

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 62-835  
doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-14-23

## РОБОТ-КРОТ ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКИ ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Александр Николаевич Рукавицын<sup>1✉</sup>, Евгений Николаевич Политов<sup>2</sup>, Анастасия Романовна Климова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>1</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>2</sup> politovyevgeny@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

<sup>3</sup> ka8139405@gmail.com

### Аннотация

Целью исследования является разработка роботизированного комплекса для подземной прокладки коммуникаций. Показано, что разработка подобного комплекса может быть осуществлена при применении модульного принципа конструирования, позволяющего рассматривать создаваемую конструкцию состоящей из двух модулей – транспортной платформы и бурильной установки, согласованная работа которых позволяет выполнять требуемый технологический процесс с заданной точностью. Разработана на основе методов математического моделирования модель транспортного модуля подземного робота-крота, позволяющая исследовать и определить динамические параметры в движения роботизированной системы. Численное решение полученных уравнений осуществлялось в среде *Mathlab*. Проведен прочностной анализ бурильного винта, который позволил определить его нагрузочную способность и под-

твердить работоспособность предлагаемой конструкции. Новизна работы заключается в установлении режимов динамического нагружения основного рабочего органа робота. Результаты проведенного исследования создают предпосылки к разработке системы автоматического управления подземным роботом.

Выводы: разработана математическая модель мобильного робота для прокладки подземных коммуникаций, исследованы режимы его работы, предложена методика управления многомерным объектом, регулировка которого осуществляется путем определения силовых и позиционных параметров, которые поддерживаются в заданном диапазоне.

**Ключевые слова:** робот-крот, прокладка, коммуникации, транспортная платформа, винтовой бур, параметры, плотность, грунт, результаты, моделирование.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования:

Рукавицын А.Н. Робот-крот для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / А.Н. Рукавицын, Е.Н. Политов, А.Р. Климова // *Транспортное машиностроение*. – 2024. – № 11. – С. 14-23. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-14-23.

Original article  
Open Access Article

## ROBOT MOLE FOR TRENCHLESS LAYING OF UNDERGROUND PIPELINES

Aleksandr Nikolaevich Rukavi-tsyn<sup>1✉</sup>, Evgeny Nikolaevich Politov<sup>2</sup>, Anastasia Romanovna Klimova<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>1</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>2</sup> politovyevgeny@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

<sup>3</sup> ka8139405@gmail.com

## Abstract

The study objective is to develop a robotic complex for underground laying of pipelines. It is shown that such a complex can be developed using the modular design principle, which allows considering the design consisting of two modules - a transfer platform and a drilling machine, which coordinated operation allows performing the required technological process with a given accuracy. A model of the transfer module of an underground mole robot is developed based on mathematical modeling methods, which makes it possible to study and determine the dynamic parameters in the movement of a robotic system. The numerical solution of the obtained equations is carried out in *Mathlab* platform. A strength analysis of the drill screw is carried out, which made it possible to determine its load capacity and confirm the operability of the proposed

structure. The novelty of the work is in finding dynamic loading modes of the main working body of the robot. The results of the conducted research create prerequisites for the development of an automatic control system for an underground robot.

Conclusions: a mathematical model of a mobile robot for laying underground pipelines is developed, its operating modes are studied, and a technique for controlling a multidimensional object is proposed; its adjustment is carried out by determining power and positional parameters that are maintained in a given range.

**Keywords:** mole robot, laying, pipelines, transfer platform, screw drill, parameters, density, soil, results, modeling.

**Funding:** This paper is funded according to the implementation of the development program of the Southwest State University "Priority 2030" project.

## Reference for citing:

Rukavitsyn AN, Politov EN, Klimova AR. Robot mole for trenchless laying of underground pipelines. *Transport Engineering*. 2024;11:14-23. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-14-23.

## Введение

В последнее время в сфере жилищно-коммунального хозяйства, а также в индивидуальном малоэтажном строительстве используются методы подземной прокладки электрокабелей, сетей передачи данных и различных коммуникаций. Такая тенденция обусловлена общей необходимостью осуществлять подземную прокладку кабелей и коммуникаций с целью повышения их эффективности и помехоустойчивости, а также высвобождения транспортных и строительных площадок и пространств. Традиционные способы прокладки подземных коммуникаций являются достаточно затратными по времени, финансовым и людским ресурсам, поскольку сопровождаются большим объемом земляных работ [1]. При этом, зачастую прокладка кабелей и коммуникаций путем рытья траншей невозможна и существенно влияет на сложившиеся жизненные процессы, поскольку создает помехи проезду транспорта, требует ограждение территории и т.п. Примером подобных ситуаций может стать прокладка кабелей под железнодорожными путями, под дорогами общего пользования и водными преградами, под зелеными насаждениями и другими объектами [2].

Поэтому вопросы разработки робототехнического комплекса для прокладки различных подземных коммуникаций без рытья траншей являются актуальными и востребованными. Подобные устройства [3] позволяют осуществить бестраншейную прокладку подземных кабелей и коммуникаций, что не только ускоряет выполнение самого процесса прокладки, но и снижает его стоимость, осуществляет надежное и эффективное функционирование самих информационных и энергосетей, обеспечивая при этом надежную связь и поставку энергии в городах и мегаполисах.

Современный роботизированный подземный проходчик (робот-крот) представляет собой специализированное устройство, разработанное для прокладки кабельных сетей в подземных условиях, управление которым осуществляется с поверхности дистанционно. Благодаря таким устройствам повышается эффективность процесса подземной прокладки кабелей, что, в свою очередь, создает предпосылки для поддержания и расширения инфраструктуры передачи данных, электроэнергетики, связи и других коммуникационных сетей [4].

Подземный робот-крот должен обеспечивать выполнение следующих функций [5].

1. Автономная работа в подземных условиях. Робот проектируется для передвижения в труднопроходимой среде под землей. Это позволяет ему прокладывать кабели в местах, которые физически недоступны для людей или другой техники.

2. Точность и надежность. Современные подземные роботы обеспечивают высокую степень точности при прокладке кабельных сетей, что позволяет избегать повреждения кабелей и минимизировать

необходимость его ремонта или замены в будущем.

3. Увеличение производительности труда при подземной прокладке кабелей. Использование подземного робота-крота позволяет значительно увеличить скорость процесса укладки кабельной инфраструктуры.

4. Адаптивность и гибкость. Подземный робот-крот оснащается сенсорами и системой автоматической навигации, что позволяет адаптироваться к различным условиям окружающей среды и преодолевать препятствия под землей.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

На данный момент подземная прокладка коммуникаций – это не роботизированный процесс [6], что в свою очередь приводит к ряду проблем: неточность проведения кабелей, разрушение верхнего слоя места почвы и высокая трудозатратность. Существующие методы подземного бурения для организации подземных коммуникаций используют крупногабаритные энергоемкие технологические комплексы, которые выполняют функцию землепроходчиков для создания автомобильных и железнодорожных туннелей [7]. Использование подобных комплексов совершенно невозможно при проведении неглубоких

подземных работ (до 1 м), однако применяемые в них конструкторские решения могут быть с успехом воспроизведены на принципах масштабируемости при создании небольших роботов, используемых при подземной прокладке информационных и энергетических кабелей в условиях уплотненной городской застройки. На рис. 1 представлена конструкция мобильного робота, предназначенный для прокладки кабеля под слоем грунта. Робот оснащен управляемой габаритной бурильной головкой с элетромеханическим приводом, перемещения робота осуществляется с помощью гусеничной платформы.

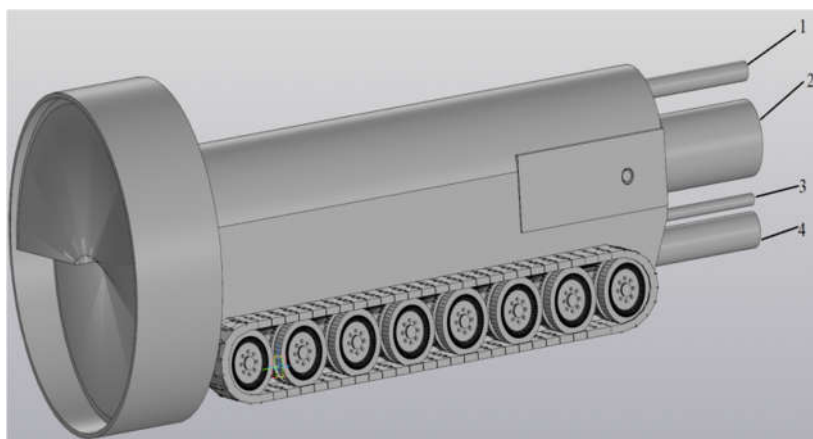


Рис. 1. Подземный робот-крот  
*Fig. 1. Underground mole robot*

К задней части робота подводится кабель питания (1), протягиваемый гофрируемый кабель (2), труба (3) подачи промывочной жидкости (для плотных грунтов) и труба (4) откачки бурового шлама. Процесс подземного перемещения робота

происходит за счет совместного вращения бурильной головки и перемещения гусеничной транспортной платформы.

**Теория.** Исследование режимов движения подземного робота требует разработки математической модели и ее исследова-

дования для определения динамических параметров движения роботизированной системы на основе решения прямой задачи динамики [8] с целью определения задающих моментов электромеханических приводов ведущих катков гусеничной платформы и отработки заданных законов движения всего робота [9].

На рис. 2 представлена расчетная схема транспортной платформы робота-крота.

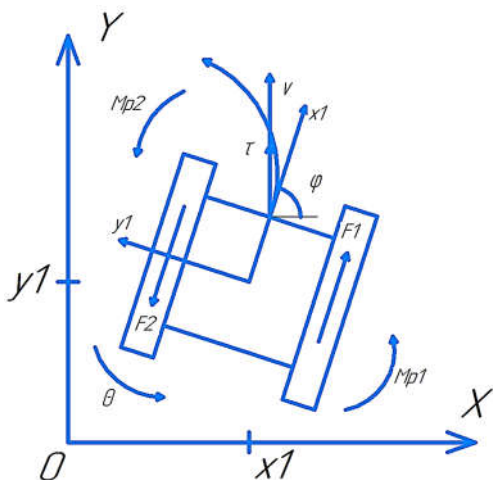


Рис. 2. Расчетная схема транспортной платформы

Fig. 2. Design scheme of the transport platform

На схеме приняты следующие обозначения:  $F_1, F_2$  – движущие силы;  $\tau$  – проекция вектора ускорения платформы на вертикальную ось;  $M_{тр1}, M_{тр2}$  – моменты трения, действующие на гусеницы;  $\varphi$  – угол поворота корпуса платформы;  $x_1, y_1$  –

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \cos(\varphi)(F_1 + F_2) - \mu_g g_x \\ m\ddot{y} = \sin(\varphi)(F_1 + F_2) - \mu_g g_y \\ I_{CZ}\dot{\theta} = (F_1 + F_2)l + Gfsig(\theta) + M_{C1} + M_{C2} - \mu_\Omega \theta \end{cases},$$

где  $G = mg$  – сила тяжести;  $F_1$  и  $F_2$  – силы тяги на отстающей гусенице и забегающей гусенице соответственно;  $m_n$  – масса платформы;  $\mu_J, \mu_\Omega$  – коэффициенты сопротивления движению;  $I_{CZ}$  – момент инерции гусеничной платформы при повороте вокруг центра масс;  $M_{C1}, M_{C2}$  – моменты сопротивления повороту гусениц транспортной платформы.

Силы тяги отстающей  $F_1$  и забегающей  $F_2$  гусениц зависят от величины их

координаты центра масс;  $\theta$  – угол поворота транспортной платформы.

Неподвижная система координат  $(X, Y)$  используется для определения траектории движения гусеничной платформы. За обобщенные координаты приняты  $x, y, \theta$ . При этом можно принять:  $x, y$  – перемещения транспортной платформы в продольном и в поперечном направлениях;  $\vartheta$  – скорость движения гусеничной платформы;  $\dot{x}, \dot{y}$  – проекции вектора скорости движения платформы на оси  $X$  и  $Y$  соответственно;  $\omega_r, \omega_l$  – угловые скорости правой и левой гусениц соответственно;  $R$  – радиус поворота по оси забегающей гусеницы;  $\dot{\theta}$  – угловая скорость поворота платформы (за положительное направление взято поворот по часовой стрелке).

Координаты гусеничной платформы в неподвижной системе, а также угол поворота относительно центра робота координат определяются уравнениями [10]

$$\dot{x} = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_l) \cos(\theta),$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_l) \sin(\theta),$$

$$\dot{\theta} = \frac{R}{L}(\omega_r + \omega_l).$$

Данные уравнения решаются методом численного интегрирования [11] совместно с дифференциальными уравнениями движения центра масс основной системы, которые имеют вид

пробуксовки. Коэффициент холостых потерь задается в виде линейной функции от скорости движения транспортной платформы [12]

$$f_{xв} = f_{xn} + a_{xв} |g|,$$

где  $f_{xn}, a_{xв}$  – коэффициенты холостых потерь в гусеничном движителе.

Силы  $F_c$  и моменты  $M_c$  сил сопротивления зависят от распределения поперечных сил и определяются соотношениями

$$F_C = \mu_c \left[ mg\chi + \frac{3H}{L} F_x (1 - \chi^2) \right] \text{sign}\dot{\theta}$$

$$M_C = \mu_c \left[ \frac{mgL}{4} (1 - \chi^2) + F_x H \chi^3 \right] \text{sign}\dot{\theta} + F_C H (f_c + f_{xв}) \text{sign}\dot{\chi}$$

где  $L$  – длина опорной поверхности гусениц;  $H$  – высота центра тяжести платформы над опорной поверхностью гусениц;  $f_c$  – текущее значение коэффициента сопротивления повороту;  $\chi$  – относительная величина смещения центра поворота в продольном направлении;  $F_x$  – суммарно горизонтальная сила, действующая в продольном направлении.

В случае, когда величина  $\chi$  смещения центра поворота транспортной гусеничной платформы подземного робота превышает половину длины опорной поверхности, величина относительного смещения центра поворота изменяется в следующих пределах:  $-1 \leq \chi \leq 1$ . Коэффициент сопротивления повороту зависит от радиуса поворота и определяется экспериментально [12]

где  $\mu_{\max}$  – максимальное значение коэффициента сопротивления повороту, определяемому характеристикой грунта;  $R_d$  – действительный радиус поворота, рассчитываемый по формуле  $R_d = \frac{\dot{\chi}}{\dot{\theta}}$ .

Бурение грунта роботом-кротом осуществляется путем сочетания поступательного движения транспортной платформы и вращения буровой головки, непосредственно взаимодействующей с грунтом. Производительность представленной робототехнической системы непосредственно определяется конструкцией буровой головки, а также мощностными параметрами, генерируемыми ее электромеханическим приводом. Как следует из [13] для функционирования роботизированной системы для прокладки подземных коммуникаций методом горизонтально-направленного бурения в рыхлых грунтах (плотность 1400...1700 кг/м<sup>3</sup>) необходимо обеспечить крутящий момент 80 Н·м при скорости вращения бура не менее 36 с<sup>-1</sup>. Данный факт предопределяет требования к электромеханическому приводу буровой головки, параметры которого представлены в таблице.

Таблица

Характеристики привода буровой головки

Table

*Characteristics of the drilling head drive*

Параметр	Значение
Номинальное напряжение двигателя	120 В
Номинальная мощность двигателя	150 Вт
Ток холостого хода	23 А
Номинальный ток,	90 А
Передаточное отношение редуктора	27:1
Число ступеней редуктора	2
Максимальный КПД редуктора	80 %
Номинальный момент (макс. КПД),	80 Н·м

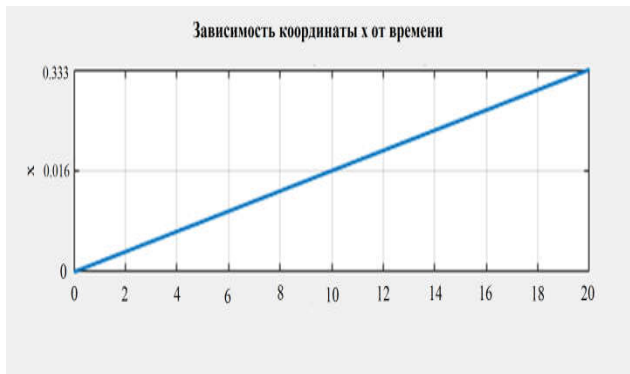
**Результаты моделирования**

Математическая модель движения гусеничной платформы подземного робота, описанная системой уравнений для координат центра масс и дифференциальными уравнениями движения гусеничной платформы на местности, решались в со-

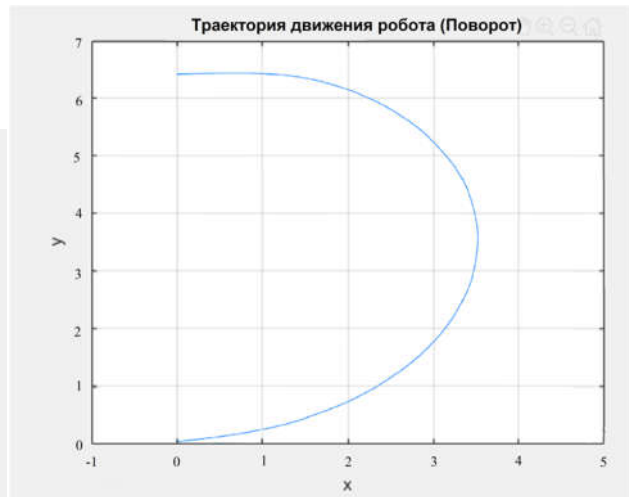
ответствии с нормативным методом расчета динамических процессов. На рис. 3 представлены результаты моделирования движения платформы при движении по прямой, а также при повороте на 180 градусов.

Поворот робота–крота достигается за счет изменение крутящего моментов на ведущих катках гусеничной платформы. При этом в результате деформации грунта, возникают силы и моменты сил сопротивления движению гусениц. При чем последние преодолеваются крутящими моментами электромеханического привода,

которые обеспечивают создание тяговых сил на взаимодействующих с грунтом гусеницах транспортной платформы робота. Изменение величины крутящих моментов на ведущих катках приводит к пропорциональному изменению сил тяги на гусеницах, что влечет за собой изменение скорости всего робота (рис. 4).



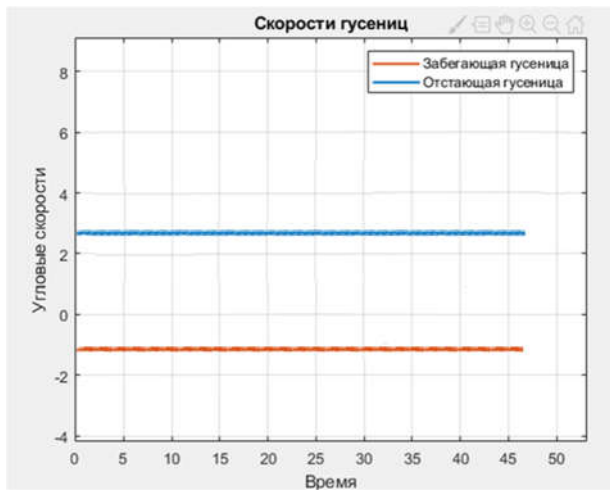
а)



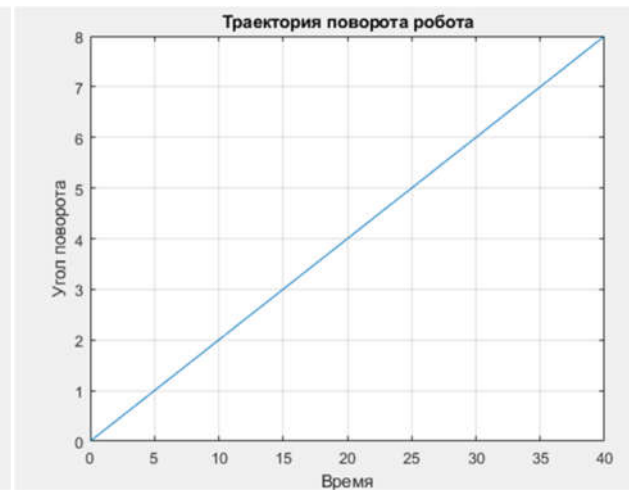
б)

Рис. 3. Результаты моделирования прямолинейного движения – а и поворота корпуса робота – б

Fig.3. Simulation results of rectilinear motion (a) and rotation of the robot body(b)



а)



б)

Рис. 4. Изменение угловых скоростей гусениц – а и угла поворота корпуса робота – б  
Fig.4. Changing the angular velocities of the tracks (a) and the angle of rotation of the robot body (b)

Расхождение в скоростях левой и правой гусениц неизменно влечет за собой уход с прямолинейной траектории движения. В случае действия тяговой силы только на одной гусенице, робот поворачивается с малым радиусом. Поворот с большим радиусом возможен только в результате принудительного уменьшения скорости

одной из гусениц транспортной платформы. При этом отстающая гусеница упирается в грунт, со стороны которого возникает реактивная сила, направленная по касательной против движения корпуса робота.

Оценка прочности конструкции бура может быть проведена с помощью конечно-элементного анализа и статического

моделирования [14]. При этом рассматривается наихудший сценарий нагружения при котором предполагается, что все прилагаемые усилия полностью поглощаются корпусом бура и не вызывают его линей-

ное перемещение. Полученные эпюры возникающих напряжений и деформаций ясно иллюстрируют поведение данной детали под воздействием нагрузок (рис. 5).

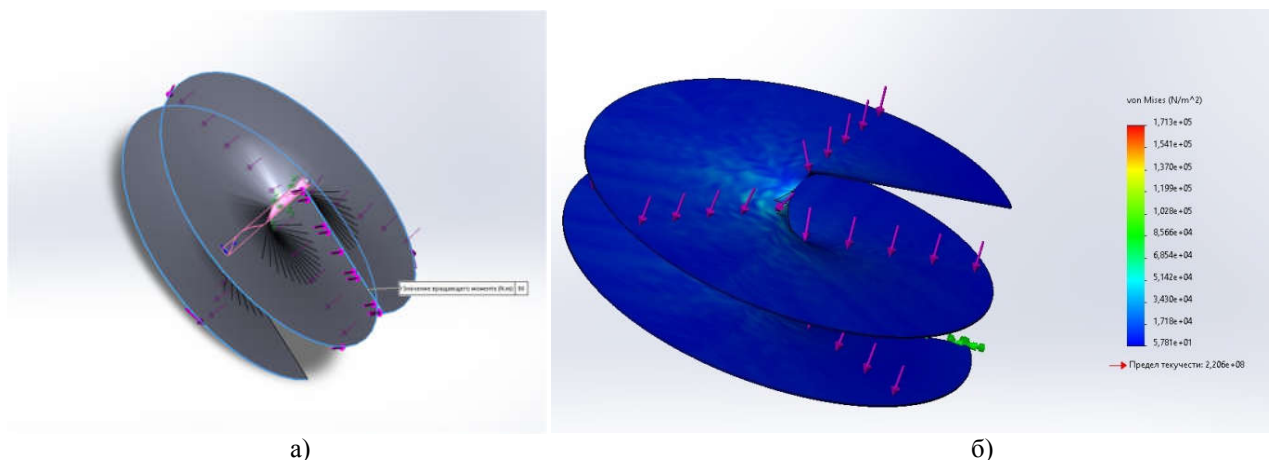


Рис. 5. Схема приложения нагрузочного момента – а и карта напряжений винтового бура – б  
 Fig. 5. Diagram of the application of the load moment (a) and the stress map of the screw drill (b)

Проведенное моделирование подтверждает, что предложенная конструкция бура обладает значительным запасом прочности, что предопределяет надежность и высокую эффективность всего разрабатываемого робота при использовании в предполагаемых условиях эксплуатации.

Разработанная, учитывающая факторы, влияющие на разрабатываемый объект, математическая модель подземного робота для бестраншейной прокладки коммуникаций позволяет описать его поведение и предсказать будущие состояния. Проведенное исследование характера взаимодействия гусеничной транспортной платформы с опорной поверхностью при прямолинейном движении позволяет выявить изменение динамических параметров движения робота-крота предлагаемой конструкции. Возникающие отклонения движения по заданной траектории связаны с неравномерным взаимодействием правой и левой гусениц

транспортной платформы с грунтовой поверхностью, что в свою очередь ведет к изменению мгновенной скорости движения робота. Возникающие отклонения не превышают 2 %. В тоже время проведение исследования взаимодействия гусениц транспортной платформы с опорной поверхностью при повороте робота при бортовых разворотах (вращениях) на месте позволяет сделать вывод о неизбежных потерях энергии (до 40 %) в силу конструктивных особенностей предложенной модели мобильного робота.

Прочностной анализ бурильного винта позволил определить нагрузочную способность основного исполнительного органа робота-крота и подтвердить работоспособность разрабатываемой системы при взаимодействии с грунтом. Система способна перемещаться в рыхлых, предварительно обследованных грунтах плотностью до 1700 кг/м<sup>3</sup> со средней скоростью 60 мм/мин.

## Заключение

Создание роботизированной системы для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций неотъемлемо связано с созданием подходов к разработке системы ее управления, которая может быть

дистанционной, функционировать на основе предварительно заданных маршрутов движения [15] или же быть полностью автономной. При этом следует опираться на специфику выполняемого



технологического процесса, который может потребовать построение предварительного маршрута требуемых перемещений, а затем проверки его выполнения с требуемой точностью. При этом потери времени на разработку маршрутов могут не компенсироваться возросшей производительностью и удобством использования полностью автономной системы. В этом случае становится оптимальным применение дистанционно управляемой робототехнической системы, которой не нужны предварительно заданные маршруты.

Разрабатываемый робот является многомерным объектом управления, регулировка которого осуществляется путем определения силовых и позиционных параметров, которые поддерживаются затем в заданном диапазоне. Разработанная модель и проведенное моделирование позволит провести разработку специализированных программ, которые будут включать в себя как детерминированные, так и самообучающиеся алгоритмы с элементами искусственного интеллекта.

Технологии бестраншейной прокладки подземных коммуникаций все чаще находят свое применение при создании развитой инфраструктуры не только в различных отраслях промышленности, но и в повседневной жизни современного человека. Используемое при этом современное автономное роботизированное оборудование решает различные производственные задачи, конечной целью которых является сокращение себестоимости выполняемых подземных

работ, а также повышение их производительности и безопасности. Уже сегодня можно сделать вывод, что дистанционно управляемая роботизированная техника будет получать все более широкое распространение при выполнении подземных работ, связанных с созданием хорошо защищенных каналов энергопоставки и связи в городах и мегаполисах. Система управления такого оборудования должна обеспечивать контроль и управление всем робототехническим комплексом при выполнении подземных работ. Операторы такого комплекса должны отслеживать и вносить необходимые коррективы в его работу в режиме реального времени. При этом в систему управления таким комплексом также должны быть интегрированы автоматические функции, которые гарантируют безопасность и высокую точность в процессе прокладки подземных коммуникаций.

Предложенная методика математического моделирования мобильного робота-крота позволяет выявить факторы скоростного режима движения его транспортной платформы, которые играют существенную роль при обеспечении стабильности выполняемого технологического процесса. Рассмотренные режимы динамического нагружения основного рабочего органа (бура) позволяют провести учёт силовых факторов величина которых существенно зависит от скорости движения робота и провести оценку внутренних потерь, которые будут существенны с точки зрения получаемых расчётных результатов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харченко И.Я., Пестрякова Е.А., Пискунов А.А., Харченко А.И., Бетербиев А.С.-Э., Сонин А.Н. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена и притоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки [Текст]/ И.Я. Харченко, Е.А. Пестрякова, А.А. Пискунов и др.//Транспортные сооружения. 2019. №3. С. 11-21
2. Куриленко Н.В. Подземная прокладка оптических кабелей [Текст]/ Н.В. Куриленко //Вестник науки, 2020. №8 (29) Т.2. С.160-162.
3. Клешина С.А., Клешин В.Ю. Разработка и проектирование устройства для слежения за местонахождением и передвижением робототехнического комплекса для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций [Текст]/ С. А. Клешина, В. Ю. Клешин. – Сб. науч. конф.: Решетневские чтения. 2015. С.178-180.



4. Макиенко А.В., Садиева А.Э. Подземный проходческий робот [Текст]/ А.В. Макиенко, А.Э. Садиева.- Успехи современного естествознания 2012. №6. С.155-154.
5. Лелиовский К.Я. Моделирование динамики трансмиссии транспортных средств, эксплуатирующихся в ухудшенных дорожных условиях [Текст]/ К.Я. Лелиовский // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3-5 (82). 2023. С. 18-25.
6. Панков А.А., Нечаев Г.И., Мирошников В.В. Захарчук А.С. Будиков Л.Я., Коробейников Д.С., Михайлова И. Г. Разработка и лабораторные испытания автоматизированной системы управления движением транспортно-технологических машин [Текст]/ А.А. Панков, Г.И. Нечаев, В.В. Мирошников и др.// Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 4-1 (83). С. 51-60.
7. Минаев Д., Жуков Д., Сысоев В., Растопшин П. Щелконогов, А.Е. Роботизированная и дистанционно управляемая подземная техника: внедрение, эксплуатация, перспективы [Текст]/ Д. Минаев, Д. Жуков, В. Сысоев и др. // Горная промышленность, 2020. № 6. С. 56-59.
8. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Изучение движения мобильной колесной системы с кинематически связанными двигателями [Текст]/ С.Ф. Яцун, Чжо Пье Вей, А.Н. Рукавицын. - Сб. междунар. научно-практ. конференции: Прогресс транспортных средств и систем. 2018. С. 162.
9. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Перспективы разработки мобильных робототехнических систем с кинематическими связанными двигателями [Текст]/ С.Ф. Яцун, Чжо Пье Вей, А.Н. Рукавицын//Тенденции развития науки и образования. 2018. № 39-3. С. 33-35.
10. Васильев А.В., Полин А.В. Мобильный робот-разведчик на базе шестигусеничного движителя с изменяемой геометрией // Мехатроника, автоматизация, управление, 2009. №3(96). С.24-27.
11. Политов Е.Н., Рукавицын А.Н., Лай Ю. Разработка мобильного колесного робота для доставки посылок [Текст]/ Е.Н. Политов, А.Н. Рукавицын, Лай Ю Хау// Транспортное машиностроение. 2024. № 8 (32). С. 21-30.
12. Сизых В.Н., Баканов М.В. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом [Текст]/ В.Н. Сизых, М.В. Баканов. – Сб. междунар. научно-практ. конференции: Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство, Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС.2018. № 1 С.9-18.
13. Wang, Y., Quan, Q., Yu, H., Li, H., Bai, D., & Deng, Z. Impact dynamics of a percussive system based on rotary-percussive ultrasonic drill [Текст]/ Y Wang, Q Quan, H. Yu and others // Shock and Vibration, vol. 2017, Pp.1-10
14. Рукавицын А.Н., Чжо П. В. Исследование динамики конечностей бионического шагающего робота [Текст]/ А.Н. Рукавицын, Чжо Пье Вей// Транспортное машиностроение. 2023. № 1 (13). С. 14-22.
15. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots [Текст] // Extreme robotics: Proc. of the Intern. sci. and techn. conf., 2019. Pp. 559-567.
16. Новиков А.Н., Новиков И.А., Загородний Н.А., Семькина А.С. Разработка научно-методических подходов для повышения эффективности карьерного транспорта [Текст]/ А.Н. Новиков, И.А. Новиков, Н.А. Загородний и др. // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. №6(76). С. 690-703.

## REFERENCES

1. Kharchenko IYa, Pstryakova EA, Piskunov AA, Kharchenko AI, Beterbiev AS-E, Sonin AN. Features of design, construction and operation of underground tunnels and tunnel structures in dense urban areas. Russian Journal of Transport Engineering. 2019;3:11-21.
2. Kurilenko NV. Underground laying of optical cables. Vestnik Nauki. 2020;8(29(2)):160-162.
3. Kleshnina SA, Kleshnin VYu. Development and design of a device for tracking the location and movement of a robotic complex for trenchless laying of underground pipelines. Proceedings of Scientific Conference, 2015: Reshetnev Readings. 2015.
4. Makiyenko AV, Sadieva AE. Underground tunneling robot. Advances in current natural sciences. 2012;6:155-154.
5. Leliovsky KYa. Simulation of transmission dynamics of vehicles operating in degraded road conditions. World of Transport and Technological Machinery. 2023;3-5(82):2023.
6. Pankov AA, Nechaev GI, Miroshnikov VV, Zakharchuk AS, Budikov LYa, Korobeynikov DS, Mikhailova IG. Development and laboratory testing automated traffic control system transport and technological machines. World of Transport and Technological Machinery. 2023;4-1(83):51-60.
7. Minaev D, Zhukov D, Sysoev V, Rastopshin P, Shchelkonogov AE. Robotic and remotely controlled underground equipment: implementation, operation, prospects. Russian Mining Industry. 2020;6:56-59.
8. Yatsun SF, Zhuo PV, Rukavitsyn AN. Study of the movement of a mobile wheeled system with kinematically coupled movers. Collection of International Scientific and Practical Conferences, 2018: Progress of Vehicles and Systems. 2018.
9. Yatsun SF, Zhuo PV, Rukavitsyn AN. Prospects for the development of mobile robotic systems with kinematic coupled movers. Tendentsii Razvitiya Nauki I Obrazovaniya. 2018;39-3:33-35.

10. Vasilyev AV, Polin AV. Mobile explorer robot based on a six-track propulsion system with variable dimensions. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2009;3(96):24-27.
11. Politov EN, Rukavitsyn AN, Yunhai L. Development of a mobile wheeled robot for parcel delivery. *Transport Engineering*. 2024;8:21-30.
12. Sizykh VN, Bakanov MV. Mathematical model for adaptive control of a three-wheeled mobile robot. Proceedings of International Scientific Practical Conference, 2018: Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. St. Petersburg: SPbF NITS MS; 2018.
13. Wang Y, Quan Q, Yu H, Li H, Bai D, Deng Z. Impact dynamics of a percussive system based on rotary-percussive ultrasonic drill. *Shock and Vibration*. 2017:1-10.
14. Rukavitsyn AN, Wei CP. Study of the dynamics of bionic walking robot limbs. *Transport Engineering*. 2023;1:14-22.
15. Vasiliev AV, Shardyko IV. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 2019: Extreme robotics. 2019.
16. Novikov AN, Novikov IA, Zagorodny NA, Semkina AS. Development of scientific and methodological approaches to improve the efficiency of quarry transport operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(6(76)):690-703.

### Информация об авторах:

**Рукавицын Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ, тел. 8(951)316 97 93, Scopus-Author ID 56910069200, Research-ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-РИНЦ 423663.

**Политов Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики,

**Rukavitsyn Aleksandr Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics at the Southwest State University; phone: 8(951)316 97 93, Scopus-Author ID 56910069200, Research-ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-RSCI 423663.

**Politov Evgeny Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of

мехатроники и робототехники ЮЗГУ, тел. 8(960)685 75 79, Scopus-Author ID 57194635674, Research-ID-Web of Science L-176177, Author-ID-РИНЦ 176177.

**Климова Анастасия Романовна** – студент естественнонаучного факультета ЮЗГУ, тел. 8 (951)316 97 93.

Mechanics, Mechatronics and Robotics at the Southwest State University; phone: 8(960)685 75 79, Scopus-Author ID 57194635674, Research-ID-Web of Science L-176177, Author-ID-RSCI 176177.

**Klimova Anastasia Romanovna** – Student of the Faculty of Natural Sciences at the Southwest State University; phone: 8(951)316 97 93.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 10.10.2024; принята к публикации 28.10.2024. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 09.10.2024; approved after review on 10.10.2024; accepted for publication on 28.10.2024. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.**