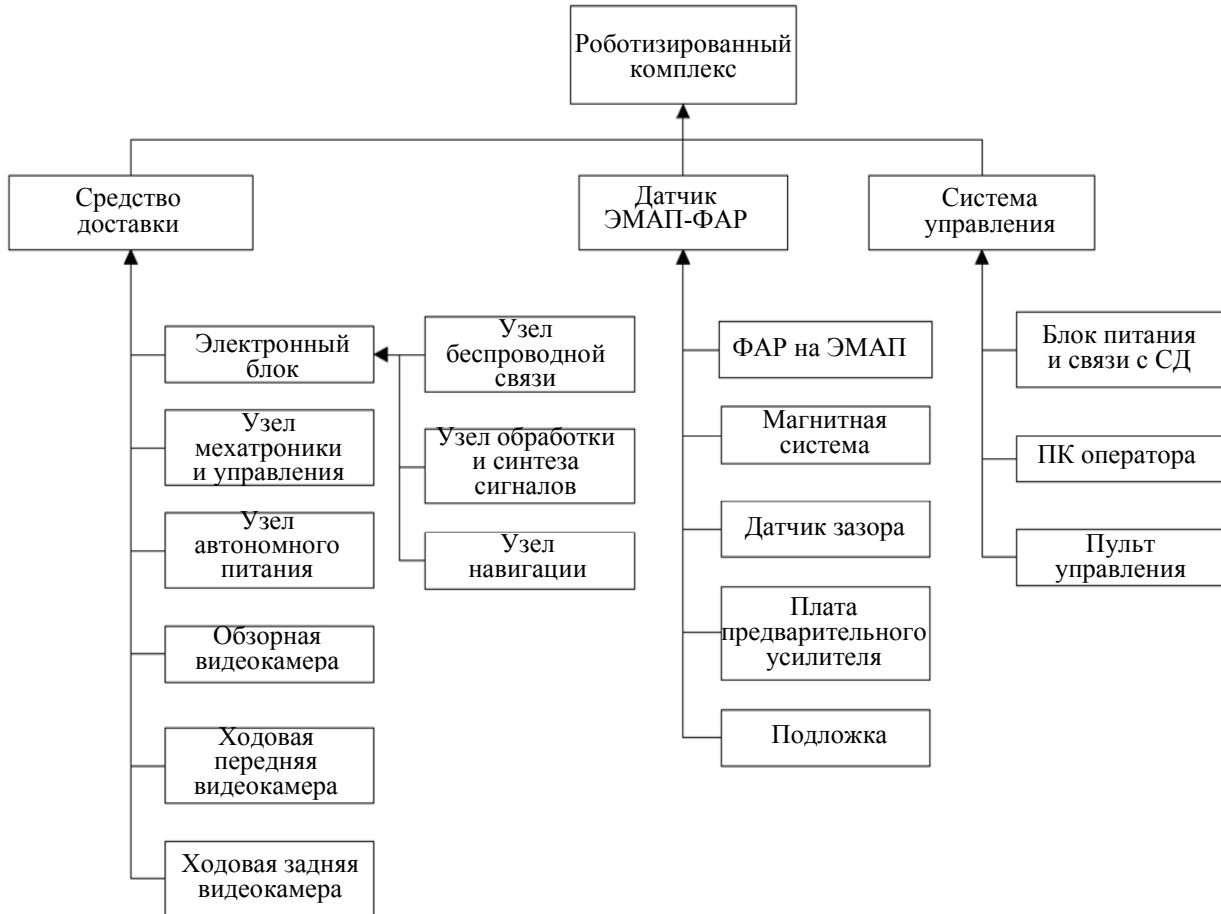


Рис. 2

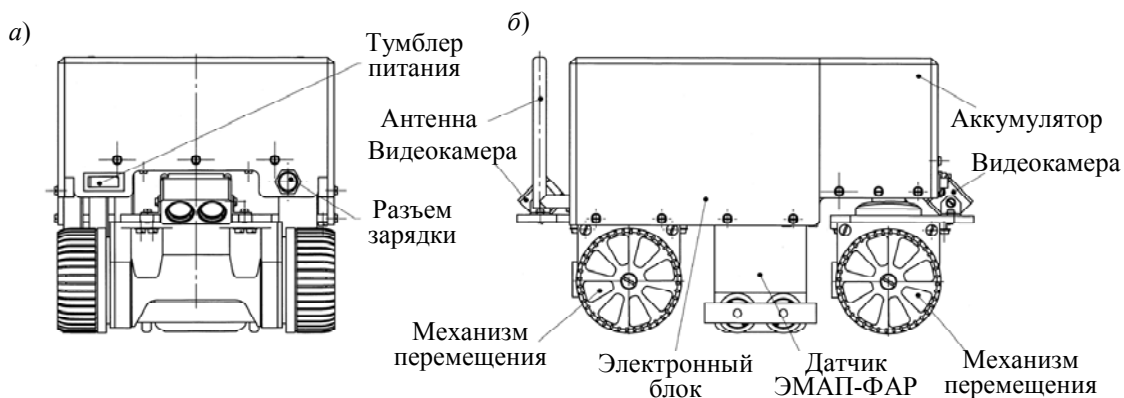


Рис. 3

Средство доставки представляет собой самоходную радиоуправляемую платформу, передвигающуюся по внутренней поверхности трубопровода. Размеры СД не превышают 210 мм по высоте и ширине, что позволяет загружать робота непосредственно через люк-лаз трубопровода. В состав средства доставки входят следующие узлы, блоки и модули: электронный блок, включающий в себя узел навигации, узел обработки и синтеза сигналов, узел

беспроводной связи; узел мехатроники и управления; узел автономного питания; обзорная видеокамера; ходовые передняя и задняя видеокамеры.

Узел навигации представлен модулем 3DM-GX5-15, который выполняет роль трехосевого гироскопа и акселерометра и передает на узел обработки следующие данные: угловое положение робота с ФАР относительно оси трубы, крен и дифферент.

Узел обработки и синтеза сигналов предназначен для управления всеми приводами робота и получение информации от энкодеров хода, модуля навигации, датчиков Холла, датчиков температуры и узла автономного питания. Для обмена данными между системой управления и узлом обработки и синтеза сигналов служит узел беспроводной связи, представляющий собой радиомодуль MOXA AWK-1137C-T.

В состав узла мехатроники и управления входят механизм перемещения, привод подъема датчика ЭМАП-ФАР и силовой модуль питания приводов. Механизм перемещения сконструирован на базе колесного шасси и позволяет обеспечивать движение СД по поверхности труб с толщиной стенок от 6 до 32 мм и условным диаметром от 400 до 1400 мм. Механизм включает в себя 4 магнитных колеса, каждое из которых имеет свой привод, инкрементальный энкодер и датчик Холла, позволяющий контролировать отрыв колес. Привод подъема датчика ЭМАП-ФАР необходим для обеспечения прохождения элементов трубопроводной обвязки и загрузки робота через технологическиерезы без повреждения датчика. Силовой модуль питания приводов представляет собой драйвер привода на микросхемах DRV8814 для управления электромоторами механизма перемещения и подъема датчика ЭМАП-ФАР.

В узел автономного питания включен блок аккумуляторной батареи с контроллером разряда. Блок аккумуляторной батареи, емкость которого составляет около 16 А·ч, отвечает за питание всех узлов, входящих в состав СД. Блок состоит из наборных аккумуляторов типа 18650 Panasonic-Orbtronic 3600 мА·ч или LG 18650 MJ1 3500 мА·ч. Принципиальная схема соединения элементов батареи, состоящая из 40 аккумуляторов, приведена на рис. 4. Контроллер разряда, представляющий собой печатную плату с интегральными микросхемами, контролирует температуру, уровень заряда и разрядный ток аккумуляторной батареи; собранная информация передается в узел обработки и синтеза сигналов. Также контроллер разряда осуществляет подачу напряжения на камеры, осветители и остальные составные элементы СД.

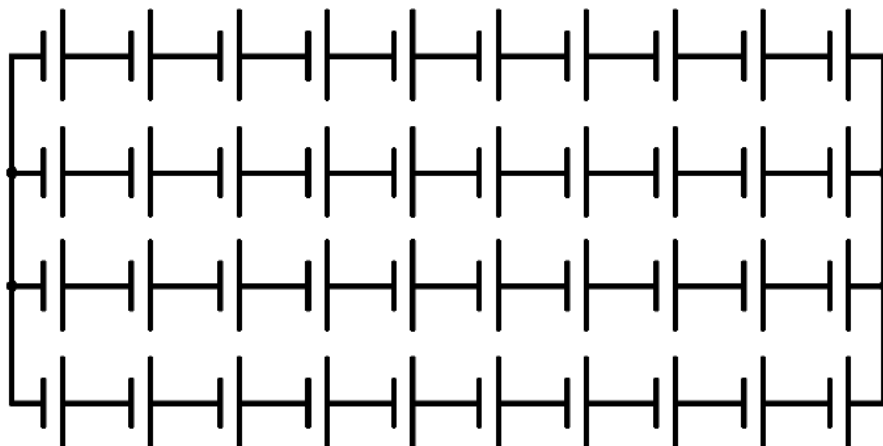


Рис. 4

Для наблюдения за состоянием поверхности труб совместно с датчиком ЭМАП-ФАР применяется обзорная камера MISUMI MO-B8532-3G с внешним осветителем, состоящим из трех светодиодов серии TDS-P001L4. Обзор, достаточный для управления роботом с ФАР, обеспечивается за счет передней и задней ходовых камер MISUMI MO-T933W-P с внешним осветителем, которые работают попеременно в зависимости от направления движения.

Датчик ЭМАП-ФАР служит для ультразвукового обследования кольцевых и продольных сварных соединений внутри трубопроводов и зон термического влияния, а также для

анализа основного металла труб и других конструкций опасных производственных объектов. Датчик ЭМАП-ФАР содержит ФАР на ЭМАП, магнитную систему, датчик зазора, плату предварительного усилителя и подложку (корпус). ФАР на ЭМАП служит для бесконтактно-го возбуждения и приема УЗ-волн в объекте контроля за счет прямого и обратного ЭМА-преобразования. Датчик зазора обеспечивает измерение величины зазора между поверхностью датчика ЭМАП-ФАР и поверхностью трубопровода (в диапазоне от 0 до 3 мм).

Система управления находится в удалении от места проведения работ, что позволяет дистанционно управлять СД и проводить обследование трубопроводов на опасных производственных объектах, а также выводить изображения с видеокамер. В состав системы управления входят блок питания и связи с СД, ПК оператора, а также пульт управления. Блок питания и связи с СД состоит из зарядного устройства аккумуляторной батареи и Wi-Fi-модуля, имеющего выходы с интерфейсом Ethernet для подключения к ПК оператора. ПК оператора с установленным программным обеспечением предназначен для управления и проведения диагностики с помощью робота с ФАР. Пульт управления обеспечивает возможность линейного перемещения СД вперед и назад, а также поворот и разворот; управление переключением камер и включением/отключением осветителей. Пульт управления подключается по беспроводным средствам Wi-Fi или Bluetooth либо через проводное соединение USB.

**Заключение.** Представлено техническое решение в области ультразвукового неразрушающего контроля — роботизированный дефектоскоп, использующий фазированную антенную решетку с ЭМА-преобразователем. Предложенный роботизированный комплекс может быть использован для контроля труднодоступных сварных соединений и металлоконструкций опасных производственных объектов в нефтегазовой и химической промышленности, энергетике и ЖКХ.

Разработанная конструкция робота с ФАР обеспечивает возможность проведения диагностики как основного металла, так и сварного соединения и околошовной зоны. Таким образом, робот может применяться для диагностики состояния и трубопроводов, и других металлоконструкций, например стенок резервуаров, бортов нефтетанкеров, газозовозов, химических хранилищ. Благодаря использованию аккумуляторной батареи, встроенной в средство доставки, разработанный беспроводной дефектоскоп обладает автономностью, что позволяет снять ограничения, налагаемые кабельными линиями связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 074-11-2018-029 от 13 июля 2018 г.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003.
2. Афанасьева В. Б., Чернова Н. В. Современные методы неразрушающего контроля // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 73—74.
3. Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И. Диагностика технических устройств. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
4. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: Учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2006. 368 с.
5. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Metallurgia, 1985. 256 с.
6. Коновалов Н. Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений: Учеб. пособие. М.: НТЦ „Промышленная безопасность“, 2006.
7. Сравнительная таблица методов неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: <<http://oocalis.ru/interesting/52-metody-nk.html>>.

8. Реди Дж. Промышленное применение лазеров. М.: Мир, 1986. 468 с.
9. Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектах // В мире НК. 2011. № 1(51). С. 64—70.
10. Базылев Д. Н., Романович В. А., Сомов С. Н., Пыркин А. А. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1060—1066.
11. УЗ-сканер-дефектоскоп УСД-60-8К (НПЦ „Кропус“) [Электронный ресурс]: <[http://www.kropus.com/catalog/ultrazvukovoy-i-akusticheskiy-kontrol/ultrazvukovye-defektoskopy/mekhanizirovannyy kontrol/skaner\\_defektoskop\\_dlya\\_uz\\_kontrolya\\_svarnykh\\_shvov\\_usd\\_60\\_8k\\_weldspector](http://www.kropus.com/catalog/ultrazvukovoy-i-akusticheskiy-kontrol/ultrazvukovye-defektoskopy/mekhanizirovannyy kontrol/skaner_defektoskop_dlya_uz_kontrolya_svarnykh_shvov_usd_60_8k_weldspector)>.
12. TVP128 (Eclipse Scientific Inc) [Электронный ресурс]: <<http://www.panatest.ru/items?id=100408>>.
13. Сканер-дефектоскоп А2072 (IntroScan) [Электронный ресурс]: <<http://www.acsys.ru/production/detail/vnutritrubnyu-avtonomnyy-robotizirovannyy-skaner-defektoskop-a2072-introscan>>.

#### Сведения об авторах

- Сергей Николаевич Сомов** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: s.somov@corp.ifmo.ru
- Григорий Викторович Баранов** — студент; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: grish\_bar97@mail.ru
- Максим Андреевич Поляшов** — студент; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: polyashovmaxim@yandex.ru
- Антон Александрович Пыркин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; декан; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Поступила в редакцию  
21.05.19 г.

**Ссылка для цитирования:** Сомов С. Н., Баранов Г. В., Поляшов М. А., Пыркин А. А. Роботизированный дефектоскоп для диагностики состояния трубопроводов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 798—804.

## ROBOTIC DEFECTOSCOPE FOR DIAGNOSTIC OF PIPELINES STATE

S. N. Somov, G. V. Baranov, M. A. Polyashov, A. A. Pyrkin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: s.somov@corp.ifmo.ru

A robotic complex for diagnosing the condition of pipelines and welded joints is presented. The structure of the complex includes a robotic delivery vehicle, a sensor made by the technology of phased antenna arrays with electromagnetic-acoustic converters and a remote-control system. Distinctive features of the developed complex are diagnostics without prior cleaning of the tested metal surface of the pipeline and an automated remote control of the flaw detector by wireless communication channel.

**Keywords:** phased array of antennas, in-tube ultrasonic diagnostics, non-destructive testing, electromagnetic-acoustic converter, robotic flaw detector

### REFERENCES

1. Sosnin F.R., Kovalev A.V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik* (Non-Destructive Testing and Diagnostics: Reference), Moscow, 2003. (in Russ.)
2. Afanas'yeva V.B., Chernova N.V. *Advances in Current Natural Sciences*, 2011, no. 7, pp. 73–74. (in Russ.)
3. Bigus G.A., Daniyev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. *Diagnostika tekhnicheskikh ustroystv* (Diagnostics of Technical Devices), Moscow, 2014, 615 p. (in Russ.)
4. Aleshin N.P. *Fizicheskiye metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soyedineniy* (Physical Methods of Non-Destructive Testing of Welded Joints), Moscow, 2006, 368 p. (in Russ.)
5. Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya* (Ultrasonic Flaw Detection), Moscow, 1985, 256 p. (in Russ.)
6. Konovalov N.N. *Normirovaniye defektov i dostovernost' nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soyedineniy* (Rationing of Defects and Reliability of Non-Destructive Testing of Welded Joints),

- Moscow, 2006. (in Russ.)
7. <http://oocalis.ru/interesting/52-metody-nk.html>. (in Russ.)
  8. Ready J.F. *Industrial Application of Lasers*, Elsevier, 1997, 599 p.
  9. Voronkov V.A., Voronkov I.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. *V mire nerazrushayushchego kontrolya (V mire NK)*, 2011, no. 1(51), pp. 64–70. (in Russ.)
  10. Bazylev D.N., Romanovich V.A., Somov S.N., Pyrkin A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 12(61), pp. 1060–1066. (in Russ.)
  11. [http://www.kropus.com/catalog/ultrazvukovoy-i-akusticheskiy-kontrol/ultrazvukovye-defektoskopy/mekhanizirovannyi-kontrol/skaner-defektoskop\\_dlya\\_uz\\_kontrolya\\_svarnykh\\_shvov\\_usd\\_60\\_8k\\_weldspector](http://www.kropus.com/catalog/ultrazvukovoy-i-akusticheskiy-kontrol/ultrazvukovye-defektoskopy/mekhanizirovannyi-kontrol/skaner-defektoskop_dlya_uz_kontrolya_svarnykh_shvov_usd_60_8k_weldspector). (in Russ.)
  12. TVP128 (Eclipse Scientific Inc), <http://www.panatest.ru/items?id=100408>.
  13. <http://www.acsys.ru/production/detail/vnutritrubnyy-avtonomnyy-robotizirovannyi-skaner-defektoskop-a2072-introscan>. (in Russ.)

**Data on authors**

- Sergey N. Somov** — ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: s.somov@corp.ifmo.ru
- Grigoriy V. Baranov** — Student; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: grish\_bar97@mail.ru
- Maxim A. Polyashov** — Student; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: polyashovmaxim@yandex.ru
- Anton A. Pyrkin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; Dean of the Faculty; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

**For citation:** Somov S. N., Baranov G. V., Polyashov M. A., Pyrkin A. A. Robotic defectoscope for diagnostic of pipelines state. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 798—804 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-798-804