

## **РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕКТОВ - ГАЗОПРОВОДОВ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ**

**Кретинин О.В.<sup>1</sup>, Сизов А.Ю.<sup>1</sup>, Туманов А.А.<sup>1</sup>, Федосова Л.О.<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, г. Нижний Новгород, ГСП, ул. К. Минина, 24), e-mail: lexa240391@mail.ru*

Представлена бестраншейная технология диагностирования протяженных замкнутых объектов – подземных газопроводов. Рассмотрены варианты предварительной диагностики протяженных замкнутых объектов с использованием телеинспекционных дистанционно управляемых роботов. Существующие варианты диагностических роботов разработаны для газопроводов с диаметром более 500 мм. Однако для городских сетей применяются трубы диаметром 250-400 мм, и применение таких роботов невозможно в силу ряда ограничений, в частности требований к силе тяги, приводу и габаритам – робот должен быть компактным и легким, обладать запасом тяги и дальности хода. Следовательно, требуется разработка робототехнического комплекса, не использующего в качестве движителя электродвигатель в силу его высокой массы и громоздкости. Разработана концепция движителя и предложена конструкция телеинспекционного робота для предварительного диагностирования протяженных замкнутых объектов диаметром менее 500 мм. Представлена возможность быстрого проектирования и перестроения модели робота с помощью системы автоматизированной оптимизации параметров конструкции.

Ключевые слова: телеинспекция, робот, предварительное диагностирование, протяженный замкнутый объект, параметрическая оптимизация, система автоматизированной оптимизации.

## **THE PRE-DIAGNOSIS ROBOTICS DEVICE FOR EXTENDED CLOSED OBJECTS – THE GAS PIPELINES WITH SMALL DIAMETERS**

**Kretinin O.V., Sizov A.Y., Tumanov A.A., Fedosova L.O.**

*Nizhniy Novgorod State Technical University named by R.E.Alexeev, Nizhniy Novgorod, Russia (Official municipal post Minina st., 24, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia), e-mail: lexa240391@mail.ru*

The trenchless technology of the extended closed objects diagnosis – the underground pipelines is presented. Variants of the extended closed objects pre-diagnosis using teleinspection distance controlled robots are considered. Existing variants of diagnostic robots are developed for the gas pipelines with diameters greater than 500 mm. But there are pipes with diameters 250-400 mm in the urban pipelines, and it is impossible to use such robots there due to a number of restrictions, in particular, to requirements for the traction power, the actuator and dimensions – the robot must be compact and lightweight, has reserve of traction and stroke distance. Therefore, the development of the robotic system that does not use as an engine of the electric motor due to its high weight and unwieldiness is required. The conception of the robot propulsor is developed. The construction of the teleinspection pre-diagnosis robot for the extended closed objects with diameters less than 500 mm is proposed. The ability of quick design and rebuild of the robot model using the system of automated optimization of the construction parameters is presented.

Keywords: teleinspection, robot, pre-diagnosis, the extended closed objects, parametric optimization, the system of automated optimization.

Последние десятилетия характеризуются значительным увеличением использования в народном хозяйстве природного газа: газ используется для отопления жилых и рабочих помещений, в бытовых нуждах, для обеспечения горячего водоснабжения. Развивается инфраструктура газопроводных сетей как внутри регионов, в том числе в сельской местности и городах, так и на межрегиональном уровне. Такое развитие подразумевает укрупнение и

усложнение газопроводных сетей за счет строительства новых веток, а также увеличение нагрузки на существующие газопроводы.

Кроме того, внешнеэкономические цели государства в области экспорта природных ресурсов посредством трубопроводного транспорта приводят к строительству новых и возрастанию нагрузки на уже существующие международные магистральные газо- и продуктопроводы [2].

В настоящее время прокладка газопроводов осуществляется под землей. Это означает, что при строительстве, ремонте и эксплуатации газопроводов необходимо соблюдать осторожность, так как газопровод является источником повышенной опасности. Механическое повреждение газопровода высокого давления может привести к взрыву, к человеческим жертвам, к материальным потерям и прекращению газоснабжения потребителей. Утечка газа или иного продукта из подземного трубопровода наносит ущерб окружающей среде и также может стать причиной прекращения газоснабжения. Определить место утечки бывает проблематично – природный газ не имеет цвета и запаха [5].

Чтобы не допускать утечек и аварий, необходимо научиться избегать подобных ситуаций путем повышения требований к качеству строительных и ремонтных работ. Но одних только требований недостаточно - чтобы обеспечить нормальное и безаварийное функционирование газопровода, необходимо уметь управлять этим качеством, проводить мониторинг состояния трубопровода на каждом этапе его жизненного цикла, особое место при этом уделяя процессу эксплуатации.

Однако наблюдение за состоянием трубопровода в работе часто бывает затруднено. Значительная протяженность труб не позволяет применять какие-либо комплексные системы диагностики и наблюдения по всей длине протяженного замкнутого объекта (ПЗО). Размещение труб под землей не позволяет проводить наблюдение за их состоянием и ремонт снаружи, а выкапывать трубы ПЗО для диагностики является не только нецелесообразным, но и невозможным - проведение работ по диагностике и ремонту в условиях густонаселенного города затрудняется развитыми сетями коммуникаций и необходимостью ограничивать или прерывать движение транспорта. Вызывает также затруднения проведение работ в трубопроводах, расположенных под руслом рек и под водоемами.

Таким образом, напрашивается вывод, что в настоящее время разработка универсальной технологии проведения диагностических работ в протяженных замкнутых объектах – газотрубопроводах с целью обеспечения безаварийной работы и предупреждения нештатных ситуаций является актуальной научно-технической задачей. При этом необходимо выбрать такую технологию, которая позволит проводить работы, не выполняя

значительных раскопок трубопровода – так называемую бестраншейную технологию, и обеспечит запрашиваемый уровень качества работ [1].

На сегодняшний день применяется бестраншейная технология диагностирования ПЗО изнутри посредством запуска по трубе диагностического снаряда. Снаряд намагничивает трубу, а затем снимает показания остаточного намагничивания датчиками Холла. После извлечения снаряда из трубы информация считывается, обрабатывается, и делается вывод относительно состояния ПЗО. Такая технология успешно применяется в магистральных трубопроводах, где снаряд запускается на станции запуска в ПЗО и идет в потоке газа до станции выгрузки.

Подобным образом проводят диагностику межрегиональных газопроводов. Но, в отличие от магистральных газопроводов высокого давления, здесь прекращается транспорт газа по диагностируемой ветке, подготавливается отрезок ПЗО протяженностью 1-3 км для диагностики: с обеих сторон отрезка ПЗО раскапывают и вскрывают, а затем подготавливают запуск снаряда. В этом случае снаряд протягивается тросом. Данная технология имеет ряд сложностей и ограничений.

1. Необходима предварительная проверка ПЗО.
2. Перед запуском снаряда необходимо протянуть тросы.
3. Затруднено диагностирование на участках большой протяженности.

Предварительное диагностирование ПЗО необходимо для определения наличия внутри трубы инородных тел и засоров, способных помешать движению снаряда. Наиболее подходящей технологией предварительного диагностирования является применение телеинспекционных роботов, представляющих собой колесное или гусеничное шасси с установленным на борту оборудованием: элементами привода (двигателями и передачами), устройствами связи и управления и видеокамерой с фонарем.

Данная технология достаточно широко применяется как в России, так и за границей. К преимуществам применения телеинспекционных роботов можно отнести:

- возможность проведения предварительной диагностики непосредственно изнутри, не прибегая к раскапыванию трубы;
- возможность достаточно точного определения места повреждения или засорения канала трубы;
- сокращение эксплуатационных расходов;
- сокращение сроков выполнения работ [2].

Все существующие на настоящий момент телеинспекционные роботы являются дистанционно управляемыми системами. Основными характеристиками роботов являются диаметр ПЗО, протяженность участка диагностирования и тип канала связи [6]. Для роботов,

управление которыми осуществляется по кабелю, протяженность обследуемого участка ограничивается длиной кабеля, размещаемого на кабельном барабане системы, и способностью робота протащить за собой кабель по трубопроводу, т.е. определяется силой тяги. В свою очередь, сила тяги зависит от мощности приводов робота, его массы (чем тяжелее робот, тем дальше он может протащить кабель), материала и формы колес или гусениц, а также от материала и состояния трубопровода. Максимальная протяженность участка диагностирования для таких роботов составляет до 100 м на малых диаметрах труб (250-500 мм) и 200-400 м на больших диаметрах (свыше 500 мм) [2].

Радиоуправляемые роботы в данном отношении являются более универсальными. На рис. 1 представлен образец такой системы. Данный робот был разработан специально для проведения предварительной видеодиагностики внутренней поверхности ПЗО и протягивания троса для запуска снаряда.



*Рис. 1. Телеинспекционный радиоуправляемый робот для диагностирования ПЗО*

Робот представляет собой колесное шасси с приводом от одного мотора на все колеса посредством цепных передач. В передней части установлена видеочкамаера с подсветкой. На борту робота расположены элементы питания, связи и управления, заключенные в герметичные корпуса. Сзади к роботу прикрепляется протягиваемый трос. Максимальная протяженность диагностирования данного робота составляет 3 км [4].

Единый привод на все колеса упрощает и облегчает конструкцию. Однако из-за жесткости привода накладываются значительные ограничения на маневренность робота – при изгибах ПЗО шасси может опрокинуться. Такая задача отчасти решается с помощью установки поджимных роликов или с применением робота-эвакуатора, но тем не менее это приводит к усложнению условий работы и увеличению времени диагностирования. Также колеса робота могут проскальзывать из-за наличия смазки на стенках ПЗО, вследствие чего робот может застрять, и потребуются дополнительные средства для его извлечения.

Существуют определенные ограничения с точки зрения обеспечения работа энергией. Все время нахождения робота внутри ПЗО должно обеспечиваться питание его исполнительных элементов и привода, что предопределяет необходимость использования аккумуляторов высокой емкости.

Наиболее сложным и серьезным является ограничение в диаметре исследуемого ПЗО. Данный робот способен работать в ПЗО диаметром 500-1000 мм. На диаметрах менее 500 мм (например, городские сети имеют диаметр 200-300 мм) задачи предварительного диагностирования решить с помощью таких роботов практически невозможно, так как в этом случае накладываются существенные ограничения на габариты робота. В этой ситуации размещение аккумуляторов и двигателей достаточной мощности крайне затруднительно, а использование маломощных элементов питания и приводов ограничивает технологические возможности робота в плане максимальной протяженности участка диагностирования и времени работы машины. Данная проблема является наиболее острой и трудноразрешимой. Для ее решения необходима разработка нового робототехнического комплекса, способного обходить указанные ограничения.

Примером технологии, позволяющей выполнять внутритрубное диагностирование ПЗО малых диаметров, может служить решение, разработанное в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, – робот, в качестве привода продольного перемещения использующий разность давления с разных концов диагностируемого отрезка ПЗО.

Робот представляет собой модульную структуру, состоящую минимально из трех модулей (общее количество модулей определяется поставленной задачей), соединенных между собой общей осью. Ведущий и замыкающий модуль жестко закреплены на оси, центральный модуль имеет возможность продольного перемещения относительно оси. На ведущем модуле устанавливается камера для осуществления видеосъемки внутренней поверхности трубы. Между модулями располагаются элементы питания камеры и устройства связи.

Каждый модуль представляет собой многослойную комбинированную структуру, состоящую из лепестковых элементов и упругой мембраны круглого сечения между ними. Лепестковый элемент выполнен в виде диска из упругого материала (например, резины), окантовка которого имеет косые надрезы, образующие лепестки. Предназначен он для восприятия разницы давлений и преобразования ее в движение робота. Диаметр лепесткового элемента на 20-30 мм превышает диаметр ПЗО. Мембрана, расположенная между двумя лепестковыми элементами, представляет собой диск диаметром меньше диаметра ненарезанной части лепесткового элемента. В пространстве между модулями устроены гофрированные герметичные камеры. В ведущем и замыкающем модулях

встроены пневмоусилители, позволяющие перепускать воздух в эти камеры, тем самым создавая повышенную разность давления между модулями. Каждый модуль оснащен тормозными устройствами наподобие цанги, удерживаемыми роликами, обеспечивающими центрирование робота относительно стенок ПЗО и предотвращающими смятие лепесткового элемента в нижней части под действием силы тяжести.

Сам робот, таким образом, концептуально представляет собой снаряд в виде поршня, движущийся при наличии достаточной разности давлений с разных сторон робота. Разница давлений нагнетается при помощи воздуходувки или компрессора, расположенных с концов отрезка ПЗО (один конец).

Алгоритм работы робота следующий. Робот с прицепленным тросом загружается в ПЗО, затем подается давление от компрессора. Робот начинает движение внутри ПЗО. В случае обнаружения препятствия в виде мелкого мусора, камней и пр. они сначала будут забираться, а затем огибаться лепестковым элементом. При этом благодаря количеству модулей система останется герметичной. При обнаружении значительных засорений ПЗО можно определить местоположение засора за счет одометрического датчика на борту робота. В дальнейшем, зная место засора, можно его легко устранить. В случае застревания робота при прохождении крутых восхождений, горных участков или иных сложных элементов ПЗО оператор включает режим раздельного движения. В этом случае цанговые тормоза ведущего и замыкающего модулей распираются в стенки трубы, а клапаны замыкающего модуля включаются, увеличивая давление в полости между ним и центральным модулем, за счет чего последний двигается вперед. При достижении центральным модулем ведущего клапана замыкающего модуля отключаются. Тормоза замыкающего и ведущего модулей переходят в начальное положение, а центральный модуль в этот момент стопорится своим тормозом. Происходит перекачивание воздуха из задней полости в переднюю, за счет чего и с учетом внешнего давления ведущий и замыкающий модуль движутся вперед относительно неподвижного центрального. Далее схема повторяется до тех пор, пока трудный участок не будет пройден.

При прохождении изгибов (поворотов) ПЗО робот не будет застревать благодаря упругости оси и диаметру лепесткового элемента (минимальный радиус изгиба газопровода равен трем его диаметрам).

Инновационный способ перемещения робота позволяет отказаться от привычного электромотора в качестве привода. Это обеспечивает снижение массы робота, уменьшение его габаритов и отсутствие необходимости установки мощных аккумуляторов для питания двигателей – необходимо лишь обеспечить питание видеокамеры, энергопотребление которой существенно ниже. Снижение массы робота положительно повлияет на его

способность преодолевать подъемы и нести трос. Кроме того, применение пневмоусилителей позволяет в разы увеличивать подаваемую энергию, что является очень важным и ценным свойством при работе в труднодоступных местах.

Помимо всего сказанного, пневматический принцип движения робота позволяет определять места пробоев ПЗО. В случае пробоя робот начнет замедляться, а давление на манометре перед ПЗО начнет снижаться – нагнетаемый воздух будет стравливаться в пройденное отверстие. Благодаря одометрическому датчику робота можно точно определить место пробоя. Робота же в этом случае можно вытащить за трос.

Таким образом, подобный робот способен решить практически все проблемы, возникающие при эксплуатации колесных или гусеничных роботов. В настоящее время в НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана концептуальная модель робототехнического устройства, создан макетный образец для отработки алгоритма и разрабатываются исполнительные механизмы робота – тормоза, перепускные клапаны, поджимные ролики.

Параллельно с натурным моделированием ведется работа по созданию виртуальной 3D-модели робота. Необходимость создания виртуальной модели диктуется потребностью в быстром пересчете и перестроении проекта под меняющиеся условия – изменение типоразмера робота, смена количества модулей, изменения в конструкции элементов и пр. Кроме того, автоматизированное проектирование имеет большое количество преимуществ по сравнению с ручным и натурным моделированием.

Однако в условиях гибкого мелкосерийного производства недостаточно обычной автоматизации проектирования. Необходимо комплексное решение, позволяющее максимально автоматизировать процесс перестроения моделей под новые задачи. Подобное решение разработано в НГТУ им Р.Е. Алексеева и получило название системы автоматизированной оптимизации (CAO). Базовым ядром системы является САПР, в данном случае – Autodesk Inventor. Также CAO использует возможности математических расчетных пакетов Microsoft Excel и PTC MathCad. Модель в среде Inventor полностью параметризована. Далее создаются прикладные математические модели, ориентирующиеся на конкретные целевые функции (например, облегчение конструкции, смена типоразмера и др.). На выходе системы получается набор параметров изделия, который затем загружается в среду Inventor из внешнего файла и применяется к конкретной модели, и модель перестраивается под обновленную целевую функцию. Такой подход обеспечивает максимально быстрый переход от одного вида модели к другому в зависимости от целевых функций, но требует четкого и обоснованного построения математической модели целевых функций. Пример разработки и создания CAO на базе Autodesk Inventor представлен в [3].

## Список литературы

1. Горохов Н.Н., Кавокин В.П., Пахомов О.В., Тынчеров Э.Р. Прибор для инспекции трубопровода : патент России № 2068148, 1996.
2. Кретинин О.В. Разработка конструкции робототехнического комплекса для диагностирования протяженных замкнутых объектов малых диаметров в среде Autodesk Inventor с использованием системы автоматизированной оптимизации / Каляшина А.В., Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - 2014. - № 5 (107), специальный выпуск. - С. 282-285.
3. Кретинин О.В. Система автоматизированной оптимизации структурно-параметрических моделей по технико-экономическим критериям в виртуальной среде / Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - 2014. - № 5 (107), специальный выпуск. - С. 271-275.
4. Никоненко А.Д., Фесенко С.С., Захаров Е.П., Каракушьян А.Г. Робототехническая система инспекции трубопровода : патент России № 133896, 2014.
5. Строительный нормы и правила : СНиП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы.
6. Харионовский В.В., Окопный Ю.А., Радин В.П. Исследование устойчивости газопроводов, имеющих размытые участки // Проблемы надежности газопроводных конструкций. – М. : ВНИИГАЗ, 1991. - С. 94-99.

### Рецензенты:

Иванов А.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация машиностроения», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород;

Панов А.Ю., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.