УДК 622.691

**Конструктивные особенности робототехнических комплексов внутритрубной диагностики**

Волков Владислав Александрович, Варлашин Виктор Витальевич

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической

кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Российская Федерация, v.varlashin@rtc.ru

**Аннотация**

В статье рассмотрены контролируемые параметры состояния трубопровода при проведении внутритрубного технического диагностирования (ВТД). Приведены сравнения различных комплексов ВТД – внутритрубных инспекционных приборов (ВИП), и на их основе построена сравнительная таблица ВИП. В заключительной части даны краткие выводы по отличиям ВИП и проведено сравнение рассмотренных комплексов с вновь разрабатываемым внутритрубным роботизированным диагностическим комплексом (ВРДК) с учетом анализа рассмотренных комплексов ВТД.

**Ключевые слова**

Внутритрубная диагностика, контроль состояния трубы, робототехнический комплекс.

**Благодарности**

Работа выполнена в рамках НИОКТР, выполняемых ЦНИИ РТК при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка роботизированного диагностического комплекса для внутритрубного контроля трубопроводов» при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение о предоставлении субсидии № 075-11-2022-035.

**Design features of the robotic complex for in-line pipeline diagnostics**

Volkov Vladislav Aleksandrovich, Varlashin Viktor Vitalevich

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russian Federation, v.varlashin@rtc.ru

**Abstract**

The article considers the controlled parameters of the state of the pipeline during in-line technical diagnostics. Comparisons of various complexes - in-line inspection devices are given and a comparative table is built on their basis. In the final part, brief conclusions are given on the differences of in-line inspection devices, and a comparison of the considered complexes with an in-pipe robotic diagnostic complex, developed taking into account the analysis of the considered complexes, is made.

**Key words**

In-line pipeline diagnostics, pipeline condition monitoring, robotic complex.

**Acknowledgements:**

The work was carried out within the framework of R&D carried out by the Central Research Institute of the RTK in the implementation of a comprehensive project to create a high-tech production "Development of a robotic diagnostic complex for in-line inspection of pipelines" with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; subsidy agreement No. 075-11-2022-035.

**Введение**

Внутритрубная диагностика (ВТД) – необходимое мероприятие для инспекции текущего состояния эксплуатируемых трубопроводов, при этом задачи ВТД определяет эксплуатирующая организация. Для выполнения этих задач инспекции существует множество приборов, отличающихся применяемыми методами контроля, способами транспортировки диагностического оборудования по трубе и требованиям к диагностируемому участку трубопровода.

В зависимости от целей диагностики трубопроводов проводится контроль различных параметров и элементов трубопровода [1]: параметры геометрии трубопровода, элементы обустройства, соединительные детали, швы, геометрические дефекты трубопровода, параметры поверхностных дефектов и дефектов металла трубопровода, картография трубопровода, степень загрязненности трубопровода.

**Методы внутритрубной диагностики**

Геометрические измерения профиля механическим контактом с поверхностью трубы позволяет обнаруживать овальности, гофры, изгибы, вмятины на внутренних стенках трубопровода [2].

Метод утечки магнитного потока c продольным намагничиванием (англ. – Magnetic Flux Leakage, MFL) и поперечным намагничиванием (англ. – Transverse Field Inspection, TFI) используется для определения коррозионных эффектов, однако сильно зависит от толщины стенок трубы [2].

Ультразвуковое тестирование (англ. Ultrasonic Testing, UT) используется для обнаружения трещиноподобных дефектов и инспекции трубопроводов вне зависимости от толщины их стенки и применяется только в жидких средах [4].

Электромагнитно-акустическая технология (англ. – Electro-Magnetic Acoustic Transducer, EMAT) – обладает возможностями и преимуществами ультразвукового тестирования, но не требует связующего вещества между датчиком и стенкой трубы и применим в газовой среде. Известны две конструкции EMAT-датчиков [3] – с использованием мощных постоянных магнитов и с использованием импульсных электромагнитов. Недостатком датчиков является высокое энергопотребление.

Вихретоковое тестирование (англ. – Eddy Current, EC) – подходит для широкого спектра дефектов, независимо от размеров и материала трубы [4]. Чувствителен к скорости сканирования, лучшее качество диагностики достигается на небольших скоростях (<0,15 м/с).

Визуально-измерительный контроль (ВИК) – группа методов диагностики, основанных на системах технического зрения, таких как сканирование поверхности 2D- и 3D-лазерными сканерами, видеокамерами со структурированной подсветкой, Time-of-Flight (ToF) камерами. В зависимости от используемых методов, ВИК позволяет определять наличие ржавчины, вмятин, крупных трещин и других геометрических дефектов внутри трубы, а также производить картографирование трубы [5].

**Типы комплексов внутритрубной диагностики**

Существующие комплексы внутритрубной диагностики делятся на 3 типа: снаряды-дефектоскопы, самоходные дефектоскопы (англ. crawler) и прочие устройства.

***Снаряды-дефектоскопы***

Данный тип устройств позволяет получить информацию о геометрии трубопровода: тип участка трубопровода, профилеметрия, изгибы трубопровода, поперечные швы. Для картографии трубопровода также применяют снаряды с бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС) и системами спутниковой геолокации [6]. Измерение геометрии происходит поясами механических датчиков расстояния [6] и/или методом вихретокового тестирования [7]. Снаряды-дефектоскопы используют такие методы контроля как MFL/TFI, UT. Такой набор методов неразрушающей дефектоскопии (НДТ) позволяет комплексно обследовать трубопровод на наличие множества дефектов различного характера используя только один ВИП.

Однако снаряды-дефектоскопы имеют и ряд недостатков:

* + для запуска снарядов в трубу, необходимо наличие камер запуска и извлечения;
  + снаряды чувствительны к интервалу внутренних диаметров сечения инспектируемого участка.

Установка большого количества оборудования на один снаряд затруднительна. Поэтому применяют интегрированные функциональные системы снарядов-дефектоскопов (англ. – Integrated Function PIG System [2]). Система состоит из последовательно соединенных снарядов-дефектоскопов, различающихся методами неразрушающего контроля. Комбинация из различных методов позволяет за один проход получить необходимую информацию о состоянии трубопровода.

***Самоходные внутритрубные роботизированные диагностические комплексы***

Самоходные внутритрубные роботизированные диагностические комплексы (ВРДК) имеют следующие преимущества перед снарядами-дефектоскопами:

* + прохождение участков сложной геометрии (ВРДК подходят для диагностики трубопроводов широкого диапазона диаметров и могут инспектировать участки трубопроводов с переменными диаметрами);
  + возможность инспекции трубопроводов без специальных элементов в составе трубопроводной системы для запуска и извлечения;
  + нет необходимости нагнетания давления в исследуемом участке трубопровода (является недостатком, когда необходимо проводить диагностику трубопровода во время его эксплуатации);
  + визуальное обследование локальных участков трубопроводов в реальном времени.

ВРДК присущи следующие недостатки:

* + бо̀льшая часть комплексов имеет функционал методов ВИК [2], изредка дополняемый датчиками EMAT [34, 35];
  + малые расстояния диагностики. Большинство самоходных ВРДК имеет ограничения по дальности хода до 1 км длины инспектируемого участка.

Самоходные ВРДК можно разделить на два типа по способу ориентации в трубе: самоцентрирующиеся в трубе с помощью распорных лучей и обычные, с колесным или гусеничным движителем.

По способу питания и управления комплексы делятся на беспроводные, с бортовыми аккумуляторами и беспроводной системой передачи информации, и проводные, питающиеся и управляемые по кабельной линии.

***Обзор характеристик ВИП***

Ниже представлены таблицы с характеристиками перечисленных в этой статье ВИП: таблица 1 с характеристиками снарядов-дефектоскопов и таблица 2 с характеристиками ВРДК, включая предполагаемые характеристики разрабатываемого ВРДК.. Расшифровка обозначений в столбцах таблиц:

* + тип комплекса ВТД: 11 – снаряд-дефектоскоп, 12 – самоходный дефектоскоп;
  + методы НДТ: 21 – геометрический (механический, GP), 22 – вихретоковый (EC), 23 – метод утечки магнитного потока продольным намагничиванием (MFL), 23 – модифицированный метод утечки магнитного потока (MFL/TFI), 24 – метод утечки магнитного потока поперечным намагничиванием (TFI), 25 – ультразвуковое тестирование (UT), 26 – электромагнитно-акустическая технология (EMAT), 27 – ВИК, 28 – визуальное обследование;
  + параметры трубопровода: 31 – толщина стенки участка трубопровода, 32 – диаметр трубопровода, 33 – длина участков трубопровода, 34 – определение типов элементов трубопровода, 35 – определение типов швов;
  + контроль геометрических дефектов: 41 – вмятины, гофры, 42 – овальность, 43 – кривизна оси трубопровода
  + коррозионные дефекты: 51 – язвы, каверны, 52 – питтинговая коррозия, 53 – коррозионное растрескивание под напряжением (КРН);
  + типы механических повреждений, 61 – поперечные, 62 – продольные, 63 – спиральные, 64 – риски;
  + инфраструктурные ограничения, 71 – необходима встроенная инфраструктура, 72 – один снаряд рассчитан на один номинальный диаметр, 73 – необходима остановка эксплуатации участка трубопровода на время диагностики.

Существующие ВИП решают определенные задачи и применимы к ограниченному кругу трубопроводов, могут требовать наличия специальных узлов в трубопроводной системе (пуска и приема), специальных режимов транспортировки продукта, обеспечивающих плавную требуемую скорость ВИП, определенной геометрии трубопроводов и транспортируемой среды.

Снаряды-дефектоскопы позволяют быстро собрать информацию с длинных участков трубопроводов в сотни километров, включающую в себя информацию о состоянии геометрии трубопровода, соединительных деталях, швах, геометрических дефектах, поверхностных дефектах и дефектах металла трубопровода. После сбора информации происходит ее постобработка, и уже результат постобработки – журнал дефектов и диагностируемых параметров трубопровода.

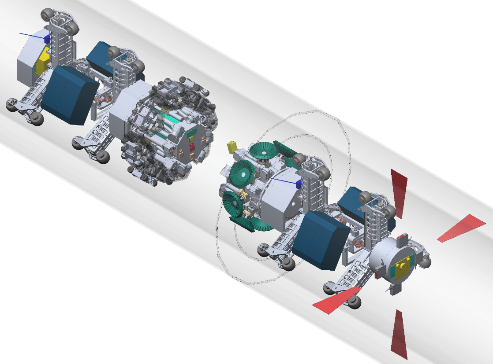
ВРДК часто используют на коротких участках трубопроводов, в которых по разным причинам невозможно использовать снаряды-дефектоскопы [2]. При этом скорость диагностирования намного ниже, чем у снарядов-дефектоскопов, а количество информации, которую оператор способен получить о трубопроводе через ВРДК, намного меньше. Роботы, имеющие множество средств диагностики для получения массива данных, аналогичного системам снарядов-дефектоскопов, имеют малую дистанцию диагностики трубопровода [28, 29], а также не имеют возможности преодоления сильно загрязненных участков трубопровода и очистки поверхности трубопровода для сканирования. Функцию очистки перед запуском снарядов-дефектоскопов выполняют снаряды-скребки, выталкивающие из трубопровода перед собой все загрязнения

**Разрабатываемый ВРДК**

На основании анализа конструктивных особенностей, преимуществ и недостатков перечисленных ВИПов, разработан проектный облик ВРДК, состоящий из двух попеременно движущихся в трубе роботов (рисунок 1).

Цель разработки нового ВИПа – получить ВРДК, способный:

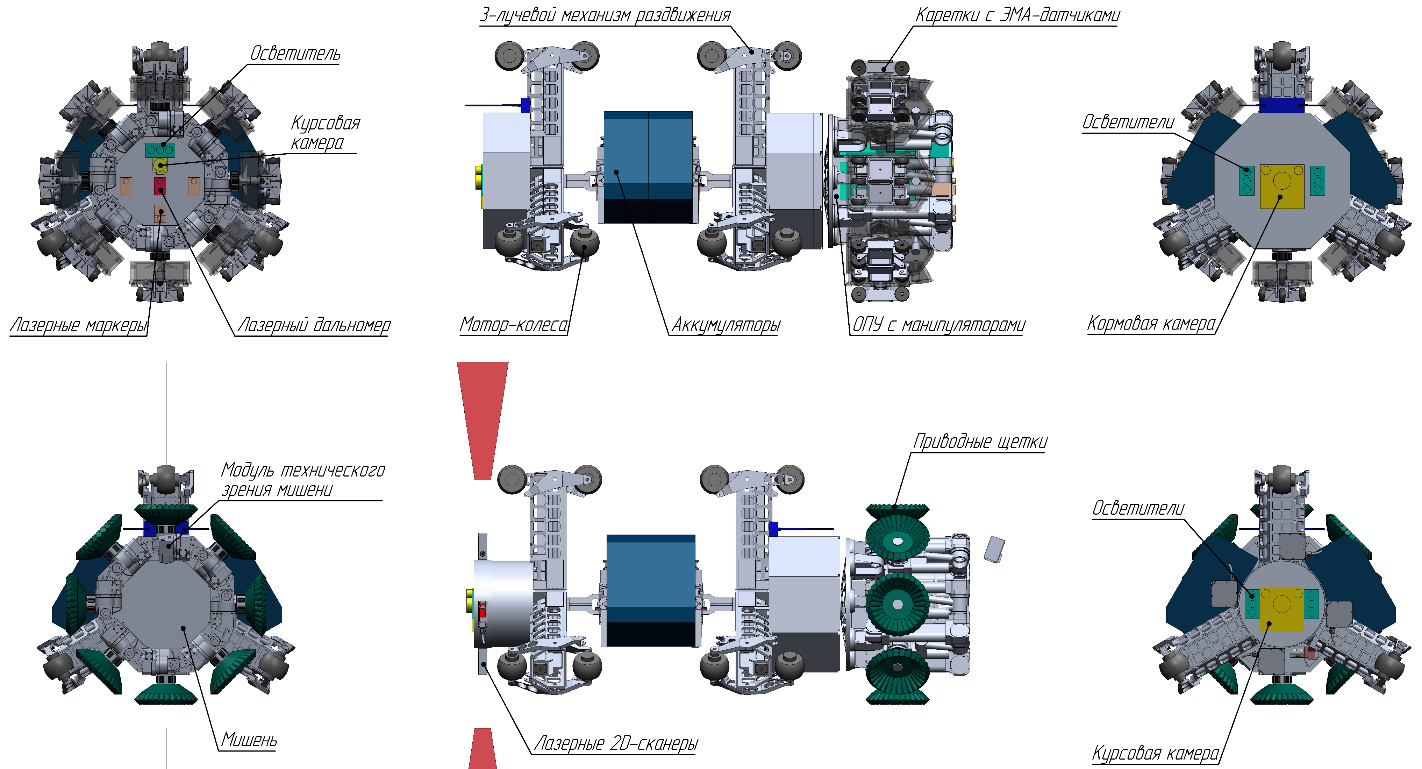
* + исследовать геометрию трубы;
  + диагностировать поверхностные дефекты основного металла трубы и сварных соединений с помощью ВИК и визуально-оптического методов контроля;
  + проводить ультразвуковой контроль основного металла, сварных соединений труб на предмет наличия объёмных и плоскостных дефектов, находящихся на поверхности или внутри основного металла и сварных швов, включая проведение толщинометрии стенок труб;
  + определять участки трубопровода с отслоением изоляционного покрытия;
  + определять типы швов и элементов трубопровода;
  + определять пространственное положение трубопровода с привязкой к координатам Земли;
  + вести журнал накопленных данных исследования и диагностики трубопровода с привязкой к координатам их местоположения;
  + производить диагностику трубопровода на пути длиною в 5 км с заданной точностью;
  + преодолевать участки трубопровода с уровнем загрязнения в нижней части трубопровода не превышающим 20% от диаметра трубопровода;
  + очищать от загрязнений внутреннюю полость трубопровода;
  + производить диагностику трубопровода с номинальным диаметром от 1000 до 1400 мм с толщиной стенки трубы от 10 до 23 мм;
  + преодолевать отводы средним радиусом до 1,5 диаметра трубопровода, концентричные переходы, тройники, шаровые краны.



**Рисунок 1** – Проектный облик разрабатываемого ВРДК

**Figure 1** – The design image of the developed in-line pipeline robotic diagnostic complex

Для комплексной диагностики трубопровода в проектном облике разрабатываемого ВРДК присутствует множество различных технологий (рисунок 2). На передней машине расположен узел профилометрии трубопровода на основе вращающихся на опорно-поворотном устройстве 2D-сканеров, что позволяет получить профиль поверхности трубопровода для оценки геометрических дефектов внутренней стенки трубопровода. В кормовой части передней машины расположен модуль очистки поверхности трубопровода и мишень с видеокамерой технического зрения для вычисления взаимного расположения двух машин по вычислению взаимного расположения на мишени точек лазерных маркеров, установленных на носу задней машины. Дистанция между роботами находится лазерным дальномером, измеряющим расстояние от носа задней машины до мишени передней машины. Модуль очистки трубопровода способен подводить к поверхности трубопровода и вращать по периметру сечения трубопровода приводные щетки.



**Рисунок 2** – Функциональные элементы разрабатываемого ВРДК

**Figure 2** – Functional elements of the developed in-line pipeline robotic diagnostic complex

Таблица 1 – Характеристики снарядов-дефектоскопов\*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование | Тип комплекса | Технологии НДТ | Определение параметров трубопровода | Контроль геометрических дефектов | Коррозионные дефекты | Утончения стенки | Трещины | Механические повреждения швов | Определение пространственного положения трубы и комплекса | Технические характеристики\* | Инфраструктурные ограничения |
| Многоканальный профилемер ПРН, ф. Транснефть-Диаскан [9] | 11 | 21 | 32, 33, 34 | 41, 42, 43 | нет | нет | нет | нет | да | 6"-48"; ЖГ; -15…+60°С; 14 МПа; до 6 м/с, Rmin 1,5D; L 350 км | 71, 72 |
| Внутритрубный прибор для определения положения трубопроводов (ОПТ), ф. Транснефть-Диаскан [10] | 11 | 21 | 32, 33, 34 | 41, 42, 43 | нет | нет | нет | нет | да | 16"-48"; ЖГ; -15…+60°С; 14 МПа; до 6 м/с, Rmin 5D; L 350 км | 71, 72 |
| ROGEO XT SERVICE, ф. Rosen [8] | 11 | 21, 27 | 32, 33, 34 | 41, 42, 43 | нет | нет | нет | нет | да | 6"-56"; ЖГ; 0…+65°С; 15 (25) МПа; до 5 м/с, Rmin 1,5D; L 1000 км | 71, 72 |
| Магнитный дефектоскоп МСК (MFL), ф. Транснефть-Диаскан [13] | 11 | 23 | - | - | 51, 52, 53 | да | 61 | 61 | - | 6"-48"; ЖГ; -15…+60°С; 14 МПа; до 4 м/с, Rmin 5D; L 350 км; стенка 4-29 мм | 71, 72 |
| Pipecare MFL tool, ф. Pipecare [11] | 11 | 23 | - | - | 51, 52, 53 | да | 61 | 61 | - | 2"-56"; ЖГ; -20…+85°С; 12 МПа; до 5 м/с, Rmin 1,5D; L -; стенка 3-25,4 мм | 71, 72 |
| Магнитный дефектоскоп МСК (TFI), ф. Транснефть-Диаскан [14] | 11 | 24 | - | - | 51, 52, 53 | да | 62 | 62 | - | 20"-48"; ЖГ; -15…+60°С; 14 МПа; до 4 м/с, Rmin 1,5D-3D; L 300 км; стенка 6-18 мм | 71, 72 |
| Pipecare TFI tool, ф. Pipecare [12] | 11 | 24 | - | - | 51, 52, 53 | да | 62 | 62 | - | 4"-56"; ЖГ; -20…+85°С; 12 МПа; до 4 м/с, Rmin 1,5D; L - км; стенка 3-20 мм | 71, 72 |
| Комбинированный магнитный дефектоскоп, ф. Транснефть-Диаскан [15] | 11 | 23, 24 | - | - | 51, 52, 53 | да | 61, 62 | 61, 62 | - | 12"-48"; ЖГ; -15…+50°С; 14 МПа; до 4 м/с, Rmin 1,5D-3D; L 350 км; стенка 5,5-29 мм | 71, 72 |
| Ультразвуковой дефектоскоп для многоракурсного исследования стенки трубопровода, ф. Транснефть-Диаскан [17] | 11 | 25 | 31, 32, 33, 35 | - | - | - | 61, 62, 63, 64 | 61,62 | - | 20"-48"; Ж; -15…+50°С; 14 МПа; до 3,2 м/с, Rmin 3D; L 200 км; стенка 8-29 мм | 71, 72 |
| Pipecare UT tool, ф. Pipecare [16] | 11 | 25 | 31, 32, 33, 35 | 41, 42 | 51, 52, 53 | да | 61, 62, 63, 64 | 61,62 | - | 20"-48"; Ж; -15…+50°С; 14 МПа; до 3,2 м/с, Rmin 3D; L 200 км; стенка 8-29 мм | 71, 72 |
| Комбинированный магнито-ультразвуковой дефектоскоп, ф. Транснефть-Диаскан [18] | 11 | 23, 25 | 31, 35 | - | 51, 52, 53 | да | 62, 64 | 62 | - | 20"-48"; Ж; -15…+50°С; 14 МПа; до 2 м/с, Rmin 3D; L 250 км; стенка 5-27 мм | 71, 72 |
| Дефектоскоп для выявления отслоений изоляционного покрытия трубопроводов ОДП, ф. Транснефть-Диаскан [21] | 11 | 26 | - | - | - | Отслоение покрытия | - | - | - | 40"-48"; ЖГ; -15…+60°С; 14 МПа; до 2 м/с, Rmin 3D; L 250 км; стенка 8-29 мм | 71, 72 |
| Pipecare EMAT tool, ф. Pipecare [19] | 11 | 26 | - | - | 53 | Отслоение покрытия | 61, 62, 63 | - | - | - | 71, 72 |
| RoDD EMAT service, ф. ROSEN [20] | 11 | 26 | 32, 33, 34 | - | - | Отслоение покрытия | 61, 62, 63 | - | да | 12"-48"; ЖГ; 0…+60°С; 15 МПа; до 2,5 м/с, Rmin 1,5D; L 330 км | 71, 72 |
| MDS, ф. TDW [22] | 11 | 21, 23, 24 | 31, 32, 33, 34, 35 | 41, 42, 43 | 51, 52, 53 | 61,  62,  63, 64 | 61, 62, 63, 64 | да | да | 6"-30"; ЖГ; | 71, 72 |

\* В поле «Технические характеристики» через знак «;» по порядку указаны: 1 – рабочий диапазон диаметров трубопровода, в дюймах, 2 – среда внутри трубопровода, в которой может работать ВИП (Г – газ, Ж –жидкость, ЖГ – жидкость и газ), 3 – рабочий температурный диапазон, 4 – максимальное рабочее давление внутри трубопровода, 5 – скорость движения ВИПа в трубе, 6 – минимальный проходимый средний радиус криволинейного участка (отвода) трубопровода, 7 – максимальная длина сканируемого участка трубопровода, 8 – рабочий диапазон толщин стенок трубопровода (ограничение, присущее методам диагностики трубопровода, связанным со сканированием объема металла стенок трубопровода).

Таблица 2 –Характеристики ВРДК

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование | Тип комплекса | Технологии НДТ | Определение параметров трубопровода | Контроль геометрических дефектов | Коррозионные дефекты | Утончения стенки | Трещины | Механические повреждения швов | Определение пространственного положения трубы и комплекса | Особенности | Технические характеристики | Инфраструктурные ограничения |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Pipe Crawler Robot Sigma HD-LR, ф. Fibercsope [26] | 12 | 27, 28 | 32, 33 | - | - | - | - | - | да | 4-колесный, 360°-камера на корпусе; | 2 км; аккумулятор/кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 350-3000 мм | 73 |
| Sigma HD advanced pipe crawler, ф. Fiberscope [27] | 12 | 27, 28 | 32, 33 | - | - | - | - | - | да | 4-колесный, 360°-камера на корпусе; | 0,5 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 200-3000 мм | 73 |
| Pipe Crawler Stormer S3000, ф. Fiberscope [28] | 12 | 28 | 32, 33 | - | - | - | - | - | - | 4-колесный, 360°-камера на корпусе | 0,25 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 150-1000 мм; в т.ч. выдерживает до 5,5 бар под водой | 73 |
| VEGA 40, ф. Frobest [29] | 12 | 27, 28 | 32, 33 | - | - | - | - | - | - | 6-колесный, 360°-камера на корпусе | 0,12/0,4 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 180-1500 мм; скорость до 35 м/мин; генерация диаграммы планов труб | 73 |
| CRAB Crawler, ф. Nexxis [30] | 12 | 27, 28 | 32, 33 | - | - | - | - | - | - | 6-лучевой 12-колесный, 360°-камера на корпусе; | 0,2 км; кабельная линия управления и питания; для вертикальных труб диаметром 230-700 мм; | 73 |
| JettyRobot, ф. JettyRobot [31] | 12 | 27 | 32, 33 | - | - | - | - | - | - | 6/3-лучевой гусеничный, курсовая камера на корпусе; применяется для воздушной/жидкостной очистки; | кабельная линия управления и питания; для труб любого пространственного положения диаметром 350-1350 мм; | 73 |
| RMIS MAXI, ф. Nexxis [32] | 12 | 27,28 | 32, 33 | да | - | - | - | - | да | 8-лучевой с омниколесами, 360°-камера на корпусе; профилеметрия (компьютерное зрение, ЛИДАР, сонар) | аккумулятор - 2 км; кабельная линия управления и питания - 1 км; для труб диаметром 350-1800 мм; | 73 |
| STASS, ф. Synthotech [33] | 12 | 27,28 | - | - | - | - | - | - | - | гусеничный, панорамная камера на манипуляторе; применяется для нанесения герметика на стыки трубопровода; | 0,125 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 300-1200 мм; | 73 |
| GRAID, ф. Synthotech [34] | 12 | 26, 27,28 | - | - | - | - | - | - | - | магнитные гусеницы, курсовая и кормовая камеры; двухсоставной; для обследования трубопровода под давлением | 0,1 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 300-1200 мм; до 100 бар в газовой среде; уклоны до 45° | 71 |
| ТДК-400-М-Л, ф. Диаконт [35] | 12 | 26, 27, 28 | 31, 32, 33 | 41, 42 | 51, 52, 53 | да | 61, 62, 63, 64 | 61, 62 | да | гусеничный с вертикальным поджимающим лучом, курсовая и кормовая камеры; | 0,55 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 700-1400 мм и толщиной стенки 9-30 мм | 73 |
| RODIS-8, ф. Диаконт [35] | 12 | 26, 27,28 | 31, 32, 33 | 41, 42 | 51, 52, 53 | да | 61, 62, 63, 64 | 61, 62 | да | многосоставный; гусеничный с вертикальным поджимающим лучом, курсовая и кормовая камеры; | 0,4 км; кабельная линия управления и питания; для труб диаметром 200-400 мм и толщиной стенки 9-30 мм | 73 |
| Разрабатываемый ВРДК | 12 | 26, 27,28 | 31, 32, 33, 34, 35 | 41, 42, 43 | 51, 52, 53 | да | 61, 62, 63, 64 | 61, 62 | да | многосоставный, двухмашинный; 6-и лучевой 12-и колесный курсовая и кормовая камеры; | 5 км; аккумулятор; для труб диаметром 1000-1400 мм | 73 |

Задняя машина оснащена механизмом выдвижения и вращения EMAT-датчиков, сканирующих стенку трубопровода на наличие дефектов, и толщиномеров. ВРДК оснащен БИНС и оптическим датчиком пройденного пути, необходимым для картографии трубопровода.

Обе машины построены на базе 3-лучевых распорных механизмов с мотор-колесами на независимой подвеске. Такая конструкция позволяет располагать машины равноудаленно от точек опоры на трубопровод, что является близко к центру сечения трубопровода. Это необходимо для правильной работы механизмов выдвижения ЭМА-датчиков и системы очистки, а также соблюдения расстояния от нижних поверхностей машины до отложений загрязнений в нижней части трубы.

Центральная часть машин несет в себе механику для выставления равных углов между центральной частью и распорными механизмами, для прохождения отводов.

На носу передней машины расположена обзорная курсовая камера с осветителями, интегрированная в систему технического зрения, позволяющую обнаруживать элементы трубопровода и расположение швов. На корме задней машины расположена еще одна обзорная камера с осветителями.

Для предотвращения накопления ошибок датчиков на дистанции 5 км в следствие непрерывного измерения пройденного пути, машины движутся поочередно. В следствие такого движения в системе координат комплекса всегда есть координаты неподвижного робота, относительно которых привязываются все измерения, совершаемые движущимся роботом.

В следствие увеличения требуемого максимального пути диагностики трубопровода до 5 км, кабельное соединение с роботом невозможно, так как на таком расстоянии роботу понадобится намного большая мощность приводной системы для протаскивания кабеля. Робот разрабатывается с бортовым источником питания и беспроводной системой дистанционного управления и передачи информации. У беспроводной системы связи есть преимущества: увеличенная дистанция работы комплекса; отсутствие проблем, возникающих при протаскивании кабеля. Главным недостатком является увеличение массы робота за счет аккумуляторов на борту робота.

**Заключение**

Анализ существующего оборудования для диагностирования труб показал, что задача имеет два основных способа решения: путем применения снарядов-дефектоскопов и путем применения ВРДК.

Для протяженных трубопроводов с элементами запуска и извлечения снаряды-дефектоскопы являются предпочтительным диагностическим оборудованием, тогда как ВРДК имеют меньший диагностический функционал в сравнении со снарядами, рассчитаны на короткие участки трубопровода (не превышающие 1 км) не имеют достаточной проходимости по загрязненным участкам и способов их очистки для диагностики дефектов объема металла стенки трубопровода, но могут применяться в местах трубопровода с переменным диаметром и имеют возможность преодолевать отводы.

Задача вновь разрабатываемого ВРДК заключается в преодолении недостатков современных самоходных ВИПов по дальности, проходимости, возможностям диагностики загрязненных участков и полноты получаемой информации о трубопроводе.

**Литература**

1. Ma Q. et al. Pipeline in-line inspection method, instrumentation and data management //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 11. – С. 3862.
2. Song H. et al. Comparative analysis of in-line inspection equipments and technologies //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 382. – №. 3. – С. 032021.
3. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.13 / Алехин Сергей Геннадиевич; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т интроскопии МНПО "Спектр"]. - Москва, 2013. - 34 с.
4. Camerini C. et al. In-line inspection tool with eddy current instrumentation for fatigue crack detection //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 7. – С. 2161.
5. Alex A et al. Pipe Line Inspection Robot //iJRASET. – 2022. – Vol. 10, Issue VII. – С. 766-772. https://www.ijraset.com/best-journal/pipe-line-inspection-robot (дата обращения 14.10.2022).
6. XYZ Mapping // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/in-line-lnspection/xyz-mapping (дата обращения 14.10.2022).
7. ROCORR IEC SERVICE. In-line high-resolution detection and sizing of internal metal loss [Электронный ресурс] // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rocorr-iec/ROSEN-Group\_RoCorr-IEC-service\_Jahr-2022/RoCorr%20IEC.pdf (дата обращения 14.10.2022).
8. ROGEO XT SERVICE. In-line high-resolution geometry and dent analysis [Электронный ресурс] // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rogeo-xt/ROSEN-Group\_RoGeo-XT/RoGeo%20XT.pdf (дата обращения 14.10.2022).
9. Многоканальные профилемеры ПРН [Электронный ресурс] // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239863/01\_mnogokanalnie\_profilemeri\_prn-40-56\_1200h676.jpg (дата обращения 14.10.2022).
10. Внутритрубные приборы для определения положения трубопроводов (ОПТ). [Электронный ресурс] // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239864/02\_defektoskopi\_dlya\_opredeleniya\_polojeniya\_tryboprovodov\_1200x676.jpg (дата обращения 14.10.2022).
11. MAGNETIC FLUX LEAKAGE (MFL) INSPECTION // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/mfl-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
12. TRANSVERSE FIALD INSPECTION (TFI) // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/tfi-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
13. Магнитные дефектоскопы серии МСК (MFL) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239866/04\_magnitnie\_defektoskopi\_serii\_msk\_mfl\_\_2100x672.jpg (дата обращения 14.10.2022).
14. Магнитные дефектоскопы серии МСК (TFI) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239867/05\_magnitnie\_defektoskopi\_serii\_msk\_tfi\_\_1200x672.jpg (дата обращения 14.10.2022).
15. Комбинированные магнитные дефектоскопы (MFL+TFI) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248021/06\_kombinirovannie\_magnitnie\_mfl\_tfi\_\_1200x675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
16. ULTRASONIC METAL LOSS INSPECTION (UT) // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/ultrasonic-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
17. Ультразвуковой дефектоскоп для многоракурсного исследования стенки трубопровода // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248031/08\_defektoskopi\_dlya\_mnogorakyrsnogo\_issledovaniya\_stenki\_1200x675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
18. Комбинированные магнитно-ультразвуковые дефектоскопы (MFL+WM+CD) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239869/07\_kombinirovannie\_magnitno-yltrazvykovie\_defektoskopi\_mfl\_wm\_cd\_\_1200x673.jpg (дата обращения 14.10.2022).
19. ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC TRANSDUCER (EMAT): PIPELINE INSPECTION // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/emat-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
20. RoDD EMAT. Service in-line high resolution coating disbondment analysis // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rodd-emat/ROSEN-GROUP\_RODD-EMAT-SERVICE/RoDD\_EMAT\_SF\_E\_201405.pdf (дата обращения 14.10.2022).
21. Дефектоскоп для выявления отслоений изоляционного покрытия трубопроводов серии ОДП // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248181/09\_defektoskop\_dlya\_viyavleniya\_otsloenii\_izolyac.pokritiya\_1200h675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
22. Multiple Datasets (MDS) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/mds (дата обращения 14.10.2022).
23. SpirALL Magnetic Flux Leakage (SMFL) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/smfl (дата обращения 14.10.2022).
24. Deformation (DEF) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/in-line-lnspection/def (дата обращения 14.10.2022).
25. Low Field Magnetic Flux Leakage (LFM) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/lfm (дата обращения 14.10.2022).
26. SIGMA HD-LR [Электронный ресурс] // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=SIGMA+HD-LR+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
27. SIGMA. Crawler pipeline inspection system // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=SIGMA+HD+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
28. Pipe Crawler STORMER S3000 // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=STORMER+S3000+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
29. Crawler System // Forbest: [сайт]. URL: https://en.forbest-online.com/fahrwagen-system (дата обращения 14.10.2022).
30. Crab-Robot. Technical specifications [Электронный ресурс] // Nexxis: [сайт]. URL: https://nexxis.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/02/Datasheets-Crab-Robot-2019.pdf (дата обращения 14.10.2022).
31. Technology // jettyrobot: [сайт]. URL: https://www.jettyrobot.com/technology/ (дата обращения 14.10.2022).
32. RMIS MAXI (16x16) // nexxis: [сайт]. URL: https://nexxis.com/product/rmis-maxi-16x16/ (дата обращения 14.10.2022).
33. STASS [Электронный ресурс] // SYNTHOTECH: [сайт]. URL: https://synthotech.com/wp-content/uploads/2021/07/STASS.pdf (дата обращения 14.10.2022).
34. GRAID [Электронный ресурс] // SYNTHOTECH: [сайт]. URL: https://synthotech.com/wp-content/uploads/2021/07/GRAID-Brochure.pdf (дата обращения 14.10.2022).
35. Нефтегазовая отрасль // Диаконт: [сайт]. URL: https://www.diakont.ru/energy\_services/16/n-a.html (дата обращения 14.10.2022).

**References**

1. Ma Q. et al. Pipeline in-line inspection method, instrumentation and data management //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 11. – С. 3862.
2. Song H. et al. Comparative analysis of in-line inspection equipments and technologies //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 382. – №. 3. – С. 032021.
3. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.13 / Алехин Сергей Геннадиевич; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т интроскопии МНПО "Спектр"]. - Москва, 2013. - 34 с.
4. Camerini C. et al. In-line inspection tool with eddy current instrumentation for fatigue crack detection //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 7. – С. 2161.
5. Alex A et al. Pipe Line Inspection Robot //iJRASET. – 2022. – Vol. 10, Issue VII. – С. 766-772. https://www.ijraset.com/best-journal/pipe-line-inspection-robot (дата обращения 14.10.2022).
6. XYZ Mapping // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/in-line-lnspection/xyz-mapping (дата обращения 14.10.2022).
7. ROCORR IEC SERVICE. In-line high-resolution detection and sizing of internal metal loss [Электронный ресурс] // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rocorr-iec/ROSEN-Group\_RoCorr-IEC-service\_Jahr-2022/RoCorr%20IEC.pdf (дата обращения 14.10.2022).
8. ROGEO XT SERVICE. In-line high-resolution geometry and dent analysis [Электронный ресурс] // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rogeo-xt/ROSEN-Group\_RoGeo-XT/RoGeo%20XT.pdf (дата обращения 14.10.2022).
9. Многоканальные профилемеры ПРН [Электронный ресурс] // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239863/01\_mnogokanalnie\_profilemeri\_prn-40-56\_1200h676.jpg (дата обращения 14.10.2022).
10. Внутритрубные приборы для определения положения трубопроводов (ОПТ). [Электронный ресурс] // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239864/02\_defektoskopi\_dlya\_opredeleniya\_polojeniya\_tryboprovodov\_1200x676.jpg (дата обращения 14.10.2022).
11. MAGNETIC FLUX LEAKAGE (MFL) INSPECTION // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/mfl-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
12. TRANSVERSE FIALD INSPECTION (TFI) // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/tfi-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
13. Магнитные дефектоскопы серии МСК (MFL) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239866/04\_magnitnie\_defektoskopi\_serii\_msk\_mfl\_\_2100x672.jpg (дата обращения 14.10.2022).
14. Магнитные дефектоскопы серии МСК (TFI) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239867/05\_magnitnie\_defektoskopi\_serii\_msk\_tfi\_\_1200x672.jpg (дата обращения 14.10.2022).
15. Комбинированные магнитные дефектоскопы (MFL+TFI) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248021/06\_kombinirovannie\_magnitnie\_mfl\_tfi\_\_1200x675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
16. ULTRASONIC METAL LOSS INSPECTION (UT) // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/ultrasonic-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
17. Ультразвуковой дефектоскоп для многоракурсного исследования стенки трубопровода // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248031/08\_defektoskopi\_dlya\_mnogorakyrsnogo\_issledovaniya\_stenki\_1200x675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
18. Комбинированные магнитно-ультразвуковые дефектоскопы (MFL+WM+CD) // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/239869/07\_kombinirovannie\_magnitno-yltrazvykovie\_defektoskopi\_mfl\_wm\_cd\_\_1200x673.jpg (дата обращения 14.10.2022).
19. ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC TRANSDUCER (EMAT): PIPELINE INSPECTION // Pipecare: [сайт]. URL: https://www.pipecaregroup.com/emat-inspection/ (дата обращения 14.10.2022).
20. RoDD EMAT. Service in-line high resolution coating disbondment analysis // Rosen: [сайт]. URL: https://www.rosen-group.com/dms/rosen-website/rosen-documents/solutions/services/rodd-emat/ROSEN-GROUP\_RODD-EMAT-SERVICE/RoDD\_EMAT\_SF\_E\_201405.pdf (дата обращения 14.10.2022).
21. Дефектоскоп для выявления отслоений изоляционного покрытия трубопроводов серии ОДП // Диаскан-Транснефть: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section\_file/248181/09\_defektoskop\_dlya\_viyavleniya\_otsloenii\_izolyac.pokritiya\_1200h675.jpg (дата обращения 14.10.2022).
22. Multiple Datasets (MDS) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/mds (дата обращения 14.10.2022).
23. SpirALL Magnetic Flux Leakage (SMFL) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/smfl (дата обращения 14.10.2022).
24. Deformation (DEF) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/in-line-lnspection/def (дата обращения 14.10.2022).
25. Low Field Magnetic Flux Leakage (LFM) // T. D. Williamson: [сайт]. URL: https://www.tdwilliamson.com/solutions/pipeline-integrity/inline-inspection/lfm (дата обращения 14.10.2022).
26. SIGMA HD-LR [Электронный ресурс] // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=SIGMA+HD-LR+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
27. SIGMA. Crawler pipeline inspection system // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=SIGMA+HD+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
28. Pipe Crawler STORMER S3000 // Dropbox: [сайт]. URL: https://www.dropbox.com/sh/6tccey3dicpyw2b/AABt1nXSUjv\_q-I\_hP9Mqmr0a?dl=0&preview=STORMER+S3000+Pipe+Crawler.pdf (дата обращения 14.10.2022).
29. Crawler System // Forbest: [сайт]. URL: https://en.forbest-online.com/fahrwagen-system (дата обращения 14.10.2022).
30. Crab-Robot. Technical specifications [Электронный ресурс] // Nexxis: [сайт]. URL: https://nexxis.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/02/Datasheets-Crab-Robot-2019.pdf (дата обращения 14.10.2022).
31. Technology // jettyrobot: [сайт]. URL: https://www.jettyrobot.com/technology/ (дата обращения 14.10.2022).
32. RMIS MAXI (16x16) // nexxis: [сайт]. URL: https://nexxis.com/product/rmis-maxi-16x16/ (дата обращения 14.10.2022).
33. STASS [Электронный ресурс] // SYNTHOTECH: [сайт]. URL: https://synthotech.com/wp-content/uploads/2021/07/STASS.pdf (дата обращения 14.10.2022).
34. GRAID [Электронный ресурс] // SYNTHOTECH: [сайт]. URL: https://synthotech.com/wp-content/uploads/2021/07/GRAID-Brochure.pdf (дата обращения 14.10.2022).
35. Нефтегазовая отрасль // Диаконт: [сайт]. URL: https://www.diakont.ru/energy\_services/16/n-a.html (дата обращения 14.10.2022).

**Информация об авторах**

**Волков Владислав Александрович**, конструктор, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, тел. +7 (812) 552-01-10, volkov.v@rtc.ru

**Варлашин Виктор Витальевич**, младший научный сотрудник, ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, тел. +7 (812) 552-01-10, v.varlashin@rtc.ru

**Information about the authors**

**Volkov Vladislav Aleksandrovich**, constructor, RSSC RTC, Tikhoretskiy Prospekt, 21, St Petersburg, 194064, tel. +7 (812) 552-01-10, volkov.v@rtc.ru

**Varlashin Viktor Vitalevich**, Junior Researcher, RSSC RTC, Tikhoretskiy Prospekt, 21, St Petersburg, 194064, tel. +7 (812) 552-01-10, v.varlashin@rtc.ru