

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-53-52-59>

ПРОХОДЧЕСКИЙ РОБОТ-ЗМЕЯ ДЛЯ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ ПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ

Либерман Я.Л., Лукашук О.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Ключевые слова: проходческий робот-змея, горизонтально-направленное бурение, полиэтиленовые трубы, цифровой гидроцилиндр, бестраншейная прокладка, ультразвуковая эхолокация.

Аннотация. В статье рассматривается конструкция и принцип работы проходческого робота-змеи, предназначенного для бестраншейной прокладки пластиковых труб диаметром до 100-110 мм из полиэтилена. Предложенная разработка реализована в двух вариантах (подача трубы из бухты или отрезками) и основана на адаптации технологии горизонтально-направленного бурения. Головная часть робота включает торцевую фрезу с твердосплавными ножами из сплава ВК30 (обосновано дефицитом вольфрама), ультразвуковой датчик для эхолокации грунта, нагревательный тэн для управляемого изгиба трубы и три цифровых гидроцилиндра с двоичным управлением, обеспечивающих дискретный шаг перемещения. Система управления роботом осуществляется дистанционно через интернет. Обоснована универсальность применённых принципов, позволяющая снизить стоимость и эксплуатационные затраты по сравнению с существующими проходческими машинами.

TUNNEL BORING ROBOT-SNAKE FOR UNDERGROUND LAYING OF PLASTIC PIPES

Liberman Ya.L., Lukashuk O.A.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Keywords: tunnel boring robot-snake, horizontal directional drilling, polyethylene pipes, digital hydraulic cylinder, trenchless laying, ultrasonic echolocation.

Abstract. The article discusses the design and operating principle of a tunnel boring robot-snake intended for trenchless laying of plastic pipes with a diameter of up to 100-110 mm made of polyethylene. The proposed development is implemented in two versions (pipe feeding from a coil or in sections) and is based on the adaptation of horizontal directional drilling technology. The head of the robot includes a face milling cutter with carbide inserts made of VK30 alloy (justified by the tungsten shortage), an ultrasonic sensor for soil echolocation, a heating element for controlled pipe bending, and three digital hydraulic cylinders with binary control providing a discrete stepping motion. The robot control system is operated remotely via the Internet. The versatility of the applied principles is substantiated, allowing for reduced cost and operational expenses compared to existing tunneling machines.

Ежегодно в мире прокладываются сотни тысяч километров подземных коммуникаций – газопроводов, водоводов, канализации, кабельных линий. Традиционные открытые (траншейные) методы всё чаще уступают место бестраншейным технологиям, позволяющим сохранять дорожное покрытие, ландшафт, зелёные насаждения и избегать существенных затрат на восстановление инфраструктуры. Одной из самых востребованных

технологий стало горизонтально-направленное бурение (ГНБ). Согласно данным аналитического агентства Grand View Research, мировой рынок ГНБ оценивался в 8,18 млрд. долл. в 2024 году и, по прогнозам, достигнет 16,08 млрд. долл. к 2030 году [1].

Однако существующие ГНБ-комплексы обладают рядом ограничений: они громоздки, требуют мощных наземных установок, сложны в управлении при криволинейной прокладке и, главное, практически не адаптированы к работе с трубами малого диаметра (до 110 мм). Между тем именно такие трубы составляют основу распределительных сетей в жилых кварталах, промышленных зонах и сельской местности. Классические проходческие щиты и буровые установки для них избыточны по массе, энергопотреблению и стоимости, а ручные методы (прокол, продавливание) не обеспечивают точности и не позволяют огибать препятствия.

Особую проблему представляет прокладка полиэтиленовых труб – наиболее популярного материала благодаря коррозионной стойкости, гибкости и долговечности. Полиэтилен легко царапается, деформируется при перегреве и требует бережного обращения. Создание компактного, автономного, интеллектуального устройства, способного одновременно бурить канал и прокладывать в нём полиэтиленовую трубу, остаётся актуальной научно-технической задачей.

В данной статье предлагается принципиально новое решение – проходческий робот-змея. В отличие от существующих аналогов, он не требует массивной наземной буровой установки; позволяет выполнять не только прямолинейную, но и управляемую криволинейную прокладку; использует оригинальную систему перемещения на основе цифровых гидроцилиндров с двоичным управлением; адаптирован именно к полиэтиленовым трубам малого диаметра (до 100-110 мм); управляется дистанционно, что исключает присутствие человека в опасной зоне.

Более шестидесяти лет назад американский строитель и изобретатель Мартин Черрингтон разработал технологию производства микротоннелей, получившую название «горизонтально-направленное бурение». Через 10 лет эта технология достигла Европы, а в 1994 году – России. Сегодня при строительстве систем газораспределения, водоснабжения, канализации, кабельной связи и пр. ГНБ, обеспечивающее бестраншейную прокладку труб, получило распространение по всему миру. Оно используется в городских условиях, под дорогами, железнодорожными путями, реками и реализуется с помощью специальных материалов и оборудования.

По данным на 2026 год, 92% от общей длины проложенных по технологии ГНБ труб составляли полиэтиленовые трубы. При этом 60% из них имели диаметр 110 мм, 15% – 160 мм, а 25% – меньше 100 мм [2]. Полиэтиленовые трубы популярны в ГНБ благодаря ряду преимуществ: коррозионная стойкость (не подвержены ржавчине, устойчивы к агрессивным средам); гибкость и пластичность (позволяет огибать подземные препятствия); легкий вес (в 3-4 раза меньший стальных и чугунных аналогов); гладкие

внутренние стенки (минимизируют отложения и обеспечивают высокую пропускную способность); долговечность (гарантированный срок службы свыше 50 лет) [3, 4].

Учитывая изложенное, предлагаемый робот-змея был ориентирован именно на прокладку пластиковых труб из полиэтилена. Предназначен он для прокладки труб диаметром до 100-110 мм из материалов марок ПНД/ПЭ, ПЭ80 и ПЭ100 и выполнен в двух вариантах: с подачей трубы из бухты и в виде её отрезков.

На рисунке 1 показана конструктивная схема головной части робота. Состоит эта часть из двух секций - передней и задней. В передней расположен рабочий орган 1 робота, представляющий собой торцевую фрезу с радиальными вставными твердосплавными ножами; регулируемый электропривод 2 вращения фрезы; блок управления 3 тороидальной формы и ультразвуковой датчик 4, работающий методом эхолокации. В задней секции размещены коаксиальные цифровые гидроцилиндры 5, шарнирно закреплённые на перегородке 6, разделяющей секции, и на обращённой в полость секции поверхности опорного элемента 7. На поверхности последнего, обращённой к полости бурового канала, установлен нагревательный тэн 8 с блоком 9 электропитания и стабилизации температуры его нагрева, причём обе секции заключены в прочные оболочки, только передняя 10 в жесткую, а задняя 11 – в эластичную (типа сильфона с большим интервалом гребней).

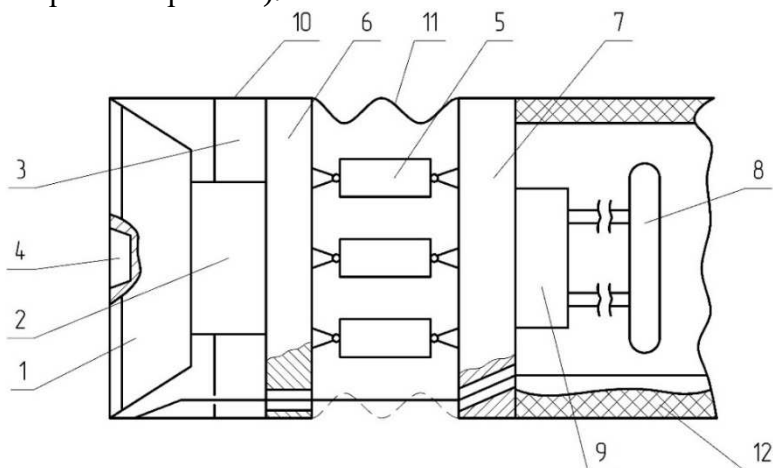


Рис. 1. Конструктивная схема головной части робота

Несмотря на то, что ГОСТ 880-75 [5] регламентирует для горного инструмента преимущественное применение твердого сплава ВК8, фреза рабочего органа робота выполнена с использованием сплава ВК30. Это обусловлено дефицитом вольфрама в России (рис. 2) и прогрессирующим увеличением его стоимости (рис. 3) [6, 7]. Сплав же ВК 30 содержит вольфрама на 23,7% меньше, чем ВК8, при этом его прочность не ниже: предел прочности первого – 2400, а второго – 1660 МПа.

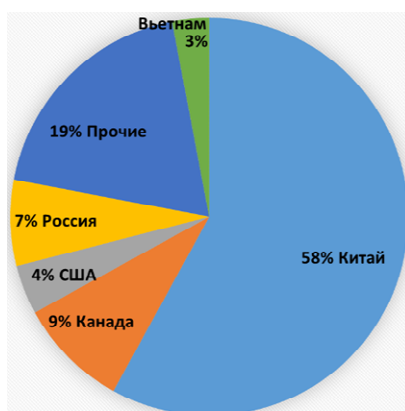


Рис. 2. Распределение запасов вольфрама в мире

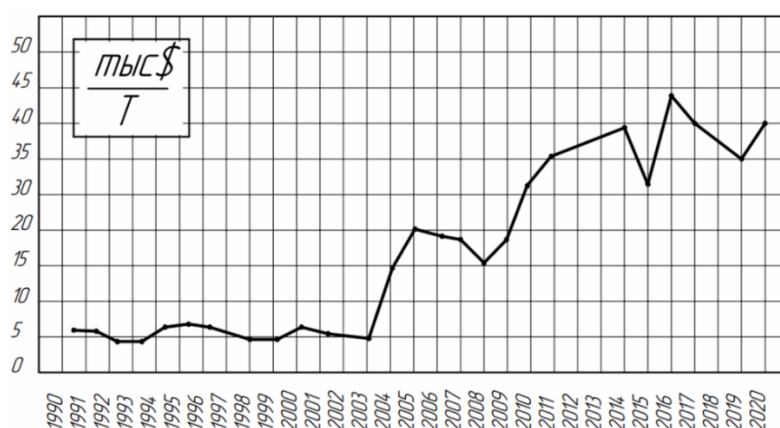


Рис. 3. Динамика цен на металлический вольфрам

В качестве ультразвукового датчика применён излучатель-приёмник ASIC ES24.33, работающий совместно с микросхемой TDK/B 59 150×075. Его диапазон от 12 до 200 см, угол приёма сигнала обнаружения 60°, а размеры 15×13 мм. Теном служит нагреватель ЭНПМ 10×150;0,1х220; 1 производства предприятия «Полимернагрев» мощностью 200 Вт, а цифровым гидроцилиндром – трехразрядный цилиндр, построенный по схеме, приведённой на рисунке 4.

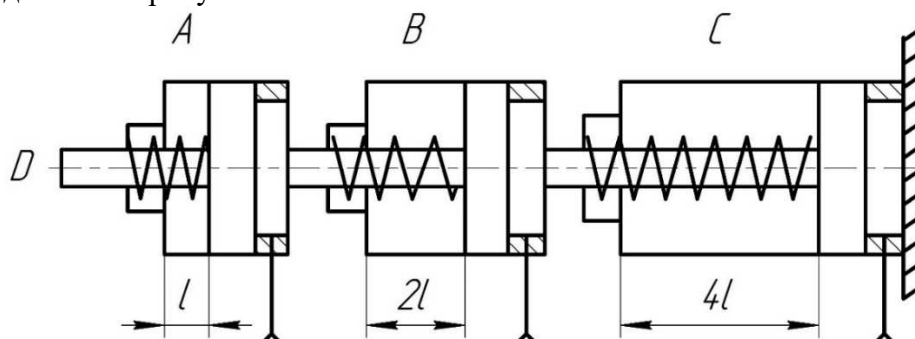


Рис. 4. Схема цифрового гидроцилиндра

Особенностью цилиндра является то, что поршни в его камерах А, В и С имеют, соответственно, длины ходов l , $2l$ и $4l$. Благодаря этому, подавая в них жидкость по командам, представляющим собой комбинации двоичного кода, выходной шток D цилиндра перемещается на величину l , $2l$, $3l$, $4l$, $5l$, $6l$ и $7l$. Цилиндры (их количество три) размещены по окружности задней секции робота с угловым расстоянием 1200 и при включении воздействуют на перегородку 6 и опорный элемент 7 (рис. 1). Когда в процессе эксплуатации робота труба 12 подана вперёд механизмом подачи, усилие, развиваемой цилиндрами, прижимает опорный элемент к её торцу и заставляет рабочий орган робота переместиться тоже вперёд, передавая на него усилие через перегородку и разрушая грунт. Затем жидкость из цилиндров сливается и труба снова подаётся вперёд и рабочий орган снова, отталкиваемый цилиндрами от опорного элемента, перемещается. Так шагами и происходит движение робота. Величина шага при этом определяется кодовой комбинацией, управляющей поступлением жидкости в цилиндры. Если жидкость поступает во все три цилиндра одинаково, то робот движется прямолинейно. Если только в некоторые, то его головная часть изгибается и он движется по кривой, радиус которой зависит от того, какие цилиндры и как сработали. Изгиб может совершаться головной частью робота вместе с взаимодействующей с ней передней частью трубы (телом робота). Для этого тен включается на определённую температуру (как правило, не превышающую 80°C) и тогда пластиковая труба легче гнётся.

Управление цилиндрами и тенom осуществляется по сигналам от ультразвукового датчика, пропускаемого через аналого-цифровой преобразователь. Сигнал характеризует плотность грунта и локализацию его твердых участков. Плотность задает шаг перемещения робота, характер локализации твердых включений в грунт заставляет робота воспринимать их как препятствия движению и обходить.

Процесс управления роботом ведется через оптоволоконный кабель размещаемый внутри трубы. Передача управляющих воздействий на робота производится удалённо с использованием интернет-протоколов. Элементы системы связи при этом скомпонованы в виде отдельного блока, установленного между цилиндрами в задней секции головной части робота (на рис. 1 он условно не показан), дополняющего блок 3. Там же размещена и гидроаппаратура. Она выполнена компактно и построена на базе шестеренного микронасоса марки KO,6(E60504006) компании Hydronit, создающем максимальное давление 160 бар, и миниатюрных пьезоэлектрических гидроклапанов Piezo Sestems серии MicroValve.

Подача трубы при эксплуатации робота производится устройством, конструкция которого определяется размерами трубы. Если её диаметр близок к предельному, и она состоит из отрезков, то используется типовой кассетный магазин и рольганг [8]. Если она выполняется из бухты (при меньших диаметрах), то оно имеет вид, соответствующий конструктивной схеме, приведённой на рисунке 5, где 1 – бухта, 2 – схематическое изображение

механизма подачи с пневмоцилиндром, 3 – резервуар с мыльным водным раствором, играющим роль смазки.

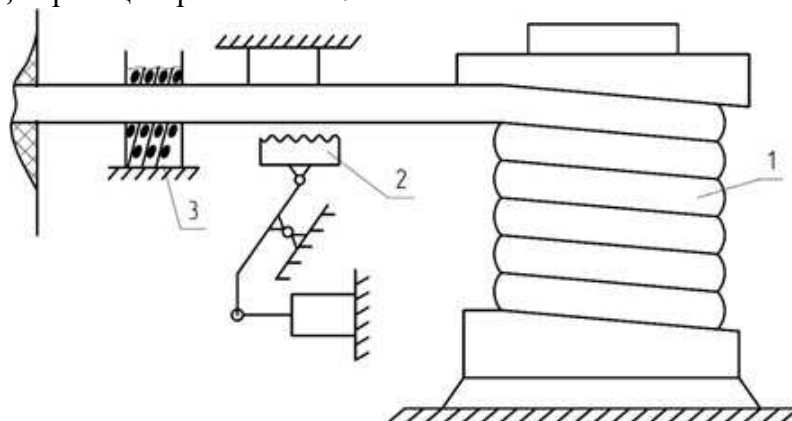


Рис. 5. Схема устройства подачи трубы из бухты

Удаление шлама при прокладке труб роботом-змеей в мягких грунтах может не потребоваться. В этом случае будет достаточно его рабочий орган сделать коническим, способным раздвигать и уплотнять грунт [9]. В противном случае его можно снабдить, например, гибким шнековым транспортером (тросом, с закрепленной на нем спиральной лентой [10]), эвакуирующим шлам в зону размещения устройства подачи (рис. 1, поз. 13).

Предложенный робот-змея намного проще, чем существующие проходческие машины для прокладки тоннелей под трубопроводы [11]. Он позволяет выполнять не только прямолинейную, но и криволинейную прокладку пластиковых труб одновременно с производством буровых каналов. Использование цифровых гидроцилиндров с двоичным управлением и ультразвуковой эхолокации обеспечивает высокую точность позиционирования и адаптацию к неоднородным грунтам. Разработка отличается компактностью, низкими эксплуатационными затратами и универсальностью применённых принципов. Принципы, использованные при разработке робота-змеи, довольно универсальны и могут быть применены в других конструкциях аналогичного назначения, что снижает их стоимость, эксплуатационные затраты и способствует повышению надёжности.

Список литературы

1. Grand View Research. Horizontal Directional Drilling Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Onshore And Offshore), By Technology, By End-use, By Machine Type, By Machine Parts, By Rig Type, By Tooling, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/horizontal-directional-drilling-hdd-market>.
2. Агарков А.М., Межуев Д.С., Тихонов А.А. Технология прокладки коммуникаций методом горизонтально-направленного бурения // Инновационная наука. – 2017. – №5. – С. 42-44.

3. Брейдбург А.И. Аналитика: современный рынок ГНБ (по материалам 18-го ежегодного исследования МАС ГНБ) // Бестраншейные технологии. – 2021. – №2(6). – С. 3-9.
4. Киселев Д.А., Семикова Е.Н. Перспективы применения полиэтиленовых труб в сравнении с металлическими в системах газоснабжения // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. – Вып. 12. – С. 159-161.
5. ГОСТ 880-75. Изделия твердосплавные для горного инструмента. Формы и размеры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 27 с.
6. Вольфрам // Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии, 2023. – С. 283-299.
7. Ситникова Е.В. Рынок вольфрама и продукции 2025 (2026) [Электронный ресурс] // MetalResearch. – 2026. – Режим доступа: https://metalresearch.ekatr.ru/tungsten_market.html.
8. Колесников А.Г., Яковлев Р.А., Мальцев А.А. Технологическое оборудование прокатного производства: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 158 с.
9. Макиенко А.В., Садиева А.Э. Подземный проходческий робот // Успехи современного естествознания. – 2012. – №6. – С. 154-155.
10. Патент №2729862 РФ. Гибкий шнековый транспортер / В.П. Карпов, В.К. Скоркин, И.А. Тихомиров. – Заявка №2019131864 от 20.02.2020; опубл. 12.08.2020.
11. Прокопьева В.М., Каймонов М.В. Обзор роботизированной техники в горном деле // Интерактивная наука. – 2023. – №8(84). – С. 49-53.

References

1. Grand View Research. Horizontal Directional Drilling Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Onshore And Offshore), By Technology, By End-use, By Machine Type, By Machine Parts, By Rig Type, By Tooling, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/horizontal-directional-drilling-hdd-market>.
2. Agarkov A.M., Mezhuiev D.S., Tikhonov A.A. Technology of laying communications using horizontal directional drilling // Innovative science. 2017, no. 5, pp. 42-44.
3. Breidburg A.I. Analytics: the modern HDD market (based on the 18th annual study of the International Association of HDD Operators) // Trenchless Technologies. 2021, no. 2(6), pp. 3-9.
4. Kiselev D.A., Semikova E.N. Prospects for the use of polyethylene pipes in comparison with metal ones in gas supply systems // Interuniversity collection of articles by competition winners. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2010. – Iss 12. – P. 159-161.
5. GOST 880-75. Carbide products for mining tools. Shapes and dimensions. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2003. – 27 p.
6. Tungsten. // State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022". – М.: Ministry of Natural Resources and Environment, 2023. – P. 283-299.

7. Sitnikova E.V. Tungsten and Product Market 2025 (2026) [Electronic resource] / E.V. Sitnikova // MetalResearch. 2026. Access mode: https://metalresearch.ekatr.ru/tungsten_market.html.
8. Kolesnikov A.G., Yakovlev R.A., Maltsev A.A. Technological equipment for rolling production: a textbook. – M.: Publ. House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. – 158 p.
9. Makienko A.V., Sadieva A.E. Underground mining robot // Advances in modern natural science. 2012, no. 6, pp. 154-155.
10. Patent No. 2729862 RU. Flexible screw conveyor / V.P. Karpov, V.K. Skorkin, I.A. Tikhomirov. – Appl. No. 2019131864 from 20.02.2020; publ. 12.08.2020.
11. Prokopyeva V.M., Kaimanov M.V. Review of robotic technology in mining // Interactive science. 2023, no. 8 (84), pp. 49-53.

Либерман Яков Львович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные машины и роботы»	Liberman Yakov Lvovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of lifting and transport machines and robots
Лукашук Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъёмно-транспортные машины и роботы»	Lukashuk Olga Anatolyevna – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of lifting and transport machines and robots
o.a.lukashuk@urfu.ru	

Received 10.04.2026