

УДК 658.512.2+004.31

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.008)

Конструктивные и мехатронные аспекты разработки роботизированного устройства для оценки геометрических дефектов трубопроводов

И.И. Хасанов✉

*Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва,
Российская Федерация*

Резюме. Надежная эксплуатация трубопроводных систем малого диаметра представляет собой важную задачу в обеспечении технологической безопасности производственных объектов, работающих под воздействием высоких температур и давлений. Одним из ключевых факторов, влияющих на возникновение аварийных ситуаций, является утонение стенок труб, вызванное эрозией, коррозией, а также коррозионным растрескиванием под напряжением. В условиях ограниченного пространства и невозможности применения стандартных средств неразрушающего контроля возрастает потребность в разработке компактных автоматизированных решений для внутренней диагностики геометрических параметров трубопроводов. В работе представлена разработка и экспериментальное исследование роботизированного диагностического устройства, предназначенного для внутреннего сканирования труб с минимальным диаметром проходного сечения 130 мм. Устройство представляет собой мехатронную систему с восемью ведущими колесами, приводимыми в движение мотор-редукторами, и управляется микрокомпьютером Raspberry Pi 3. Конструкция корпуса выполнена с использованием аддитивных технологий и включает модули измерения и питания, размещенные в отдельных секциях. Проведены лабораторные испытания, подтверждающие работоспособность устройства и алгоритмов его управления. Разработанный программный комплекс обеспечивает автономное движение устройства, сбор и запись диагностических данных. Полученные результаты позволяют формировать детализированную геометрию трубопровода, выявлять участки с повышенным уровнем овальности и деформаций, что имеет важное значение для оценки остаточного ресурса. Разработанное решение может применяться как в исследовательских задачах, так и в составе промышленных систем неразрушающего контроля труб малого диаметра.

Ключевые слова: моделирование, диагностическое устройство, мехатроника, контроль, дефекты, роботизированная система, трубопроводы малого диаметра.

Для цитирования: Хасанов И.И. Конструктивные и мехатронные аспекты разработки роботизированного устройства для оценки геометрических дефектов трубопроводов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1934> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.008

Structural and mechatronic aspects of the development of a robotic device for assessing geometric defects of pipelines

I.I. Khasanov✉

*Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow,
the Russian Federation*

Abstract. Reliable operation of small-diameter pipeline systems is an important task in ensuring the process safety of industrial facilities operating under high temperatures and pressures. One of the key factors influencing the occurrence of emergency situations is the thinning of pipe walls caused by

erosion, corrosion, and stress corrosion cracking. In conditions of limited space and the impossibility of using standard non-destructive testing tools, there is an increasing need to develop compact automated solutions for internal diagnostics of pipeline geometric parameters. This paper presents the development and experimental study of a robotic diagnostic device designed for internal scanning of pipes with a minimum cross-sectional diameter of 130 mm. The device is a mechatronic system with eight drive wheels driven by gear motors and controlled by a Raspberry Pi 3 microcomputer. The body design is made using additive technologies and includes measurement and power modules located in separate sections. Laboratory tests have been conducted to confirm the operability of the device and its control algorithms. The developed software package ensures autonomous movement of the device, collection and recording of diagnostic data. The results obtained allow forming a detailed geometry of the pipeline, identifying areas with an increased level of ovality and deformations, which is important for assessing the residual resource. The developed solution can be used both in research tasks and as part of industrial non-destructive testing systems for small-diameter pipes.

Keywords: modeling, diagnostic device, mechatronics, control, defects, robotic system, small diameter pipelines.

For citation: Khasanov I.I. Structural and mechatronic aspects of the development of a robotic device for assessing geometric defects of pipelines. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1934> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.008

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности эксплуатации трубопроводов малого диаметра, широко используемых в технологических системах различных отраслей промышленности. В процессе длительной эксплуатации трубопроводы подвержены развитию дефектов различной природы, включая коррозию, эрозионные повреждения, коррозионное растрескивание под напряжением, а также перегрев металла сверх допустимых температур. Подобные дефекты существенно снижают прочностные характеристики труб и могут привести к образованию неплотностей, разгерметизации, утечке транспортируемого продукта и, как следствие, к возникновению аварийных ситуаций.

Статистические данные по авариям на опасных производственных объектах, рассмотренных автором в [1], подтверждают, что одной из ключевых причин подобных происшествий является утонение стенок труб вследствие эксплуатации в условиях высоких температур и давлений. Нередко развитие таких дефектов связано с недостаточным уровнем технического надзора и контроля за состоянием трубопроводных систем.

Для контроля трубопроводов неразрушающим методом используют проталкиваемые или автоматизированные системы, первые ограничены дальностью действия до 50 м. Автоматизированные робототехнические системы для внутритрубной диагностики позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях их развития, предотвращая большое количество аварий и вредных выбросов в окружающую среду, а также уменьшение вреда здоровью жизни людей. В настоящее время используются различные автоматизированные робототехнические системы, которые перемещаются внутри трубопровода с наличием транспортируемой среды или за счет собственных приводных механизмов [2].

Проблематика технической диагностики трубопроводов малого диаметра на сегодняшний день характеризуется рядом критических факторов, ограничивающих эффективность и точность существующих методов контроля [3, 4]:

– малая площадь поперечного сечения трубопроводов значительно затрудняет применение традиционных средств диагностики, как механических, так и

ультразвуковых, из-за ограниченного доступа и невозможности размещения стандартных датчиков [5];

- отсутствие мобильных диагностических систем, способных автономно перемещаться внутри труб малого диаметра, приводит к необходимости демонтажа участков трубопровода для проведения обследования, что увеличивает временные и материальные затраты;

- геометрические искажения (овальность, локальные деформации) зачастую не фиксируются визуальными методами, в том числе эндоскопией, особенно при наличии загрязнений или отложений на стенках;

- высокие требования к точности измерений на участках с переменным профилем требуют интеграции систем с высоким пространственным разрешением, что сложно реализуемо в условиях ограниченного пространства;

- в условиях опытно-промышленных испытаний или на технологически насыщенных объектах не представляется возможным использование громоздкого оборудования, что делает особенно актуальной разработку компактных, автономных и функционально адаптивных средств внутритрубной диагностики.

В связи с этим возрастает значимость разработки новых методов неразрушающего контроля и технической диагностики трубопроводов малого диаметра, направленных на своевременное выявление дефектов и оценку остаточного ресурса труб. Особую актуальность приобретает создание компактных и мобильных роботизированных устройств, способных проводить диагностику геометрических характеристик с внутренней поверхности трубы в автоматическом режиме. Традиционными методами предотвращения аварий на нефтепроводах вследствие коррозионных дефектов является периодическая диагностика путем использования как переносных, так и внутритрубных инспекционных приборов [1].

Материалы и методы

Контроль технического состояния трубопроводов малого диаметра представляет собой одну из наиболее сложных задач в области неразрушающего контроля. В связи с ограниченностью внутреннего пространства труб и невозможностью использования стандартных систем и механических диагностических средств, все большее распространение получают автономные робототехнические комплексы, способные перемещаться внутри трубопроводов и выполнять геометрическую диагностику в автоматическом режиме. Технически обоснованным решением задачи диагностики в ограниченном пространстве трубопроводов является внедрение автономных мехатронных систем с приводным передвижением и средствами бесконтактного измерения, включающими лазерные системы оценки расстояния и методы анализа формы поверхности.

В рамках данного исследования целью является разработка и экспериментальная проверка роботизированного устройства, предназначенного для автономной диагностики геометрических параметров трубопроводов малого диаметра на основе радиальных измерений, получаемых при помощи лазерных сенсоров.

Конструктивное строение разработанного в программном продукте КОМПАС-3D прототипа внутритрубного устройства, представленного на Рисунке 1, состоит из следующих компонентов:

- передняя крышка 1;
- секция электроники 2;
- посадочные места лазерных дальномеров 3;
- паз для крепления пружины 4;

- секция батареи 5;
- рычаги 6 для крепления мотор-редуктора с энкодером для определения пройденного расстояния.

Чертеж прототипа представлен на Рисунке 2.

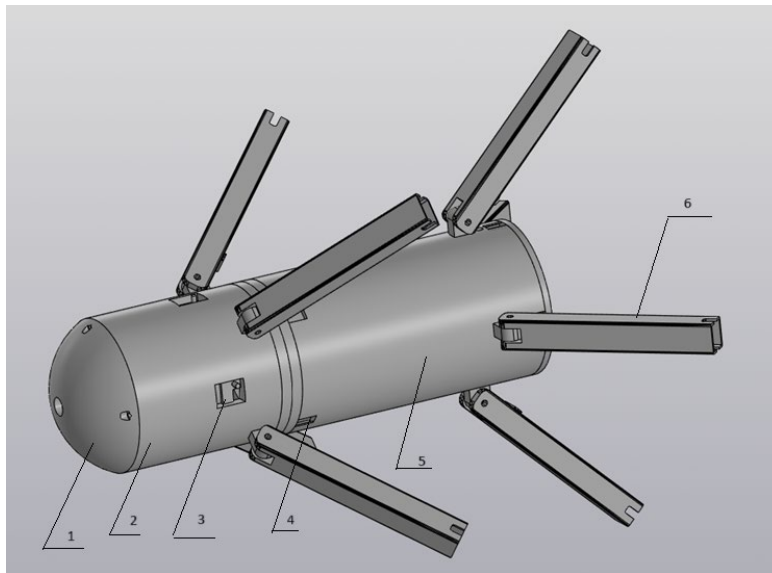


Рисунок 1 – 3D-модель прототипа устройства
Figure 1 – 3D-model of the device prototype

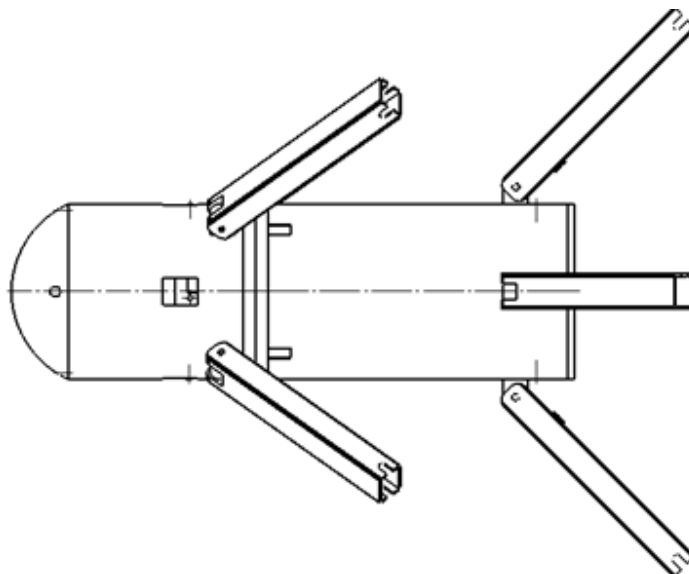


Рисунок 2 – Проекция прототипа
Figure 2 – Projections of the prototype

На сегодняшний день в опытной эксплуатации измерение внутренней геометрии (профилеметрии) трубопровода реализовано путем пропуска соответствующих внутритрубных устройств профилемеров. Профилемер представляет из себя снаряд по типу очистных скребков, оснащенный измерительной системой из множества рычагов с одометрическими колесами (Рисунок 3а), которые представляют собой колесо с энкодером (например, потенциометром). Одометрические колеса прижимаются к внутренней поверхности трубы (положение угла относительно оси прибора при этом

фиксируется как базовое) и при прохождении через различные препятствия геометрии трубопровода (сварные швы, вмятины, АСПО) отклоняются от своего базового положения (Рисунок 3б). Преобразование перемещения в последовательность сигналов и его регистрация после обработки позволяет определить изменение угла рычага и, соответственно, толщину дефекта [6, 7].

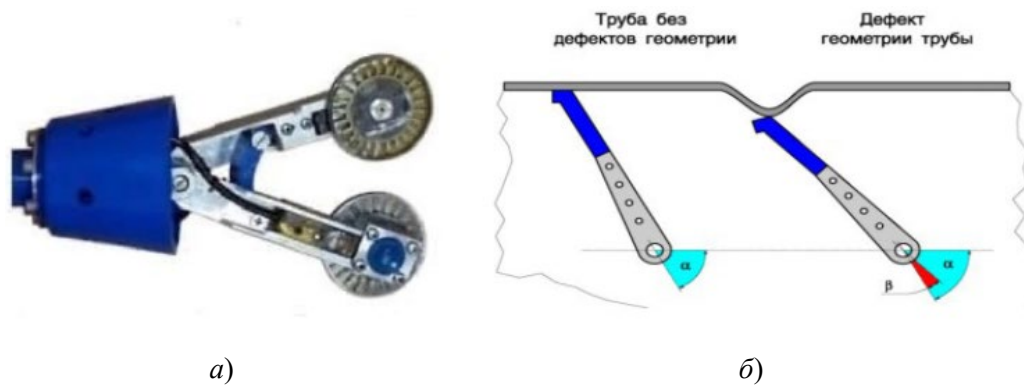


Рисунок 3 – Профилеметрия: *а* – секция для внутритрубных устройств; *б* – изменение положения рычага с одомером

Figure 3 – Profile logging: *a* – section for in-line devices; *b* – change of position of lever with odometer

Разработанное роботизированное измерительное устройство предназначено для автономного перемещения внутри труб малого диаметра и регистрации геометрических параметров внутренней поверхности. Осуществляется поступательное движение с параллельным сбором данных с лазерных датчиков расстояния VL53L0X, равномерно размещенных по периметру корпуса. Датчики работают на основе технологии Time-of-Flight (ToF) и обеспечивают непрерывное измерение расстояний до стенок трубы с высокой частотой обновления [8].

Технологические процессы по созданию прототипа представлены на Рисунке 4 а и Рисунке 4б. Прототип, разработанный для проведения эксперимента в трубе с условным радиусом 125 мм, был напечатан из черного/зеленого пластика типа PETG с диаметром прутка 1,75 мм.

После завершения технологических операций по изготовлению и сборке прототипа была осуществлена разработка и интеграция программно-аппаратных средств, обеспечивающих функционирование диагностического устройства в условиях эксплуатации. При включении устройства осуществляется инициализация программного обеспечения на микрокомпьютере Raspberry Pi 3, а также калибровка датчиков (препятствие перемещается на фиксированные расстояния от сенсора, для каждого положения выполняется серия измерений, по результатам которых формируется таблица калибровки, используемая для нормализации показаний в процессе работы). Движение активируется по команде оператора с помощью беспроводного джойстика, при условии, что все датчики фиксируют расстояние менее 300 мм (наличие трубы вокруг). Управление осуществляется через драйвер моторов, генерирующий ШИМ-сигналы для двигателей [9], обеспечивающих поступательное движение устройства внутри трубы.

Устройство оснащено восемью ведущими колесами, размещенными симметрично по окружности корпуса. Это обеспечивает равномерное распределение опорных точек и препятствует вращению устройства вокруг своей оси. На рычагах крепления мотор-редукторов установлены пружины сжатия, создающие постоянное прижимное усилие

колес к внутренней поверхности трубы. Это дополнительно стабилизирует положение корпуса в центре и компенсирует возможные зазоры или небольшие неровности трубы.



Рисунок 4 – Процесс создания прототипа с использованием аддитивных технологий:

a – 3D-печать; *б* – прототип в сборе

Figure 4 – The process of creating a prototype using additive technologies:

a – 3D printing; *b* – assembled prototype

В процессе движения данные с датчиков записываются в формате CSV¹ (один временной срез включает координату вдоль трубы и четыре значения расстояний по образующим). Эти данные могут быть впоследствии обработаны в стандартных табличных редакторах и использованы для построения 3D-модели внутренней геометрии трубы в CAD-системах, таких как Компас-3D.

Программное обеспечение реализовано на языке Python и включает три функциональных блока: модуль управления движением, модуль считывания данных с датчиков, а также модуль записи измерений в память [10]. Связь с управляющим устройством осуществляется по Bluetooth², передача результатов возможна по Wi-Fi или через физический накопитель (в случае с прототипом посредством флеш-карты).

Логика работы устройства (Рисунок 5) предусматривает остановку при обнаружении критического уменьшения расстояния (препятствия или резкого сужения), фиксацию координаты события и переход в режим ожидания дальнейших действий

¹ Слатов И.И., Хасанов И.И. Вывод данных с датчиков VL53L0X устройства диагностики, настроенных под Raspberry Pi 3B Plus: опубл. 26.03.2025. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617531.

² Кузина В.В. *Проектирование информационных систем управления*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2024. 156 с.

оператора. По завершении маршрута происходит отключение приводов и сохранение полного массива данных во внутреннюю память Raspberry Pi.

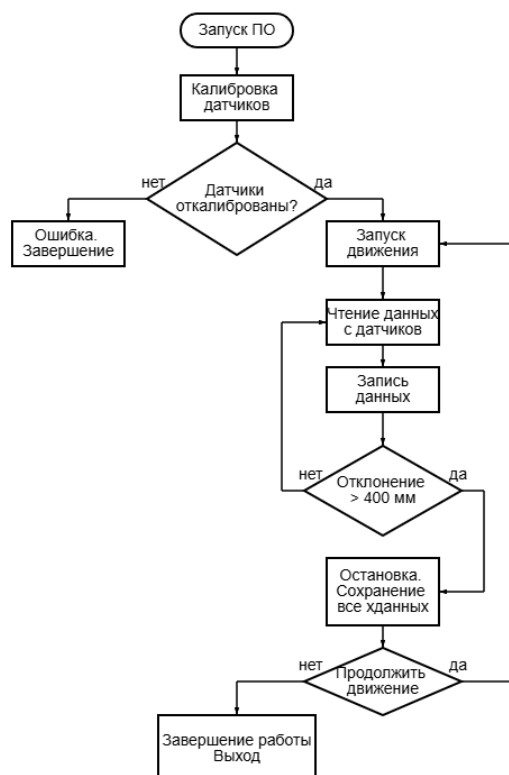


Рисунок 5 – Блок-схема обработки данных
Figure 5 – Block diagram of data processing

В ходе эксперимента использовалась металлическая труба длиной 1000 мм с внутренним радиусом 125 мм и толщиной стенки 3 мм. Для оценки чувствительности устройства дополнительно были искусственно созданы локальные вмятины в конце трубы глубиной до ~2 мм.

В результате трехкратных лабораторных испытаний роботизированного устройства внутри трубы был сформирован полный набор диагностических данных, на основе которых рассчитаны усредненные значения (Таблица 1). Благодаря синхронизированной работе программного и аппаратного обеспечения, удалось добиться высокой точности и плотности измерений – один поперечный срез трубы на каждый миллиметр продольного перемещения устройства.

Таблица 1 – Результаты полученных данных (первые пять строк датасета)
Table 1 – Results of the obtained data (first five lines of the dataset)

Distance_mm	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4
0	125	125	125	125
1	125	125	125	126
2	125	125	125	125
3	126	125	124	125
4	126	124	124	126

Для повышения информативности анализа данных, полученных в результате лабораторных испытаний диагностического устройства, была разработана интерактивная программа визуализации внутренней геометрии трубы в формате

трехмерной модели. Программа имеет удобный интерфейс для загрузки данных, настройки параметров анализа и автоматического построения 3D-модели трубы с выделением отклонений от нормы (Рисунок 6).

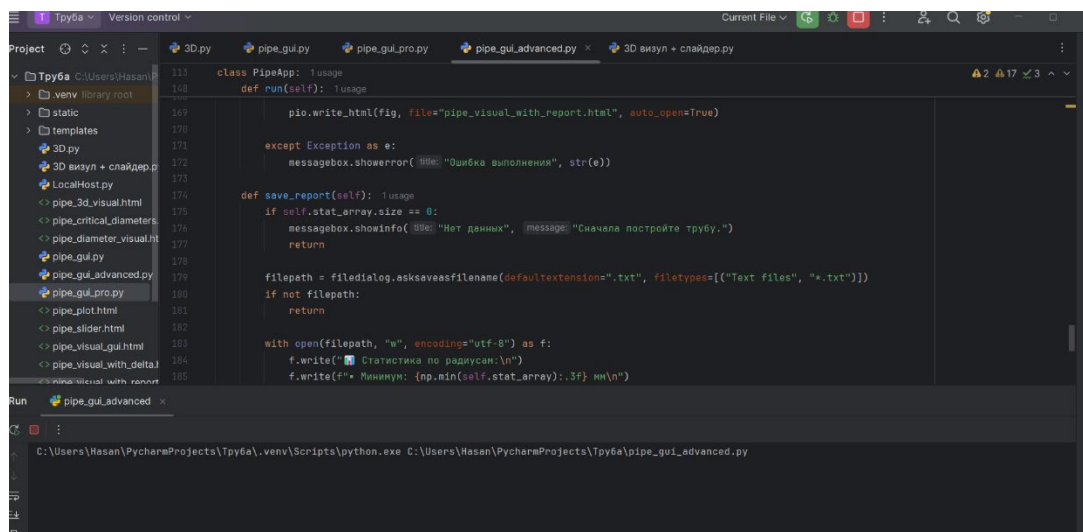


Рисунок 6 – Фрагмент кода реализации программы в интегрированной среде программирования PyCharm на языке Python

Figure 6 – A fragment of the program implementation code in the PyCharm integrated programming environment in Python

Созданное программное обеспечение позволяет:

- загружать датасет с результатами измерений трубы;
- строить трехмерную модель трубы;
- интерполировать радиусы сечений для визуального воспроизведения цилиндрической поверхности;
- выделять критические участки (где радиус отклоняется от нормы);
- сохранять интерактивную HTML-визуализацию;
- экспортировать отчет с детальной статистикой и перечнем критических точек.

На Рисунке 7 представлена 3D-модель трубы, построенная на основе реальных данных. Цвет поверхности отражает радиус, красные точки обозначают участки с отклонениями (за пределами допустимого диапазона $125,0 \pm 2,0$ мм).

3D визуализация трубы (порог: $125,0 \pm 2,0$ мм)

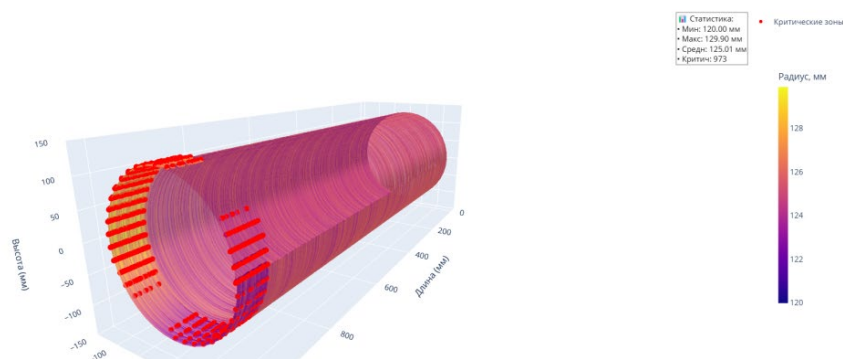


Рисунок 7 – 3D-визуализация трубопровода с отображением критических зон и статистических параметров

Figure 7 – 3D visualization of the pipeline with display of critical zones and statistical parameters

Результаты и обсуждение

Разработан функциональный прототип модели внутритрубного устройства для трубопровода малого диаметра, позволяющий осуществлять автономное передвижение и высокоточную регистрацию геометрических параметров внутренней поверхности.

Для оценки технической эффективности разработанного роботизированного устройства были проведены лабораторные испытания на стенде с трубой условного радиуса 125 мм. В процессе испытаний была проверена работоспособность всех основных подсистем устройства, включая систему привода, систему радиальных измерений на основе лазерных дальномеров и модуль сбора данных.

Результаты эксперимента подтвердили, что устройство способно осуществлять устойчивое поступательное перемещение внутри трубы, обеспечивая непрерывный сбор информации о геометрии внутренней поверхности. При анализе данных выявлено, что система лазерных сенсоров обладает достаточной чувствительностью для регистрации изменений профиля трубы в пределах ± 1 мм, что соответствует требованиям к раннему обнаружению деформаций и дефектов геометрии.

Особенностью разработанной конструкции является ее высокая компактность, обеспеченная интеграцией модулей электроники и питания в корпус с минимальными габаритами, а также использование 3D-печати, позволившей значительно сократить массу устройства и повысить его маневренность в условиях ограниченного внутреннего пространства трубопровода.

Разработка программного обеспечения, интегрированного с системой сенсоров, обеспечила автоматизированную работу устройства, минимизировав необходимость вмешательства оператора при движении по трубопроводу. Программный комплекс позволил синхронизировать сбор геометрических данных и привязку их к продольной координате, что существенно повысило точность построения цифровой модели трубы.

Анализ полученных трехмерных моделей внутренней поверхности трубопровода продемонстрировал способность устройства выявлять участки с отклонениями формы, в том числе области с повышенной овальностью и локальными вмятинами.

Следует отметить, что для повышения эксплуатационной надежности устройства в промышленных условиях необходимо дальнейшее совершенствование конструкции привода, в том числе разработка систем стабилизации положения в наклонных и вертикальных участках труб. Дополнительно перспективным направлением является интеграция модуля визуального контроля и разработка алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации дефектов по собранным данным.

Заключение

В работе представлен процесс разработки, сборки и лабораторного испытания прототипа роботизированного устройства для диагностики геометрических параметров трубопроводов малого диаметра. Разработанная мехатронная система обеспечивает автономное поступательное движение внутри трубы и высокоточную регистрацию радиальных измерений внутренней поверхности.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность устройства и реализованных алгоритмов сбора данных, что позволяет формировать цифровую 3D-модель трубопровода и выявлять участки с геометрическими дефектами. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшей работы по созданию опытного образца устройства с расширенным функционалом для эксплуатации в промышленных условиях и диагностике трубопроводов различного назначения.

В рамках следующего этапа планируется оптимизация конструкции с целью уменьшения габаритных размеров устройства, повышения его маневренности и адаптации для диагностики трубопроводов с еще меньшими диаметрами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Хасанов И.И., Хасанова З.Р., Шакиров Р.А., Недельченко О.И. Обзор применения нейросетей в области добычи и транспорта нефти и газа. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2022;(3-4):11–15. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2022-3-4-11-15>
Khasanov I.I., Khasanova Z.R., Shakirov R.A., Nedel'chenko O.I. Overview of the Use of Neural Networks in the Field of Oil and Gas Production and Transportation. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2022;(3-4):11–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2022-3-4-11-15>
2. Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В. Методика построения и моделирования внутритрубного робототехнического комплекса. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024;9(5):118–131. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131>
Zatonsky A., Kuchev D., Brylyakov A. Methods of Construction and Modeling of an In-Line Robotic Complex. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov*. 2024;9(5):118–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131>
3. Li X., Zhou J., Li W., et al. A Full-Morphology Measurement Method and System for Tubing Internal Thread Based on Rotating-Mirrored Structured Light Vision. *Measurement*. 2025;242. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115705>
4. Zhang Yi., Chen H., Wang L., Fu Z., Wang Sh. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot. In: *2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 06–09 August 2023, Harbin, Heilongjiang, China*. IEEE; 2023. P. 1847–1852. <https://doi.org/10.1109/ICMA57826.2023.10216215>
5. Жиганнуров Р.М., Шаммазов И.А., Мастобаев Б.Н. Развитие методов и средств неразрушающего контроля магистральных трубопроводов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2009;(2-3):3–9.
Zhigannurov R.M., Shammazov I.A., Mastobaev B.N. Non-Destructive Testing Methods and Equipments Development of the Pipeline. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2009;(2-3):3–9. (In Russ.).
6. Козырев Н.Б. Преимущества выделения профилометрии внутривидеоскопических нефтепроводов в отдельный бизнес-процесс. *Экспозиция Нефть Газ*. 2016;(7):92–93.
7. Хасанов И.И., Шакиров Р.А. Конструктивные и мехатронные аспекты совершенствования внутритрубного очистного устройства для решения задачи создания теплоизоляционного слоя из асфальтосмолопарафиновых отложений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.038>
Khasanov I.I., Shakirov R.A. Structural and Mechatronic Aspects of Improving the Pipeline Cleaning Pig for Creating a Heat-Insulating Layer of Wax Deposits. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.038>

8. Horaud R., Hansard M., Evangelidis G., Ménier C. An Overview of Depth Cameras and Range Scanners Based on Time-Of-Flight Technologies. *Machine Vision and Applications*. 2016;27(7):1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
9. Вольф Д.А. Программная реализация группового управления коллекторными двигателями. *Экстремальная робототехника*. 2022;(1):206–212.
Wolf D.A. Software Implementation for Group Control of Manifold Motors. *Extreme Robotics*. 2022;(1):206–212. (In Russ.).
10. Mandanici A., Mandaglio G. Experiments and Data Analysis on One-Dimensional Motion with Raspberry Pi and Python. *Physics Education*. 2020;55(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab73d2>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хасанов Ильнур Ильдарович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация.

e-mail: iikhasanov@fa.ru

ORCID: [0000-0002-3422-1237](https://orcid.org/0000-0002-3422-1237)

Khasanov I. Ildarovich, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Information Technology, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 15.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.

The article was submitted 29.04.2025; approved after reviewing 15.06.2025; accepted for publication 23.06.2025.