

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131

¹Затонский А.В., ^{2,3,*}Кучев Д.Н., ³Брыляков А.В.¹Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета²Пермский национальный исследовательский политехнический университет³Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ»

*E-mail: kuchevdmritri@yandex.ru

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. Высокая аварийность трубопроводного транспорта тепловых сетей и нефтегазовой отрасли представляет большую опасность окружающей среде из-за отсутствия своевременного контроля внутритрубной поверхности, включая участки сложной геометрии. К ним относятся отводы, наклонно-вертикальные участки, участки с переменным сечением диаметра. Приведены способы перемещения внутритрубного диагностического оборудования с использованием робототехнических устройств. Рассматривается проблема отсутствия методик построения внутритрубных робототехнических устройств, которые позволили бы выстроить корректную последовательность этапов проектирования. Целью исследования является разработка методики построения и моделирования внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии с последующим теоретическо-экспериментальным подтверждением её применимости; объектом исследования: конструкция внутритрубного робототехнического комплекса; предметом исследования: методы, алгоритмы, трёхмерные модели для диагностики трубопроводов сложной геометрии.

В результате разработана методика построения внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии, получены результаты геометрического анализа, где параметры конструкции с конусно-цилиндрической формой габаритными величинами $L_3=555$ мм, $H_{max}=172$ мм, $H_{min}=116$ мм позволяют достичь рабочий объём для расположения элементов на 39 % выше, в сравнении с классическим исполнением формы корпуса. Представлено моделирование конструкции внутритрубного робототехнического комплекса с использованием автоматизированной системы, выполнено моделирование и опытно-экспериментальное движение конструкции в различных диаметрах трубопровода на участке сложной геометрии с углом поворота 90° и 180° , радиусом поворота $1,5D$ и диаметром 200 мм, а также вертикальном участке, выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции опорной неприводной опорной ноги.

Ключевые слова: внутритрубная роботизированная диагностика, трубопроводный транспорт, участки сложной геометрии, методика построения робота, методы проектирования, автоматизированное моделирование внутритрубного робототехнического устройства, экспериментальное исследование робототехнического устройства

Введение. Трубопроводный транспорт Российской Федерации является важной стратегической частью энергетического комплекса, так на трубопроводах тепловых сетей более 90 % аварий приходится на коррозионные повреждения. За 2020 г. число аварий, приходящихся на одну тысячу километров трубопроводов тепловых сетей, составило 25 случаев, а суммарное количество аварий за весь период составило более 4400 случаев, при этом из них более 200 аварий поспособствовали отключению подачи теплоносителя около 1800 тыс. человек, серьезно пострадало 11 человек, погибло 7 человек [1]. На нефтегазоперерабатывающих предприятиях, а также нефтегазохранилищах проявляется высокая опасность возникновения аварийных ситуаций, с возможными выбросами нефти и нефтепродуктов в окружающую среду [2], так наиболее крупные

аварии происходят в результате порывов трубопроводов, где 32 % от общего числа инцидентов и аварий нефтегазоперерабатывающей отрасли приходится на технологические трубопроводы. Основными факторами, которые способствуют разгерметизации технологических трубопроводов является коррозионные повреждения, трещины коррозионного растрескивания под напряжением, которые были вызваны накопительным эффектом в процессе изготовления или монтажных работ трубопровода, потеря геометрии трубопровода, температурные деформации, некачественное выполнение сварных швов, включая наличие дефектов.

Для контроля трубопроводов неразрушающим методом используют проталкиваемые или автоматизированные системы, первые ограничены дальностью действия до 50 м. Автоматизи-

рованные 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 счёт собственных приводных механизмов. Однако существенным недостатком первых является необходимость наличия специальных устройств для монтажа и демонтажа из внутритрубной поверхности, что обосновывается высокими технико-финансовыми затратами на вновь строящихся или действующих трубопроводах. Автоматизированные робототехнические системы, осуществляемые движение за счёт собственных движителей, имеют различные конструкции: ползающие, шагающие, по типу 4-х колёсной тележки, опорно-нажимные, которые могут перемещаться по участкам различной геометрии трубопроводов. При этом внутритрубный робототехнический комплекс (ВРК), разработанный авторами в работе [3], позволяет осуществлять контроль как прямолинейных, так и участков с наличием сложной геометрии, к ним относятся наклонные, вертикальные участки, участки с наличием отводов. В настоящее время важной проблемой таких устройств является отсутствие методов и методик создания автоматизированных робототехнических устройств, которые позволили бы выстроить корректную последовательность этапов проектирования робототехнического устройства для диагностики трубопроводов с последующими опытно-экспериментальными результатами, подтверждающими применимость разработанной методики. Так в работе [4] представлена структурная схема сканера-дефектоскопа, состоящая из множества блоков, в [5] приводится конструкция шагающего робота, но отсутствуют методики её построения, в работах [6–9] предлагаются структуры конструкций робототехнических устройств для движения по некоторым участкам сложной геометрии, однако отсутствуют методы их построения и экспериментальные результаты исследований, подтверждающие их работоспособность. В зарубежных исследованиях [10–13] рассматриваются конструкции для движения в трубопроводах различной пространственной геометрии с использованием CAD, CAE систем, в работах [14–17] приводятся результаты механического расчёта и управления робототехническими устройствами. В представленных работах отсутствуют описание методов их построения, а также разработанные конструкции не позволяют

сделать вывод об эффективности их использования. Следовательно, **целью исследования** является разработка методики построения ВРК с подтверждением её применимости, для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**: разработать основные этапы построения конструкции ВРК, определить основные геометрические параметры конструкции, создать модель конструкции ВРК с использованием автоматизированных систем проектирования, разработать опытно-экспериментальный образец конструкции и провести его испытания на участках сложной геометрии; **объектом исследования**: разработанная конструкция ВРК; **предметом исследования**: методы, алгоритмы, трёхмерные модели построения ВРК для диагностики трубопроводов сложной геометрии.

Материалы и методы. При проведении исследований использовался стандартизованный участок сложной геометрии – отвод 180-219x5-09Г2С ГОСТ 17375-2001, вертикальный участок с УПДТ 300 мм согласно ГОСТ 10704-91. Эти трубопроводы представляют наиболее опасные участки, что невозможно продиагностировать существующими робототехническими устройствами. Сложность диагностирования отвода обеспечена наличием нескольких поворотов в 90°, вертикального участка – углом подъёма.

Исследование осуществлялось поэтапно. На первом этапе разрабатывалась функциональная модель методики построения ВРК с использованием методов системного анализа и управления, на втором этапе производилось определение основных геометрических параметров разрабатываемой конструкции с использованием методов теоретической механики, на третьем этапе выполнялось моделирование конструкции ВРК и её движение на участке сложной геометрии с использованием автоматизированных систем CAD и CAE, четвёртый этап предусматривал экспериментальное исследование движения конструкции на участках сложной геометрии.

Основная часть. Робототехнические устройства для внутритрубной диагностики являются сложными техническими системами, которые представляют результат синергетического объединения элементов механики, электротехники, компьютерных и электронных компонентов. Технические параметры внутритрубного робототехнического устройства для диагностики трубопроводов сложной геометрии ограничены размерами трубопроводов, в которых он будет осуществлять свою деятельность, параметрами транспортируемой среды, окружающими условиями эксплуатации, а также техническими возможностями самого устройства, например, глу-

биной диагностирования или возможностью движения по вертикальным участкам или участкам с наличием отводов. Поэтому важно соблюдать строгую последовательность этапов построения внутритрубного робототехнического комплекса ввиду того, что приводные или электронные компоненты могут геометрически не совпадать с возможными параметрами устройства. Зачастую методы построения машин и механизмов включают в себя следующие этапы: появление необходимости общества в создании машины, создание технического задания, анализ существующих изделий, разработку структурных схем и эскизного проекта с последующим выполнением механических расчётов, разработкой чертежей устройства, изготовление опытного образца и выполнение испытаний, оценка корректности работы устройства и доработка для выхода в серийное производство. К основным этапам построения внутритрубного робототехнического комплекса следует отнести:

- Разработку технического задания, которое включает в себя все необходимые параметры условий работы устройства, такие как рабочий диапазон условных проходных диаметров, радиус отводов, угол отводов, угол наклонных участков, наименование транспортируемой среды.

- Создание проекта механической конструкции ВРК, где наиболее важным этапом является выявление геометрических параметров, которые позволяют оценить рабочий объём для монтажа приводных и электронных компонентов. На данном этапе определяется тип приводных элементов, их мощность, крутящий момент и максимальная скорость, а также разрабатывается трёхмерная модель устройства и выполняется прочностной анализ методом конечных элементов в автоматизированном расчётном комплексе, с последующим созданием пояснительной записки и чертежей.

- Изготовление механической конструкции ВРК, определяются технологии изготовления компонентов, основными технологиями являются механическая обработка резания материалов, а также производство методом аддитивных технологий.

- Разработку систем управления и энергообеспечения ВРК; производится выбор управля-

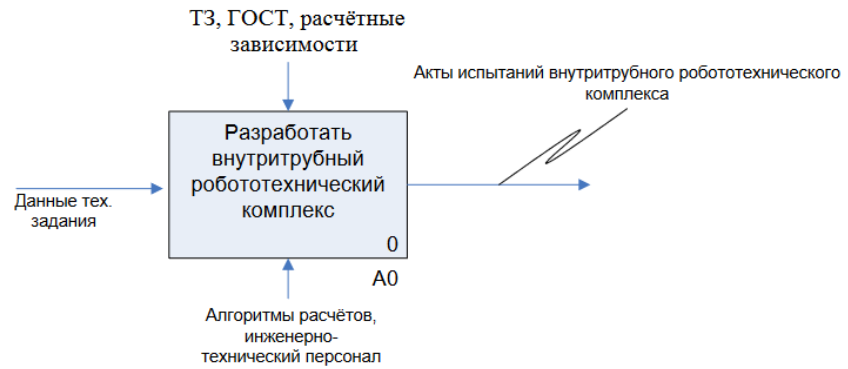
ющего контроллера, драйверов управления приводными компонентами, исходя из выбранных элементов, определяют датчики технического контроля и электрокомпоненты, рассчитывается система питания и выбирают тип питающего элемента, разрабатывается программное обеспечение для управления робототехническим устройством, производят синтез пояснительной записки, которая включает описание всех ранее выполненных этапов.

- Монтаж систем управления, энергообеспечения, технического контроля в конструкцию; приобретают покупные изделия согласно пояснительной записке по разработке системы управления и энергообеспечения, а также технического задания. Выполняют монтаж покупных изделий в механическую конструкцию ВРК, а также производят наладку данных компонентов.

- Разработку и изготовление испытательного стенда; выполняется разработка и изготовление стенда из трубопроводов, необходимой пространственной геометрии, диаметра, наличием участков сложной геометрии, типа транспортируемой среды и материала трубопровода, которые определяются из условий технического задания

- Проведение испытаний внутритрубного робототехнического комплекса, заключительный этап построения ВРК, на котором производится монтаж устройства во внутритрубное пространство испытательного стенда, с дальнейшим контролем технических параметров устройства и оценкой корректности работы разработанного ВРК.

Описанная последовательность этапов построения ВРК была сформулирована в виде логико-информационной модели организационно-технологических процедур построения внутритрубного робототехнического комплекса в соответствии с концепцией IDEF0, диаграмма верхнего уровня представлена на рисунке 1, декомпозиция диаграммы на рисунке 2, где основными государственными стандартами являются ГОСТ 2.119-2013, ГОСТ 25751-83, ГОСТ 25762-83, ГОСТ 56542-2019, а расчётные зависимости используются в алгоритмах для определения геометрических параметров конструкции и приводных компонентов ВРК, пример работы, алгоритмы определения геометрических размеров представлен на рисунке 3.



Цель: описание метода построения внутритрубного робототехнического комплекса

Точка зрения: инженер-дефектоскопист

Рис. 1. Диаграмма верхнего уровня логико-информационной модели построения ВРК

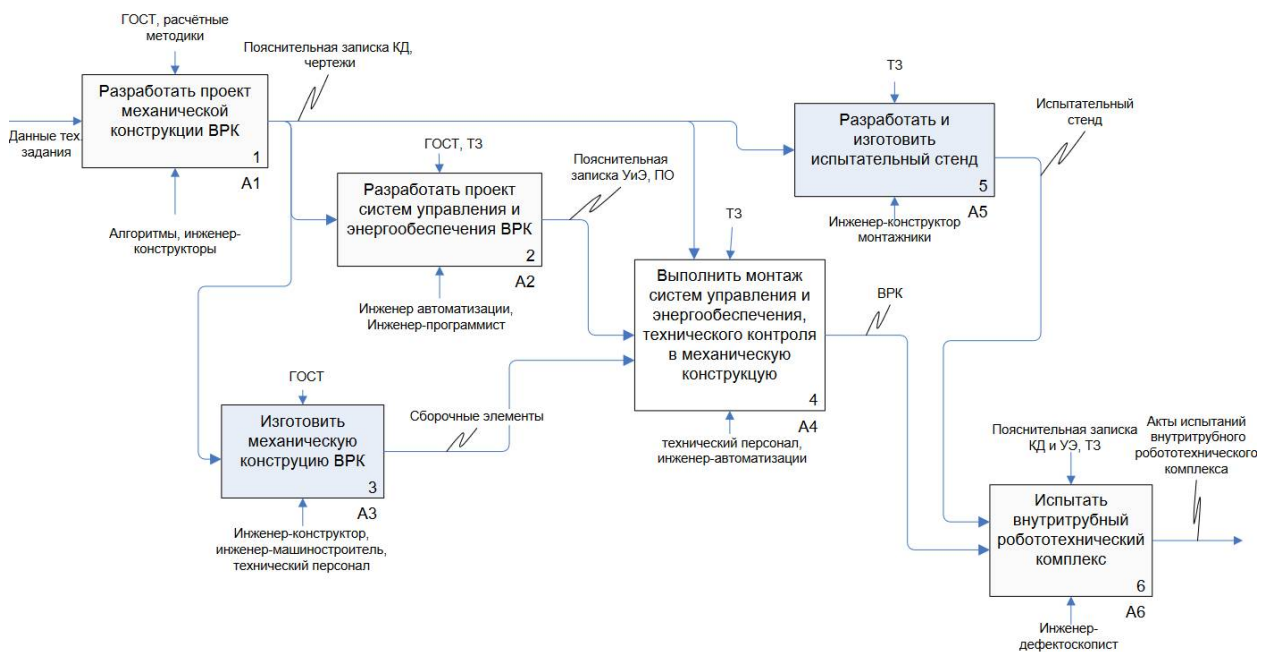


Рис. 2. Декомпозиция диаграммы верхнего уровня логико-информационной модели А0

Геометрическую длину L_i ВРК возможно определить несколькими расчётными зависимостями, учитывая при этом ширину H , расчётные зависимости L_1 и L_2 являются классическим представлением цилиндра в центре отвода, расчётная зависимость L_3 представляет конусно-цилиндрическую форму, которая

также позволяет перемещаться в широком диапазоне условных проходных диаметров (УПДТ) $D-2,5D$, в отличие от классических схем с УПДТ $D-1,75D$, где структурная схема отображения конструкции ВРК на участке сложной геометрии представлена на рисунке 4, которая позволяет выполнить моделирование конструкции.

$$\begin{cases} L_1 = 2 \cdot \sqrt{4 \cdot R \cdot (D - H) + D^2 - H^2}, & H \leq 0,675D \\ L_2 = \sqrt{(8 \cdot R \cdot D + D^2 - 8 \cdot R \cdot H + 4 \cdot D \cdot H - 4 \cdot H^2)}, & H \leq 0,8D \\ L_3 = \frac{\left(R - \frac{D}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{2} + \left(R + \frac{D}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{2}}{2} + \frac{L_k}{3}, & H_{max} \leq 0,86D, H_{min} = 0,6D, \end{cases}$$

где D – диаметр трубопровода, R – радиус отвода трубопровода, L_k – расстояние между точками опоры переднего и заднего несущего основания.

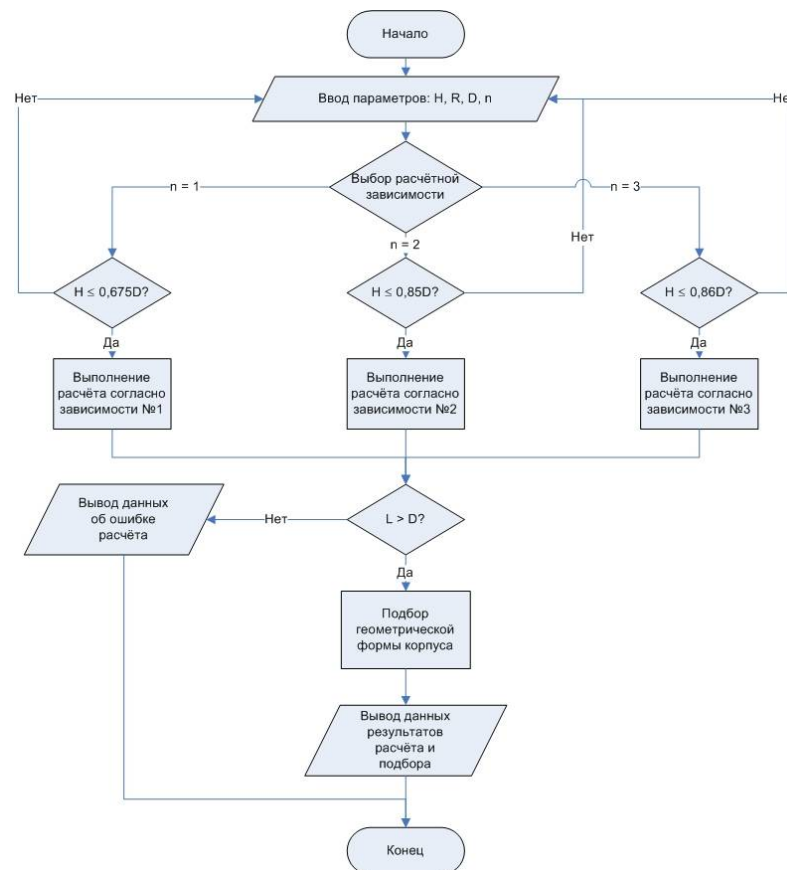


Рис. 3. Алгоритм определения геометрических размеров ВПК

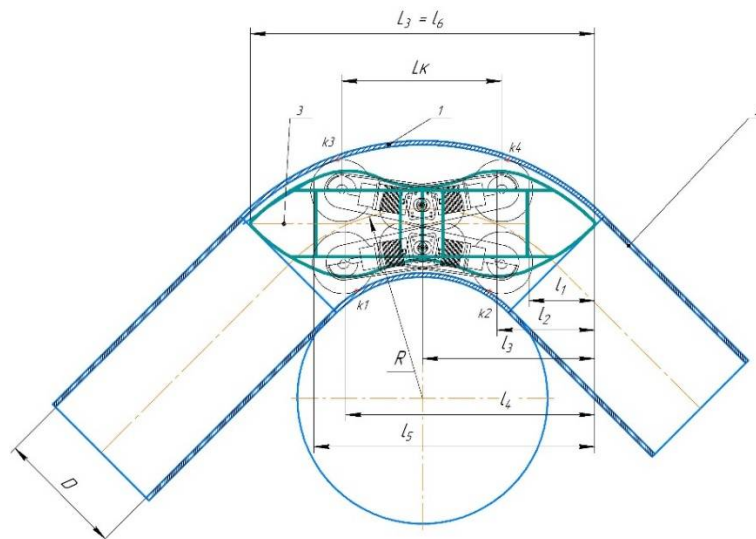


Рис. 4. ВПК в центре отвода.

1 – стандартный отвод 90° , радиус поворота $1,5D$; 2 – прямолинейный участок; 3 – ВПК; D – УПДТ; R – радиус поворота; k_1, k_2, k_3, k_4 – точки касания стенок внутритрубной поверхности; L – габаритная длина ВПК, L_k – габаритная длина между осями колёс

При этом для L_3 корпус конструкции ВПК представляет конусно-цилиндрическую форму, которая описывается следующими соотношениями, получены конструктивно:

$$\frac{H_0}{L_3} = 0, \frac{l_0}{L_3} = 0; \frac{H_1}{L_3} = n_1, \frac{l_1}{L_3} = f_1; \frac{H_2}{L_3} = n_2, \frac{l_2}{L_3} = f_2; \frac{H_3}{L_3} = n_3, \frac{l_3}{L_3} = f_3; \frac{H_4}{L_3} = n_4, \frac{l_4}{L_3} = f_4; \frac{H_5}{L_3} = n_5, \frac{l_5}{L_3} = f_5;$$

$$\frac{H_6}{L_3} = 0, \frac{l_6}{L_3} = 1,$$

где H_i – ширина участка корпуса, l_i – геометрическая длина расположения заданной ширины участка корпуса от базовой плоскости построения,

n_i, f_i – конструктивные коэффициенты, определяемые путём моделирования. Результаты расчёта возможных геометрических параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчёта геометрических параметров ВРК

№ расчётной зависимости	Длина, м	Ширина, м	Рабочий объём, м ³
1	0,543	0,12	0,0039
2	0,480	0,12	0,0054
3	0,555	0,12 - 0,172	0,00753

Основываясь на структурной схеме движения ВРК, моделирование рассматривается с разработки модели сборочной единицы приводной опорной ноги, которой должна соответствовать сложная геометрическая форма, повторяющей скругления геометрии отвода для того, чтобы конструкция ВРК могла преодолевать участки сложной геометрии, включая стандартизованный отвод 90-180° с условным проходным диаметром 200 мм (рис. 5). Каждая деталь разрабатывается индивидуально, с использованием вспомогательной геометрии – плоскостей, где формируются необходимые эскизы будущих деталей, что в последующем выдавливаются или вырезаются с использованием твердотельного моделирования, завершающим этапом построения большинства деталей является выполнение фасок или скруглений поверхностей.

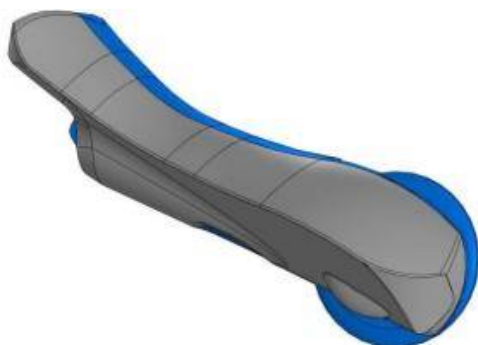


Рис. 5. Модель корпусных элементов приводной опорной ноги ВРК

Подобная геометрическая форма приводной опорной ноги позволяет, в свою очередь, перемещаться ВРК по всем требуемым участкам трубопроводов, она включает в себя корпусные элементы, что соединяются крепёжными винтами и тем самым образуют жёсткую конструкцию. Использование нескольких корпусов позволяет добиться максимального пространства для расположения внутренних рабочих компонентов, где расположен привод для преобразования электрической энергии в механическую вращения колёсного движителя, что установлен на валу, имеющем опоры в виде подшипниковых узлов (рис. 6). Геометрические размеры конструкции опорной

ноги должны соответствовать расчётным параметрам конструкции ВРК.

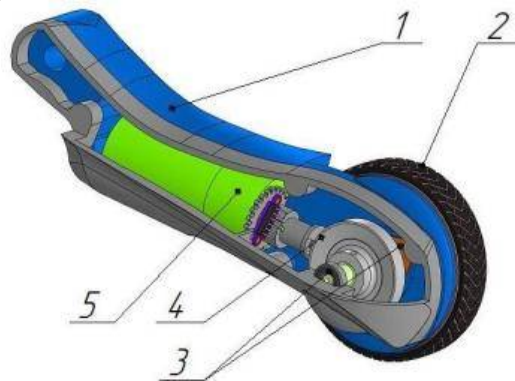


Рис. 6. Расположение компонентов во внутренней полости приводной опорной ноги:

- 1 – корпус приводной опорной ноги; 2 – движитель колёсного типа с валом; 3 – подшипниковые узлы;
- 4 – механизм передачи вращения;
- 5 – устройство преобразования электрической энергии в механическую (вращения)

Последующим шагом является построение сборочной единицы неприводной опорной ноги, которая также имеет криволинейно-изогнутую форму для движения на участках сложной геометрии и для контакта с внутритрубной поверхностью в широком диапазоне УПДТ (рис. 7), модель сборочной единицы включает рычаг, который выполнен единой деталью, на конце рычага располагается несколько колёсных движителей, установленных с использованием подшипниковых узлов.



Рис. 7. Нога неприводная опорная с колёсным движителем:

- 1 – рычаг неприводной опорной ноги; 2 – колёсный движитель

Несущее основание модели ВРК, на котором располагаются опорные ноги и остальные корпусные элементы, должно соответствовать предъявляемым геометрическим и техническим требованиям, обладать криволинейным профилем в виде конусно-цилиндрической формы,

иметь высокую несущую способность для выполнения поставленных задач ввиду того, что опорные ноги воспринимают высокие статические и динамические нагрузки, которые приводят к образованию высоких напряжений и перемещений. В ходе дальнейшего моделирования ВРК разработано несущее основание конструкции и системы рычагов, что представляют из себя детали, выполненные единым твердотельным моделированием, системы рычагов предназначены движения опорных ног в диаметральной плоскости и поддержания пространственного положения ВРК во внутритрубном пространстве (рис. 8).

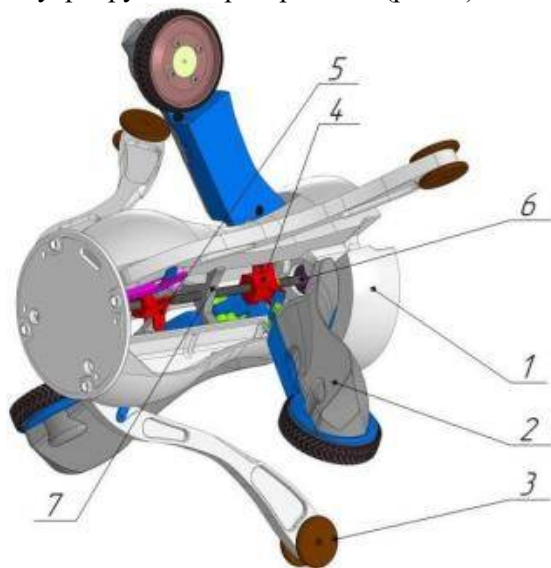


Рис. 8. Модель конструкции ВРК:

- 1 – несущее основание конструкции ВРК;
- 2 – нога приводная опорная;
- 3 – нога не приводная опорная; 4 – система рычагов пространственного положения приводных ног;
- 5 – система рычагов пространственного положения не приводных ног; 6 – ось с подшипниковым узлом;
- 7 – упор жёсткости

Из приведённого результата моделирования конструкции ВРК видно, что на несущем основании располагаются модели сборочных единиц

трёх приводных опорных ног и трёх неприводных опорных ног, на каждой из которых установлена единица или пара колёсных движителей, каждая опорная нога связана при помощи системы рычагов с осью ВРК, для придания жёсткости несущему основанию используется специальный упор повышения конструкционной жёсткости. В ходе дальнейшего моделирования выполняется создание твердотельных корпусных элементов, где располагаются рабочие органы робототехнического устройства, пример создания данных корпусных элементов отображён в ходе моделирования раскрытия опорных ног ВРК для УПДТ 200-500 мм (рис. 9) и его перемещение на участке сложной геометрии, с наличием двух последовательно соединённых отводов 90° (рис. 10). Моделирование движения конструкции на участке состоит из нескольких последовательных этапов, представлены основные результаты моделирования пространственного положения конструкции, когда угол между торцевой частью первого отвода и конструкций ВРК составляет 70° и 45° , происходит изменение траектории движения несущего основания, которое начинает вращаться вокруг центра радиуса отвода, приводные колёсные движители находятся в криволинейном участке, которые имеют различное давление со стороны стенки трубопровода тогда, когда как неприводные колёсные движители ещё имеют контакт с прямолинейным участком. В ходе дальнейшего результата движения угол между конструкцией ВРК и торцевой частью второго отвода изменяется 70° и 25° , конструкция ВРК начинает выезжать из первого отвода и перемещается в начало прямолинейного участка, пространственное положение конструкции ВРК также изменяется вокруг центра радиуса отвода.

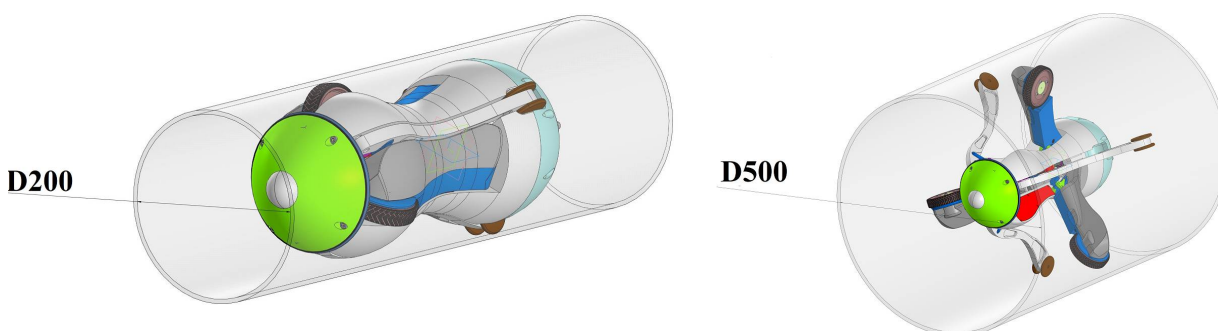


Рис. 9. ВРК в трубопроводе с УПДТ 200–500 мм:

- 1 – корпус МК; 2 – нога приводная опорная с колёсным движителем; 3 – нога не приводная опорная с колёсным движителем; 4 – отсек корпуса; 5 – задняя крышка; 6 – передняя крышка

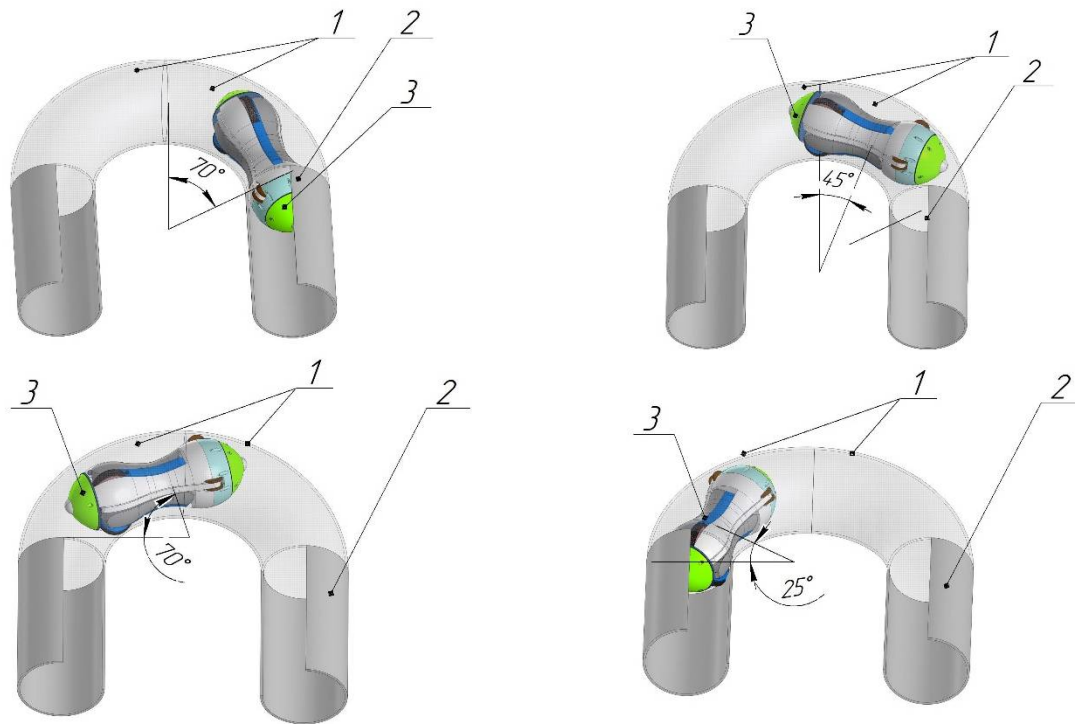


Рис. 10. Перемещение ВРК на участке сложной геометрии

Моделирование конструкции ВРК методом конечных элементов выполняется с целью решения задачи статического исследования напряжённо-деформированного состояния ввиду обоснования необходимой прочности конструкций путём разбиения отдельных элементов конструкции ВРК на сборочные единицы и детали, с последующим нагружением. Так выполнен расчёт неприводной опорной ноги при расчётной нагрузке $F_{рас} = 160 \text{ Н}$ (рис. 11), расчётная

нагрузка – $F_{рас} = 1,25 \cdot F_{раб}$, где $F_{раб}$ – это рабочая нагрузка, $F_{раб} = 128 \text{ Н}$ для элементов системы, которые воспринимают нагрузки от сжатия, заданный материал Д16Т с пределом текучести $\sigma_T = 96,5 \text{ МПа}$. Закрепление сборочной единицы осуществляется в местах крепления опор, в шарнирных соединениях, нагрузка прикладывается к колёсным движителям. В результате максимальное расчётное перемещение составило $\sigma_{рас} = 70,5 \text{ МПа}$, что является допустимым.

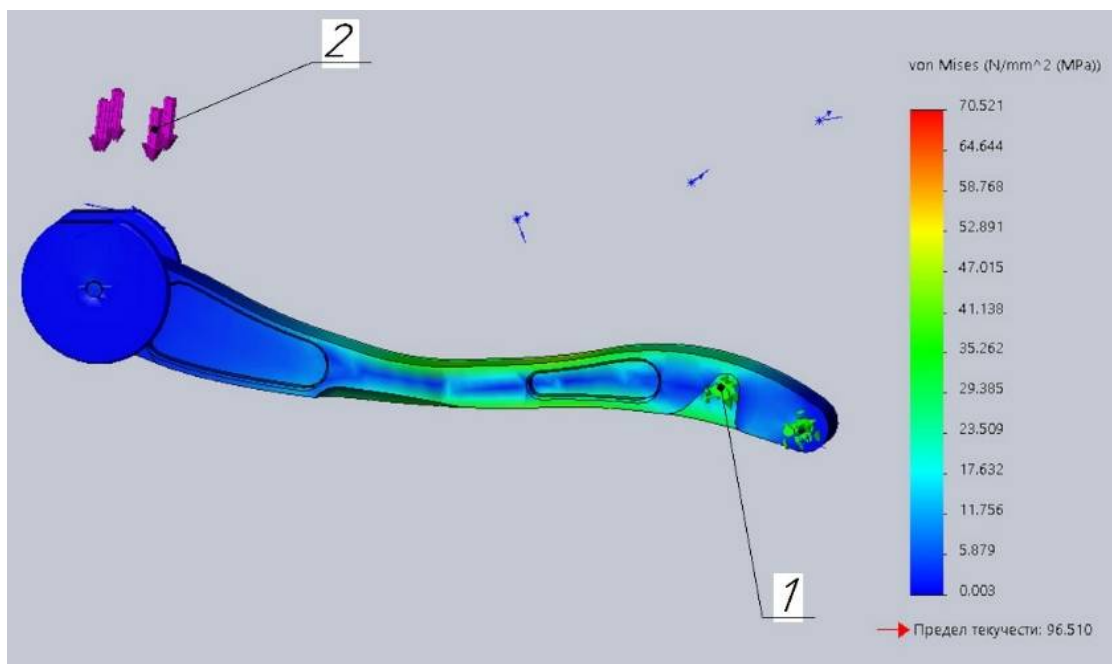


Рис. 11. Эпюра НДС опорной неприводной ноги, при $F_{рас}$.
1 – область фиксации; 2 – вектор прикладываемой нагрузки

Результирующие перемещения конструкции неприводной опорной ноги находятся в интер-

вале допусковых $\Delta_{рас} = 1,782$ мм (рис. 12), минимальный коэффициент запаса прочности составил $FOS = 1,369$ (рис. 13).

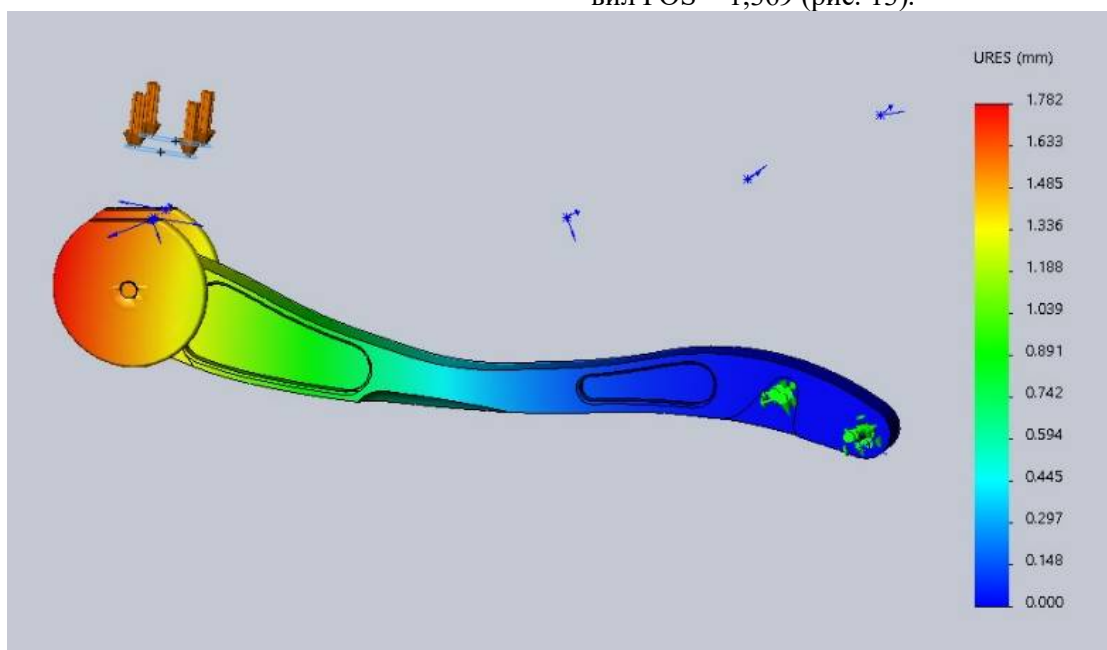


Рис. 12. Эпюра перемещений неприводной опорной ноги, при $F_{рас}$

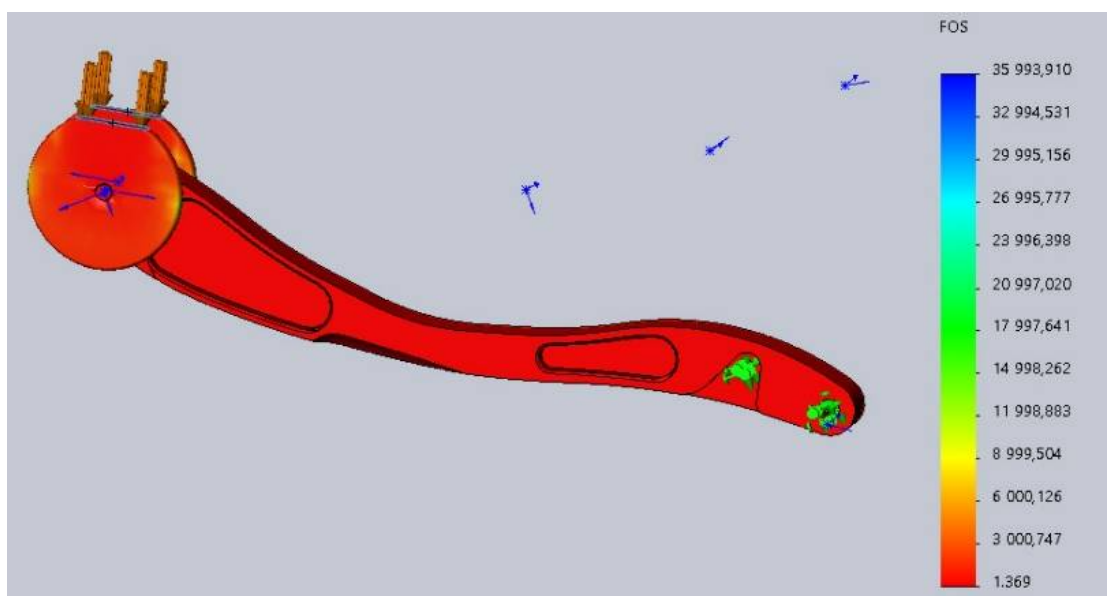
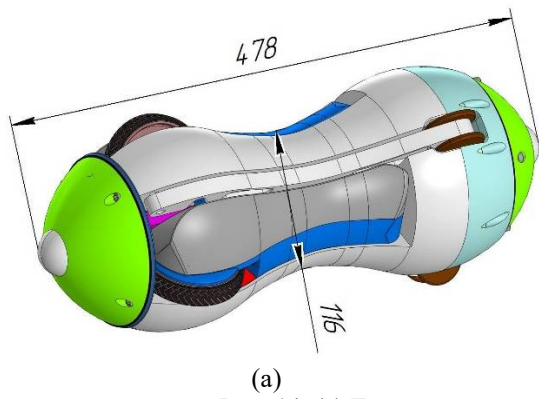


Рис. 13. Эпюра запаса прочности неприводной опорной ноги, при $F_{рас}$

Согласно функциональному блоку А1 декомпозиции диаграммы верхнего уровня А0, была разработана трёхмерная модель ВРК (рис. 14 (а)) для перемещения в трубопроводах с условным проходным диаметром 200–500 мм, радиусом поворота $1,5D$, углом поворота $90-180^\circ$, конструкция которой представлена и имеет геометрическую длину 478 мм, которая принята конструктивно из допустимой расчётной геометрической длины, а ширину в самом узком месте конструкции 116 мм, форма корпуса ВРК

имеет геометрическую форму отвода, общая тяговая мощность приводных компонентов составляет 700 Н. Выполнение функциональных блока А2-А4 позволило определить и установить управляющий контроллер на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi и Arduino Nano, электрокомпоненты, элементы системы питания с выходной мощностью 288 Вт и датчиками технического контроля в виде визуально-измерительного контроля, разработать опытно-экспериментальный образец (рис. 14 (б)).



(а) Трёхмерная модель ВРК; (б) опытный образец ВРК
 Рис. 14. (а) Трёхмерная модель ВРК; (б) опытный образец ВРК

Опытно-экспериментальные исследования подтвердили возможность движения конструкции ВРК в УПДТ 200–500 мм (рис. 15), а также

перемещение по вертикальному участку трубы с УПДТ 300 мм, который является участком сложной геометрии (рис. 16).



Рис. 15. Движение конструкции ВРК в УПДТ 200-500 мм



Рис. 16. Движение конструкции ВРК по вертикальному участку

Результаты исследования ВРК на испытательном стенде, содержащем два последовательно соединённых отвода 90°, развёрнутых в противоположные стороны с переходом в линейную часть, подтвердили возможность движения разработанного опытного образца, что успешно перемещается внутри испытательного стенда



(рис. 17), без контакта корпусных элементов со стенкой трубопровода, застопоривание конструкции не было зафиксировано. Средняя скорость устройства составляла 2,5–5 м/мин, максимальное потребление тока приводных компонентов составило не более 0,2 А, напряжение в системе питания является стабильным 12,6 В.



Рис. 17. Перемещение экспериментального образца ВРК на испытательном стенде

Заключение. Использование автоматизированных робототехнических систем позволяет снизить количество аварий на трубопроводном транспорте, которые зачастую приводят к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды, высоким финансово-временным издержкам, в сравнении с ручными методами диагностирования. Для проектирования и создания подобных устройств отсутствовали методики или алгоритмы, которые позволили бы выполнять в полном объёме все этапы проектирования. Разработанная методика, включая алгоритмы, позволяет выполнить построение внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии, что отражает результаты опытно-экспериментального исследования движения ВРК. Представлены результаты геометрического анализа, где параметры конструкции с конусно-цилиндрической формой габаритными величинами $L_3 = 555$ мм, $H_{max} = 172$ мм, $H_{min} = 116$ мм позволяют достичь рабочий объём для расположения элементов на 39% выше (в зависимости от минимально заданной ширины), в сравнении со стандартными цилиндрическими формами корпуса. Представлен метод построения трёхмерной модели конструкции ВРК с использованием автоматизированной системы проектирования, выполнено моделирование и опытно-экспериментальное движение конструкции в различных УПДТ и на участке сложной геометрии с углом поворота 90° и 180°, радиусом поворота 1,5D и УПДТ 200 мм, выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции опорной неприводной опорной ноги, который подтвердил возможность применения разработанной конструкции с коэффициентом запаса прочности 1,369. Опытные исследования подтверждают

достоверность полученных результатов моделирования конструкции ВРК, в результате чего были получены акты о проведении испытаний ВРК, что доказывают эффективность предложенной методики построения конструкции.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям, договор №4459ГС1/72580.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пузаков В.С. Схемы теплоснабжения городов России 10 лет спустя: опыт, проблемы, тенденции // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. Т. 21, № 1. С. 55–74. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-1-55-74
2. Куликова Е.С., Кузьмин О.С., Шевцов М.Н. Расширение технической возможности обслуживания технологических трубопроводов для повышения уровня промышленной безопасности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 3(312). С. 41–47. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-41-47
3. Кучев Д.Н., Тонков Е.Ю., Поезжаева Е.В., Щелудяков А.М., Гумаров Э.Х., Белобородов Ф.С. Обоснование выбора конструкции автономного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии // Строительные и дорожные машины. 2023. № 4. С. 51–54.
4. Пат. 201393, Российская Федерация, МПК F17D 3/08, G01N 29/04, G01N 29/06. Устройство для доставки внутритрубных инспекционных снарядов к участкам газопровода, диаметр которых меньше основного диаметра газопровода / А.С. Саломатин, А.В. Третьяков; заявитель и патентообладатель общество с ограниченной

ной ответственностью «Газпром трансгаз Екатеринбург». № 2020111763; заявл. 20.03.2020; опубл. 11.12.2020, Бюл. №35. 9 с.

5. Пат. 2571242, Российская Федерация, МПК F17D 5/02. Автономный адаптивно шагающий робот для диагностики газопроводов / М.Б. Игнатъев, Я.А. Липинский, О.О. Жаринов, В.А. Ненашев, П.И. Макин, Г.М. Герасимов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». № 2014121111/02; заявл. 23.05.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. №35. 9 с.

6. Егоров И.Н. Управление перемещением диагностического робота в трубопроводах с переменным поперечным сечением // Экстремальная робототехника. 2013. Т. 1, № 1. С. 418–425.

7. Голубкин И.А., Антонов О.В. Исследование и моделирование процесса проведения дефектоскопии газопроводов мобильным колесным роботом // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 18–28.

8. Холоденко В.Б., Пахомов А.П. Внутритрубные диагностические роботизированные мобильные комплексы для труб различного диаметра // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 52. С. 630–645.

9. Волков В.А., Варлашин В.В. Конструктивные особенности робототехнических комплексов внутритрубной диагностики // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 4. С. 309–320. DOI: 10.31776/RTCJ.104010

10. Yang X., Lu Y., Yun K., Zheng J., Zhang Y. Construction Design and Kinematics Analysis for the Three Legs Type Gas Piping Robot // 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 840–845. DOI:10.1109/itoec57671.2023.10292092

11. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot // 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Singapore, 2021. Pp. 136–140. DOI:10.1109/ICCAR52225.2021.9463457

12. Kenzhekhan A., Bakytzhanova A., Omirbayev S., Tuieubayev Y., Daniyalov M., Yeshmukhametov A. Design and Development of an In-Pipe Mobile Robot for Pipeline Inspection with AI Defect Detection System // 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Yeosu, Korea, Republic of, 2023. Pp. 579–584. DOI: 10.1007/978-981-16-1543-6_23

13. Zhang Y., Chen H., Wang L., Fu Z., Wang S. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot // 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Harbin, Heilongjiang, China, 2023. Pp. 1847–1852. DOI:10.1109/ICMA57826.2023.10216215

14. Chen D., Zhao M., Ding N., Yuan X., Li N., Fang Z. Design and Implementation of Pipeline Detection Robot with Three-Dimensional Scanning Capability // 2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). ZHENGZHOU, China, 2023. Pp. 1–6.

15. Zheng T., Wang X., Li H., Zhao C., Jiang Z., Huang Q., Ceccarelli M. Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Vol. 27. No. 6. Pp. 4608–4618. DOI:10.1109/TMECH.2022.3160728

16. Wang J., Wu H., Wang J. Design of a Small-Type Wheeled Pipeline Robot Driven by Monocular Vision // 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 1133–1137. DOI:10.1109/ITOEC57671.2023.10291305

17. Niu A., Wang Y., Jin G., Guo M., Xu P., Wang S. Development of Endoscope Inspection Robot System For Water and Gas Pipeline // 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII). Zhuhai, China, 2021. Pp. 82–86. DOI:10.1109/ISMII52409.2021.00025

Информация об авторах

Затонский Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы», профессор РАЕ, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов». E-mail: zxon2000@yandex.ru. Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета. Россия, 618400, г. Березники, ул. Тельмана, д.7.

Кучев Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы», ассистент кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств». E-mail: kucchevdm@yandex.ru. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ». Россия, 614000, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д.9.

Брыляков Александр Владимирович, инженер-конструктор. E-mail: concepttech@mail.ru. Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ». Россия, 614000, г. Пермь, ул. Дзержинского, д.50.

Поступила 19.03.2024 г.

© Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В., 2024

¹Zatonsky A.V., ^{2,3}*Kuchev D.N., ³Brylyakov A.V.

¹Bereznikovskiy branch of Perm National Research Polytechnic University

²Perm National Research Polytechnic University

³Small innovative enterprise LLC «EYARSI»

*E-mail: kuchevdmitri@yandex.ru

METHODS OF CONSTRUCTION AND MODELING OF AN IN-LINE ROBOTIC COMPLEX

Abstract. The high accident rate of pipeline transport of thermal networks and the oil and gas industry poses a great danger to the environment due to the lack of timely control of the inner tube surface, including sections of complex geometry. These include bends, inclined-vertical sections, sections with variable diameter cross-section. The methods of moving in-line diagnostic equipment using robotic devices are given. The problem of the lack of methods for constructing in-line robotic devices that would allow to build a correct sequence of design stages is considered. The purpose of the study is to develop a methodology for constructing and modeling an in-tube robotic complex for diagnosing pipelines of complex geometry, followed by theoretical and experimental confirmation of its applicability. The object of research is the design of an in-tube robotic complex, the subject of research are methods, algorithms, three-dimensional models for diagnosing pipelines of complex geometry. As a result, a technique for constructing an in-tube robotic complex for diagnosing pipelines of complex geometry was developed. The results of geometric analysis were obtained, where the design parameters with a conical-cylindrical shape with dimensions $L_3=555$ mm, $H_{max}=172$ mm, $H_{min}=116$ mm allow to achieve a working volume for the arrangement of elements 23.4–36 % higher, in comparison with the classic design of the body shape. The modeling of the design of an in-tube robotic complex using an automated system is presented. Modeling and experimental movement of the structure in various pipeline diameters is performed in a section of complex geometry with a rotation angle of 90° and 180°, a rotation radius of 1.5D and a diameter of 200 mm, as well as a vertical section, the stress-strain state of the structure of the support non-drive support leg is calculated.

Keywords: in-tube robotic diagnostics, pipeline transport, sections of complex geometry, robot construction methodology, design methods, automated modeling of in-tube robotic device, experimental study of a robotic device.

REFERENCES

1. Puzakov V.S. Heat supply schemes of Russian cities 10 years later: experience, problems, trends [Skhemy teplosnabzheniya gorodov Rossii 10 let spustya: opyt, problemy, tendencii]. Nauchnye trudy: Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN. 2023. Vol. 21. No. 1. Pp. 55–74. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-1-55-74 (rus)
2. Kulikova E.S., Kuzmin O.S., Shevtsov M.N. Expansion of the technical possibility of servicing technological pipelines to increase the level of industrial safety [Rasshirenie tekhnicheskoy vozmozhnosti obsluzhivaniya tekhnologicheskikh truboprovodov dlya povysheniya urovnya promyshlennoj bezopasnosti]. Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse. 2023. No. 3(312). Pp. 41–47. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-41-47 (rus)
3. Kuchev D.N., Tonkov E.Y., Poezhaeva E.V., Sheludyakov A.M., Gumarov E.H., Beloborodov F.S. Justification of the choice of the design of an autonomous robotic complex for the diagnosis of pipelines of complex geometry [Obosnovanie vybora konstrukcii avtonomnogo robototekhnicheskogo kompleksa dlya diagnostiki truboprovodov slozhnoj geometrii]. Construction and road vehicles. 2023. No. 4. Pp. 51–54. (rus)
4. Salomatin A.S., Tretyakov A.V. A device for delivering in-line inspection shells to sections of the gas pipeline whose diameter is less than the main diameter of the gas pipeline. Patent RF, 2020111763, 2020.
5. Ignatiev M.B., Lipinsky Ya.A., Zharinov O.O., Nenashev V.A., Makin P.I., Gerasimov G.M. Autonomous adaptively walking robot for gas pipeline diagnostics. Patent RF, 201412111, 2015.
6. Egorov I.N. Control of the movement of the diagnostic robot in pipelines with variable cross-section [Upravlenie peremeshcheniem diagnosticheskogo robota v truboprovodah s peremennym poperechnym secheniem]. Extreme robotics. 2013. Vol. 1. No. 1. Pp. 418–425. (rus)
7. Golubkin I.A., Antonov O.V. Investigation and modeling of the process of gas pipeline flaw detection by a mobile wheeled robot [Issledovanie i modelirovanie processa provedeniya defektoskopii gazoprovodov mobil'nym kolesnym robotom]. Vestnik of astrakhan state technical university. series:

management, computer science and informatics. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science. 2014. No. 1. Pp. 18–28. (rus)

8. Kholodenko V.B., Pakhomov A.P. Diagnostic In-tube robotic mobile complexes for pipes of various diameters [Vnutritrubnye diagnostic robotic mobile complexes for pipes of various diameters]. Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2022. No. 52. Pp. 630–645. (rus)

9. Volkov V.A., Varlashin V.V. Design features of robotic complexes of in-line diagnostics [Konstruktivnye osobennosti robototekhnicheskikh kompleksov vnutritrubnoj diagnostiki]. Robotics and technical cybernetics. 2022. Vol. 10, No. 4. Pp. 309–320. DOI: 10.31776/RTCJ.104010 (rus)

10. Yang X., Lu Y., Yun K., Zheng J., Zhang Y. Construction Design and Kinematics Analysis for the Three Legs Type Gas Piping Robot. 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 840–845. DOI:10.1109/itoec57671.2023.10292092

11. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot. 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Singapore, 2021. Pp. 136–140. DOI:10.1109/ICCAR52225.2021.9463457

12. Kenzhekhan A., Bakytzhanova A., Omirbayev S., Tuieubayev Y., Daniyalov M., Yeshmukhametov A. Design and Development of an In-Pipe Mobile Robot for Pipeline Inspection with AI Defect Detection System. 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS).

Yeosu, Korea, Republic of, 2023. Pp. 579–584. DOI: 10.1007/978-981-16-1543-6_23

13. Zhang Y., Chen H., Wang L., Fu Z., Wang S. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot. 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Harbin, Heilongjiang, China, 2023. Pp. 1847–1852. DOI:10.1109/ICMA57826.2023.10216215

14. Chen D., Zhao M., Ding N., Yuan X., Li N., Fang Z. Design and Implementation of Pipeline Detection Robot with Three-Dimensional Scanning Capability. 2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). ZHENGZHOU, China, 2023. Pp. 1–6.

15. Zheng T., Wang X., Li H., Zhao C., Jiang Z., Huang Q., Ceccarelli M. Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Vol. 27. No. 6. Pp. 4608–4618. DOI:10.1109/TMECH.2022.3160728

16. Wang J., Wu H., Wang J. Design of a Small-Type Wheeled Pipeline Robot Driven by Monocular Vision. 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 1133–1137. DOI:10.1109/ITOEC57671.2023.10291305

17. Niu A., Wang Y., Jin G., Guo M., Xu P., Wang S. Development of Endoscope Inspection Robot System For Water and Gas Pipeline. 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII). Zhuhai, China, 2021. Pp. 82–86. DOI:10.1109/ISMII52409.2021.00025

Information about the authors

Zatonsky, Andrey V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Professor of RANS, Head of the Department of Automation of Technological Processes. E-mail: zxenon2000@yandex.ru. Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University. Russia, 618400, Berezniki, Telman str., 7.

Kuchev, Dmitry N. Postgraduate student of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Assistant of the Department of Equipment and Automation of Chemical Production. E-mail: kuchevdmitri@yandex.ru. Perm National Research Polytechnic University, A small innovative enterprise LLC «EYARSI». Russia, 614000, Perm, Professor Pozdeev str., 9.

Brylyakov, Alexander V. Design Engineer. E-mail: concepttech@mail.ru. Small innovative enterprise LLC «EYARSI». Russia, 614000, Perm, Dzerzhinskiy str., 50.

Received 19.03.2024

Для цитирования:

Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В. Методика построения и моделирования внутритрубного робототехнического комплекса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 118–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131

For citation:

Zatonsky A.V., Kuchev D.N., Brylyakov A.V. Methods of construction and modeling of an in-line robotic complex. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 118–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131