

УДК 621.865.8:665.6

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-60-76

EDN: GYSEDS

Проектирование мобильного робототехнического комплекса по обслуживанию нефтехранилищ

М. А. Шереужев^{✉1,2}, А. Е. Ушаков¹, И. В. Семянников¹

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1

Аннотация. В нефтяной промышленности стальные вертикальные резервуары со временем загрязняются осадками и отложениями, что приводит к коррозии стенок, потерям полезного объема и аварийным рискам при эксплуатации. Для очистки применяются ручной, химический, механический, гидродинамический и роботизированный методы, однако нероботизированные способы опасны для обслуживающего персонала, требуют значительных материальных и временных ресурсов и могут привести к механическому повреждению стенок резервуара. Существующие роботизированные комплексы для очистки нефтехранилищ обеспечивают безопасную очистку без присутствия персонала внутри резервуара, но требуют постоянного контроля и управления со стороны оператора. Разработка мобильного автономного робототехнического комплекса позволит повысить эффективность процесса очистки, сократить время простоя технологического оборудования, снизить эксплуатационные затраты и минимизировать влияние человеческого фактора в технологическом процессе очистки нефтехранилищ.

Цель данной работы – спроектировать и осуществить компьютерное моделирование мобильного робототехнического комплекса, предназначенного для автоматизированной очистки нефтехранилищ. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: проведено формирование кинематической и динамической моделей мобильного робототехнического комплекса с гусеничным шасси и двухзвенным манипулятором, осуществлено моделирование движения шасси с дифференциальным приводом и манипулятора в среде моделирования *Simulink*, проведена оценка точности позиционирования разработанной системы.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при движении по типовой траектории в виде квадрата с длиной ребра 1 метр конечная ошибка позиционирования составила не более 0,102 метра. Накопление ошибки обусловлено отсутствием замкнутого контура управления по положению в текущей версии системы. Достигнутая точность является удовлетворительной для выполнения технологических задач очистки нефтехранилищ и подтверждает перспективность применения автономных роботизированных систем в данной области промышленности.

Заключение. Изготовленный макетный образец подтверждает практическую реализуемость предложенных технических решений и возможность их внедрения в промышленную эксплуатацию на предприятиях нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: роботизированная очистка, нефтехранилище, мобильный робот, гусеничная платформа, система управления, математическое моделирование

Поступила 15.10.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 25.11.2025

Для цитирования. Шереузов М. А., Ушаков А. Е., Семянников И. В. Проектирование мобильного робототехнического комплекса по обслуживанию нефтехранилищ // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 6. С. 60–76. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-60-76

MSC: 68T40

Original article

Design of a mobile robotic system for servicing oil storage facilities

M.A. Shereuzhev^{✉1,2}, A.E. Ushakov¹, I.V. Semyannikov¹

¹Moscow State University of Technology “STANKIN”

1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia

²Bauman Moscow State Technical University

5, buld. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia

Abstract. In the oil industry, steel vertical tanks gradually become contaminated with sediments and deposits over time, leading to wall corrosion, loss of useful volume, and operational safety hazards. Various cleaning methods are employed, including manual, chemical, mechanical, hydrodynamic, and robotic approaches. However, non-robotic methods pose risks to maintenance personnel, require significant material and time resources, and may result in mechanical damage to tank walls. Existing robotic systems for oil tank cleaning ensure safe cleaning without personnel presence inside the tank but require constant monitoring and control by an operator. The development of a mobile autonomous robotic system will improve cleaning process efficiency, reduce technological equipment downtime, decrease operational costs, and minimize the human factor in the oil tank cleaning process.

Aim. This study is to design and perform computer simulation of a mobile robotic system intended for automated oil tank cleaning. To achieve this goal, the following tasks are completed: development of kinematic and dynamic models of the mobile robotic system with tracked chassis and two-link manipulator, simulation of chassis motion with differential drive and manipulator in the *Simulink* simulation environment, and evaluation of the developed system's positioning accuracy.

Computer simulation results showed that when moving along a typical square trajectory with a side length of 1 meter, the final positioning error was no more than 0.102 meters. Error accumulation is due to the absence of a closed-loop position control system in the current version. The achieved accuracy is satisfactory for performing technological tasks of oil tank cleaning and confirms the prospects of applying autonomous robotic systems in this industry sector.

Conclusions. The manufactured prototype confirms the practical feasibility of the proposed technical solutions and the possibility of their implementation in industrial operation at oil and gas industry enterprises.

Keywords: robotic cleaning, oil storage tank, mobile robot, tracked platform, control system, mathematical modeling

Submitted 15.10.2025,

approved after reviewing 17.11.2025,

accepted for publication 25.11.2025

For citation. Shereuzhev M.A., Ushakov A.E., Semyannikov I.V. Design of a mobile robotic system for servicing oil storage facilities. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 6. Pp. 60–76. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-60-76

ВВЕДЕНИЕ

В современной нефтяной промышленности хранение нефти и нефтепродуктов осуществляется в стальных вертикальных резервуарах (РВС) [1, 2], которые со временем загрязняются осадками и отложениями. Это приводит к коррозии, снижению объема хранения, количественным потерям, ухудшению качества продукта и рискам аварий [3–5]. Для

очистки нефтехранилищ применяются ручной, химический, механический, гидродинамический и роботизированный методы [6–9].

Нероботизированные способы очистки обладают значительными недостатками [10–13]. Ручная очистка опасна для персонала и требует много времени на выполнение. Химическая очистка эффективна, но требует дорогих реагентов и вызывает проблемы с утилизацией. Механическая очистка сокращает время работ, но применение такого способа очистки может привести к повреждению резервуара. Гидродинамический метод отличается безопасностью и быстротой очистки, но требует значительных затрат воды и оставляет значительный объем отходов.

Основным преимуществом роботизированного подхода к очистке нефтехранилищ является отсутствие необходимости пребывания персонала в резервуаре во время проведения очистки [14]. Существующие роботизированные комплексы, такие как MARTin, Lunar Rover и KOKS ESOT, обеспечивают безопасную и эффективную очистку без необходимости пребывания персонала внутри хранилища при непосредственном осуществлении очистки [15]. Представленное в табл. 1 сравнение вышеперечисленных робототехнических комплексов (РТК) показывает, что основным недостатком данных решений является необходимость участия оператора для осуществления управления роботом.

Таблица 1. Сравнительный анализ существующих РТК для очистки нефтехранилищ

Table 1. Comparative analysis of existing RTCs for cleaning oil storage facilities

	MARTin	Lunar Rover	KOKS ESOT
Тип привода	Гусеничный	Колесный, 6x6	Гусеничный
Давление выпускаемой струи, бар	20	100	70–100
Температура рабочей жидкости, °С	до 85	от 60	до 80
Необходимость сборки внутри резервуара	нет	да	нет
Тип управления	Дистанционное	Дистанционное	Дистанционное

Проектирование нового мобильного РТК позволит повысить эффективность очистки и минимизировать риски для персонала и окружающей среды.

Задачи, решаемые в представленной работе:

- описание конструкции и функционала модели мобильного РТК;
- формирование кинематической модели мобильного РТК;
- разработка динамической модели мобильного РТК;
- осуществление моделирования движения шасси и манипулятора мобильного РТК и оценка результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструкция мобильного РТК

Конструкция мобильного робототехнического комплекса (рис. 1), предназначенного для выполнения операции очистки резервуара для хранения нефтепродуктов, состоит из следующих элементов:

1. Шасси.
2. Двухосевой манипулятор.
3. Сенсоры системы технического зрения.
4. Блок управления.

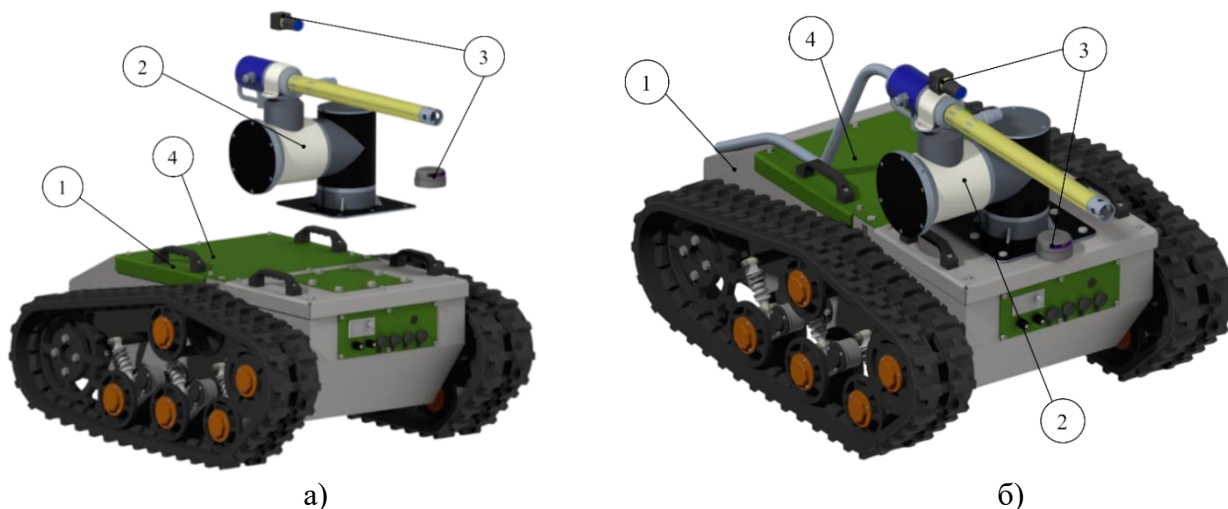


Рис. 1. Эскиз конструкции мобильного робота. Распределенный вид (а) и вид в сборе (б)
Fig. 1. Sketch of the mobile robot design: distributed view (a) and assembled view (b).

В табл. 2 приведены основные параметры проектируемого РТК, сформированные на основе САПР-модели робота.

Таблица 2. Основные параметры конструкции мобильного РТК
Table 2. Main design parameters of the mobile RTK

Параметр	Значение
Длина x Ширина x Высота, мм	1020 x 816 x 780
Масса, кг	120
Тип движителя	Гусеничный
Расстояние между гусеницами, мм	650
Радиус ведущих колес, мм	122
Датчики системы технического зрения	IMU, LiDAR, RGB камера

Кинематическая модель мобильного РТК

На рис. 2 представлена кинематическая схема двухзвенного манипулятора, предназначенного для позиционирования рабочего инструмента.

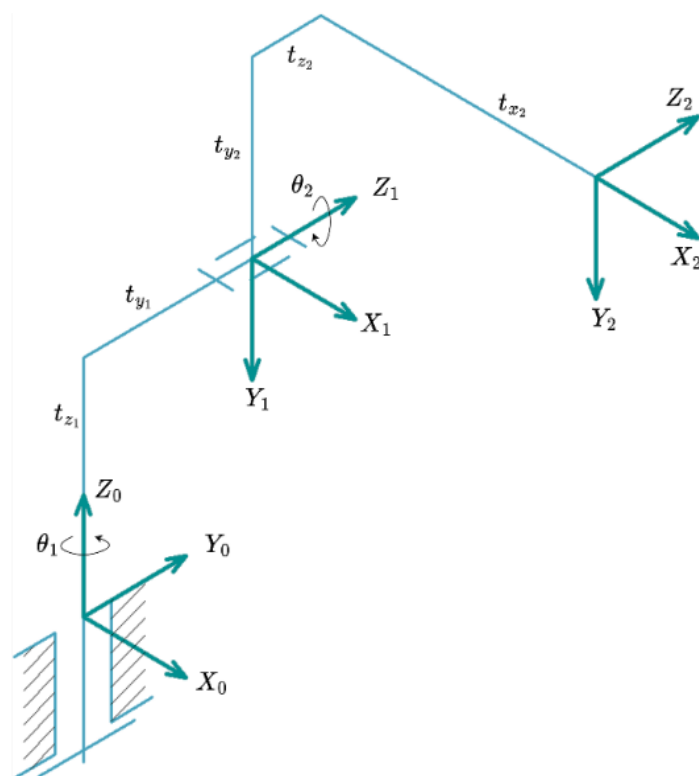


Рис. 2. Кинематическая схема двухзвенного манипулятора

Fig. 2. Kinematic diagram for a two-link manipulator

Как видно из кинематической схемы, двухзвенный манипулятор обладает двумя степенями подвижности.

Кинематическая схема шасси может быть представлена в виде схемы дифференциального привода (рис. 3).

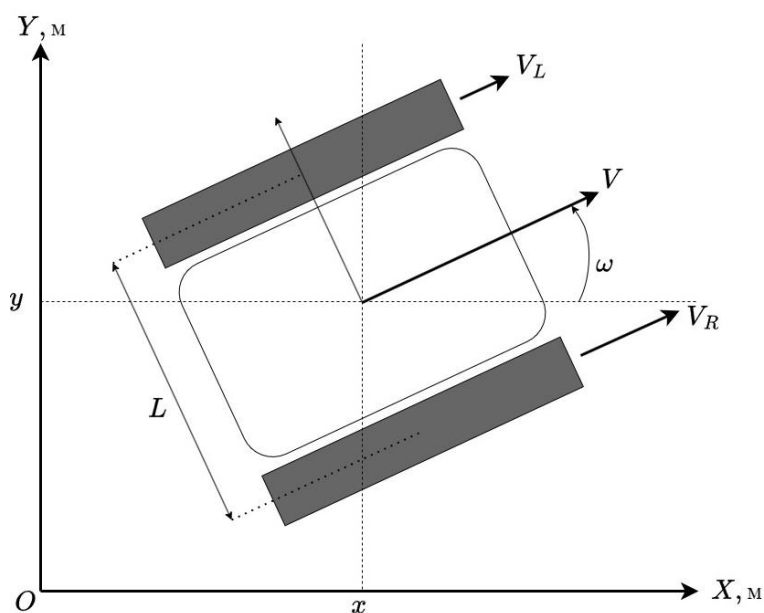


Рис. 3. Кинематическая схема шасси

Fig. 3. Chassis kinematic diagram

Линейные скорости движения правой и левой гусениц вычисляются по следующей формуле [16]:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix},$$

где ω_R – угловая скорость вращения ведущего колеса правой гусеницы, рад/с;

ω_L – угловая скорость вращения ведущего колеса левой гусеницы, рад/с;

V_R – линейная скорость правой гусеницы, м/с;

V_L – линейная скорость левой гусеницы, м/с;

R – радиус ведущих колес гусеницы, $R = 0,122$ м.

Вектор прямолинейной и угловой скоростей движения мобильного РТК определяется по формуле:

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix},$$

где V – линейная скорость движения мобильной платформы, м/с;

ω – угловая скорость движения мобильной платформы, рад/с;

L – расстояние между гусеницами платформы, $L = 0,65$ м.

Решая обратную задачу, получим вектор требуемых скоростей правой и левой гусениц:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L/2 \\ 1 & -L/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}.$$

Вектор приращения координат (скоростей) мобильного РТК в глобальной системе координат вычисляется по формуле:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix},$$

где \dot{x} – приращение координаты робота по оси X, м/с;

\dot{y} – приращение координаты робота по оси Y, м/с;

$\dot{\theta}$ – приращение угловой координаты робота, рад/с.

Динамическая модель мобильного РТК

Сила, F_i , развиваемая на гусенице с учетом сопротивления движению, определяется по формуле:

$$F_i = \frac{M_i}{R} - bV_i,$$

где M_i – выходной момент редуктора двигателя, Н \times м;

b – коэффициент вязкого трения, $b = 30$ Н \times с/м;

V_i – скорость движения гусеницы, м/с.

Уравнение равновесия поступательного движения:

$$m\dot{V} = F_L + F_R - \mu mg,$$

где m – масса робота, $m = 120$ кг;

\dot{V} – приращение линейной скорости движения, м/с;

F_R – сила, развиваемая двигателем на правой гусенице, Н;

F_L – сила, развиваемая двигателем на левой гусенице, Н;

μ – коэффициент трения, $\mu = 0,5$;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Уравнение равновесия вращательного движения РТК:

$$I\dot{\omega} = \frac{L}{2}(F_R - F_L) - M_C,$$

где I – момент инерции шасси, $I = 21$ кг × м²;

$\dot{\omega}$ – приращение угловой скорости движения шасси, рад/с².

Вектор приращений линейной и угловой скоростей движения РТК:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{L}{2I} & -\frac{L}{2I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_R \\ F_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_C \\ M_C \end{bmatrix}.$$

Система управления мобильным РТК

Структурная схема системы управления представлена на рис. 4. На самом верхнем уровне система управления подразделяется на два блока: интерфейс оператора и робототехнический комплекс. Интерфейс оператора предназначен для предоставления информации от платформы непосредственно оператору.

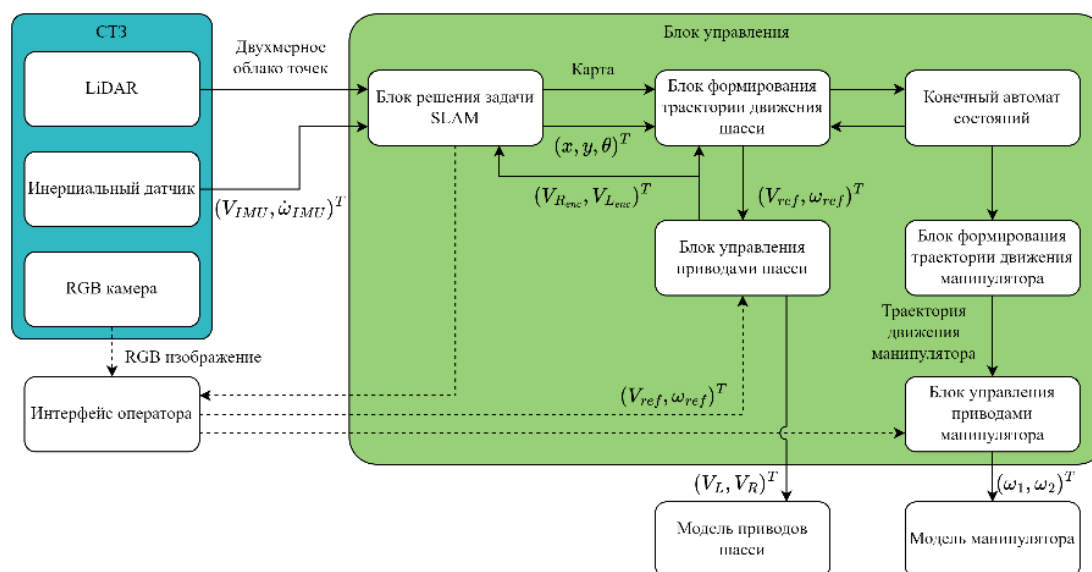


Рис. 4. Структурная блок-схема системы управления

Fig. 4. Structural block diagram of the control system

Если управление комплексом осуществляется оператором в дистанционном режиме, то интерфейс, помимо всего прочего, позволяет оператору осуществлять воздействие на робота. При работе в дистанционном режиме управление комплексом осуществляется исключительно оператором.

Автономный режим подразумевает полностью автономную работу роботизированной платформы. Основываясь на информации, полученной от информационно-измерительной системы, и на показаниях инерциальных датчиков, решается задача построения карты в неизвестном пространстве (SLAM). Учитывая площадь зоны поверхности стенки резервуара, определяются позиции, из которых будет осуществляться очистка, и траектория, по которой робот будет перемещаться между этими позициями. Далее осуществляются низкоуровневое воздействие на двигатели шасси, позиционирование двухосевого манипулятора и управление исполнительным механизмом.

Система технического зрения на основе LiDAR-сканирования обеспечивает коллаборативное взаимодействие с персоналом за счет возможности снижения скорости при детекции человека на безопасном расстоянии [17]. Также предусмотрена экстренная остановка при критическом сближении человека и мобильного РТК.

В автономном режиме работы оператор получает возможность прямого воздействия на систему управления исполнительными механизмами очищающей системы и на блок управления движением гусеничной платформы.

Модель в Matlab Simulink

Модель гусеничной платформы, составленная в соответствии с математическим описанием, представлена на рис. 5. Модель содержит замкнутые контуры управления скоростями гусениц, где сигналы обратной связи формируются на основе показаний энкодеров, измеряющих угловые скорости ведущих колес.

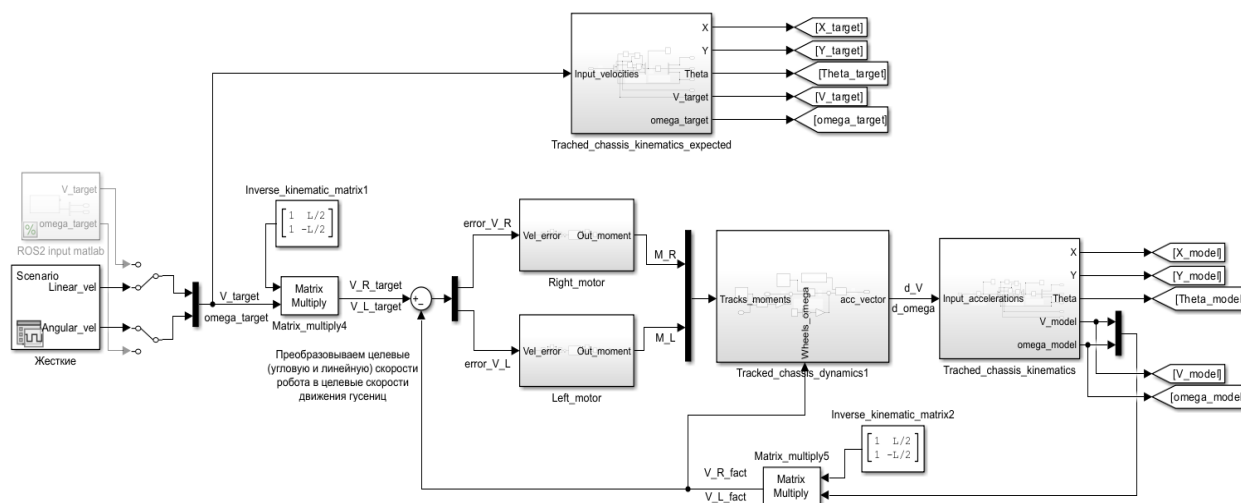


Рис. 5. Модель гусеничной платформы в Matlab Simulink

Fig. 5. Model of a tracked platform in Matlab Simulink

На рис. 6 представлена динамическая модель гусеничной платформы, реализованная в пакете Simulink. В данной модели учитываются силы, моменты и инерционные характеристики робота. Входным сигналом является вектор моментов, развиваемых двигателями, а выходным – вектор линейного и углового ускорения движения шасси.

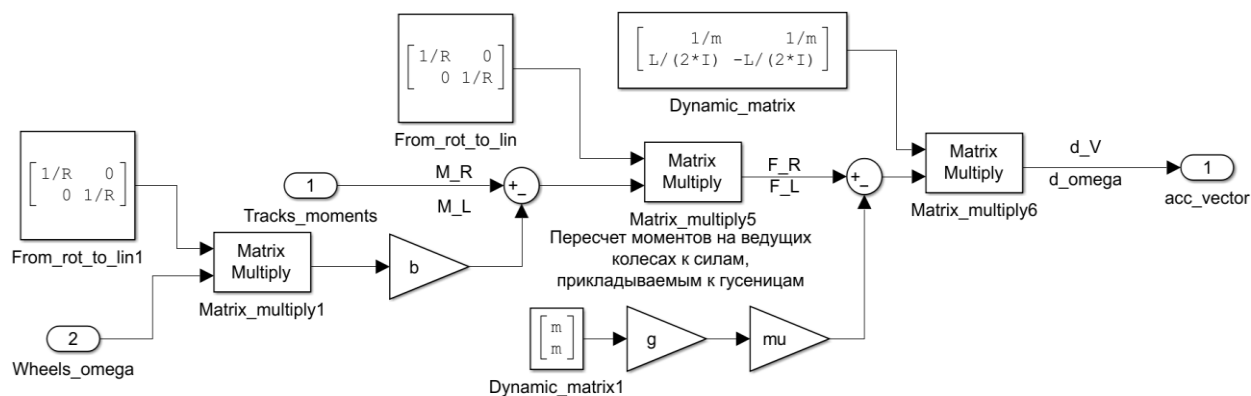


Рис. 6. Блок динамической модели гусеничной платформы

Fig. 6. Block of the dynamic model of the tracked platform

Рис. 7 демонстрирует кинематическую модель платформы, описывающую ее движение на основе скоростей и ускорений ведущих гусениц. В отличие от динамической модели здесь не учитываются силы и моменты, а анализируется лишь геометрическое поведение робота.

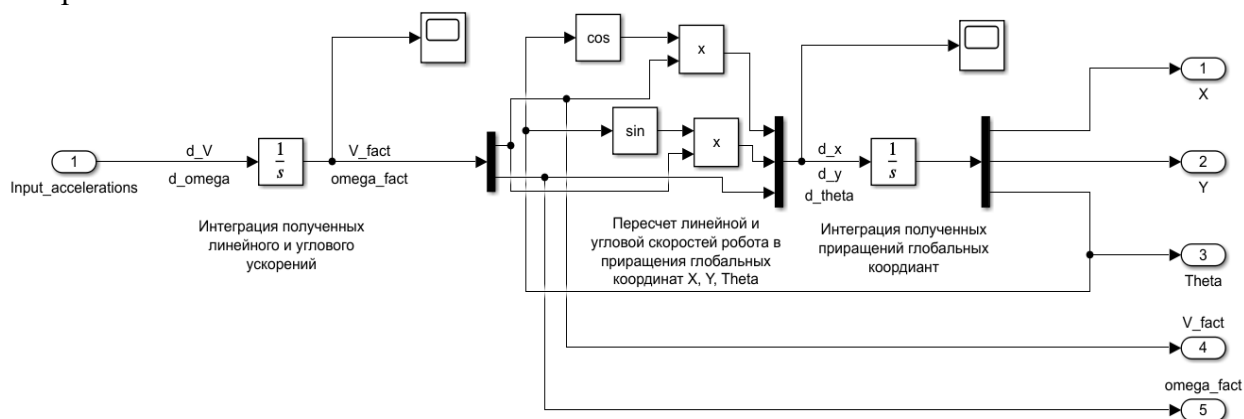


Рис. 7. Блок кинематической модели гусеничной платформы

Fig. 7. Block of the kinematic model of the tracked platform

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8–11 продемонстрированы результаты моделирования при управляющем сигнале, при котором шасси мобильного РТК движется по типовой траектории в виде квадрата (4 прямолинейных отрезка и 4 поворота) с длиной ребра 1 метр.

На рис. 8 проиллюстрирован график координат X и Y центра масс шасси при осуществлении моделирования движения по типовой траектории (на оси абсцисс приведены координаты X, на оси ординат – координаты Y).

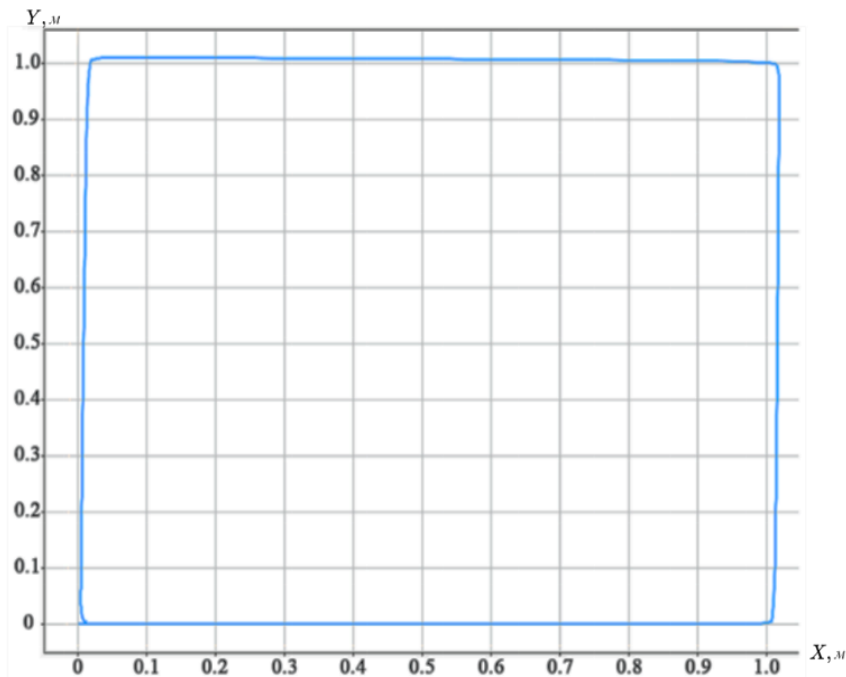


Рис. 8. График координат X и Y центра масс модели робота при движении по типовой траектории

Fig. 8. Graph of X and Y coordinates of the center of mass of the robot model when moving along a typical trajectory

На рис. 9 (а) представлены зависимости целевой и смоделированной координаты X центра масс шасси от времени. На рис. 9 (б) проиллюстрирован график зависимости ошибки по положению по координате X от времени. На рис. 10 (а, б) аналогично продемонстрированы зависимости координаты Y центра масс шасси и ошибки положения по координате Y от времени.

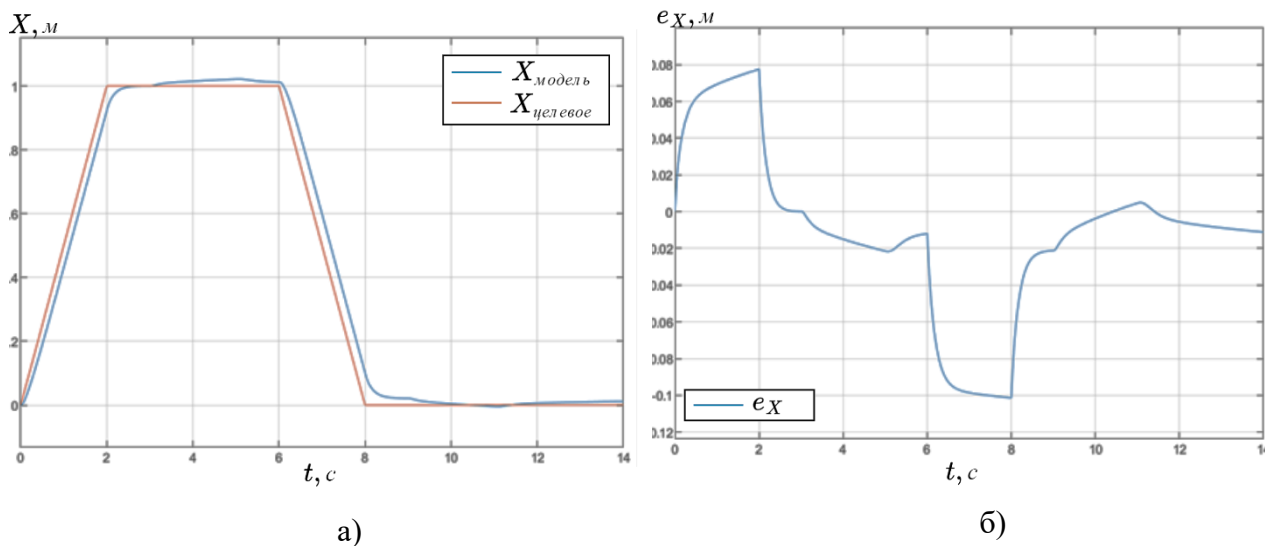


Рис. 9. График зависимости координаты X (а) робота и ее ошибки (б) от времени
Fig. 9. Graph of the dependence of the X coordinate (a) of the robot and its error (b) on time

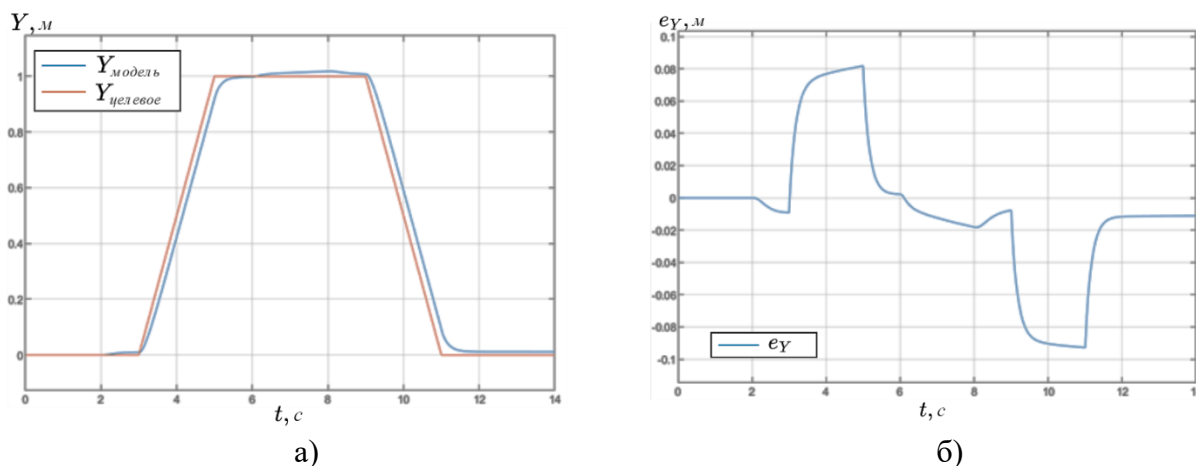


Рис. 10. График зависимости координаты Y (а) и ее ошибки (б) от времени
Fig. 10. Graph of the dependence of the Y coordinate (а) and its error (б) on time

На рис. 11 (а) представлены зависимости целевой и смоделированной ориентации шасси от времени. На рис. 11 (б) проиллюстрирован график зависимости ошибки ориентации мобильной платформы от времени.

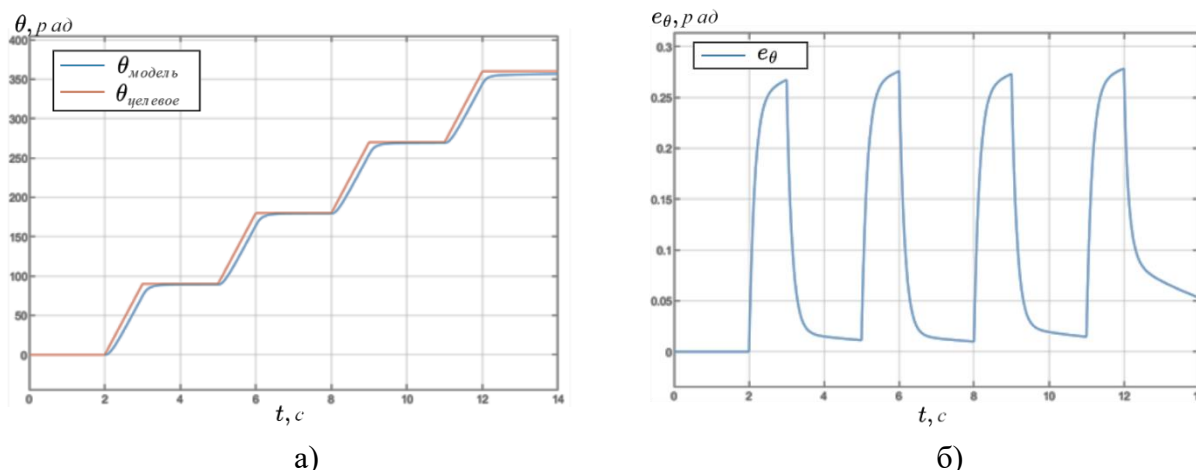


Рис. 11. График зависимости координаты угла поворота (а) и ее ошибки (б) от времени
Fig. 11. Graph of the dependence of the rotation angle coordinate (а) and its error (б) on time

На рис. 12 продемонстрирована модель манипулятора, выполненная в пакете *Simulink*. Модель включает в себя 2 вращательных сустава и учитывает смещение систем координат звеньев друг относительно друга.

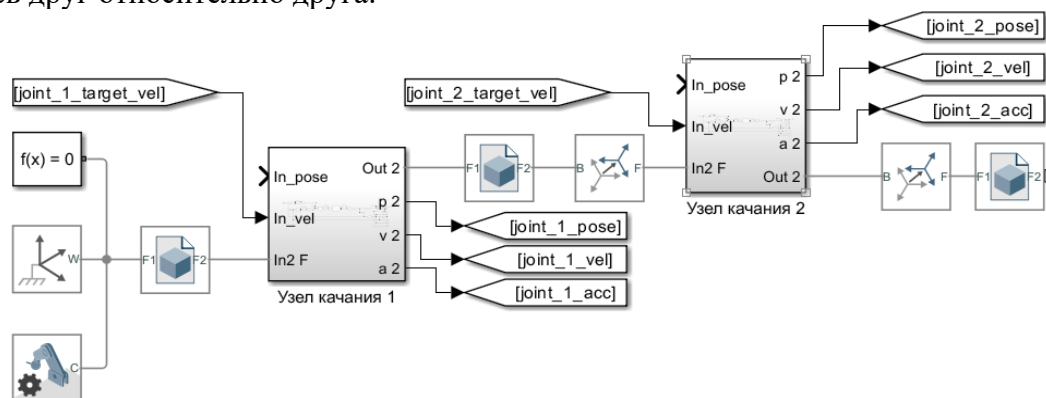


Рис. 12. Модель манипулятора в *Simulink* / **Fig. 12.** Manipulator model in *Simulink*

На рис. 13 и 14 продемонстрированы результаты моделирования движения манипулятора. На рис. 13 отображены начальное и конечное состояния манипулятора при подаче ступенчатых управляющих сигналов.

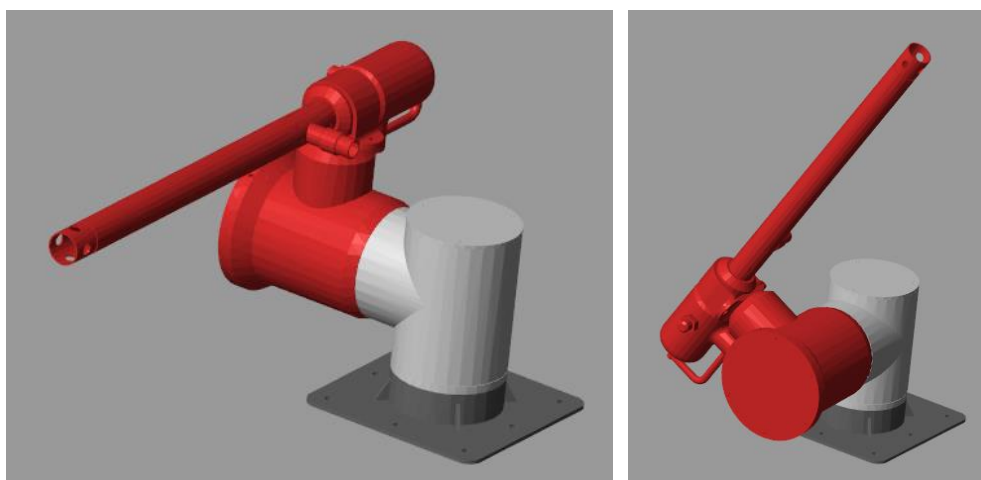


Рис. 13. Визуальная модель манипулятора до и после моделирования

Fig. 13. Visual model of the manipulator before and after simulation

Ниже приведены графики зависимости положения (рис. 14, а) и скорости суставов манипулятора от времени при отработке фланцем инструмента типовой траектории очистки сектора резервуара (рис. 14, б).

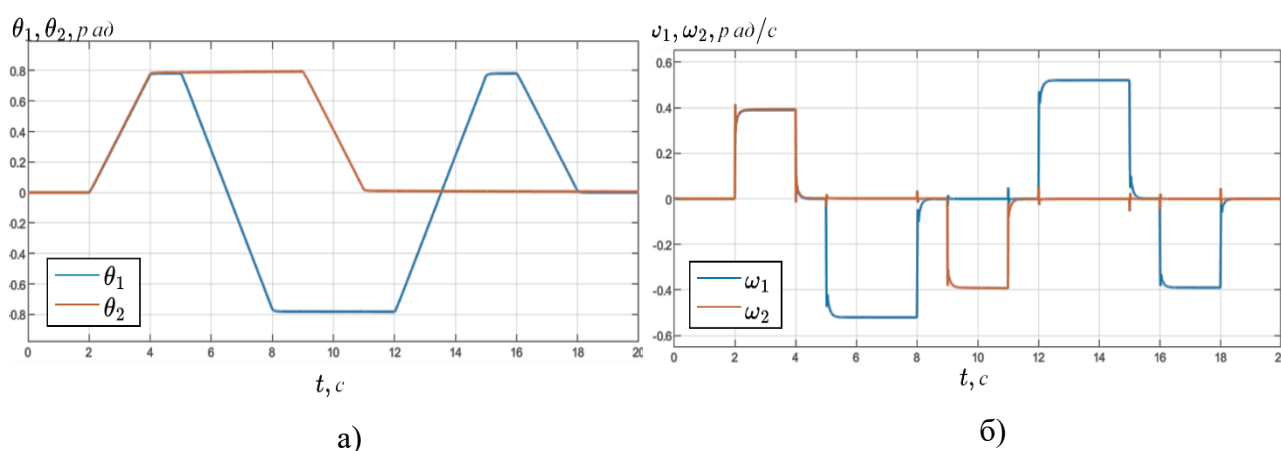


Рис. 14. Результат моделирования манипулятора

Fig. 14. Result of manipulator simulation

Макетный образец

На рис. 15 представлен макетный образец проектируемого мобильного РТК. Данный образец предназначен для отработки движения шасси по труднопроходимому грунту и поверхностям.

Наличие у макетного образца лазерного дальнометрического датчика позволяет формировать двумерное облако точек окружающего пространства в плоскости сканирования сенсора. Это, в свою очередь, позволяет решать задачи картографирования, локализации и навигации мобильного РТК в режиме реального времени.

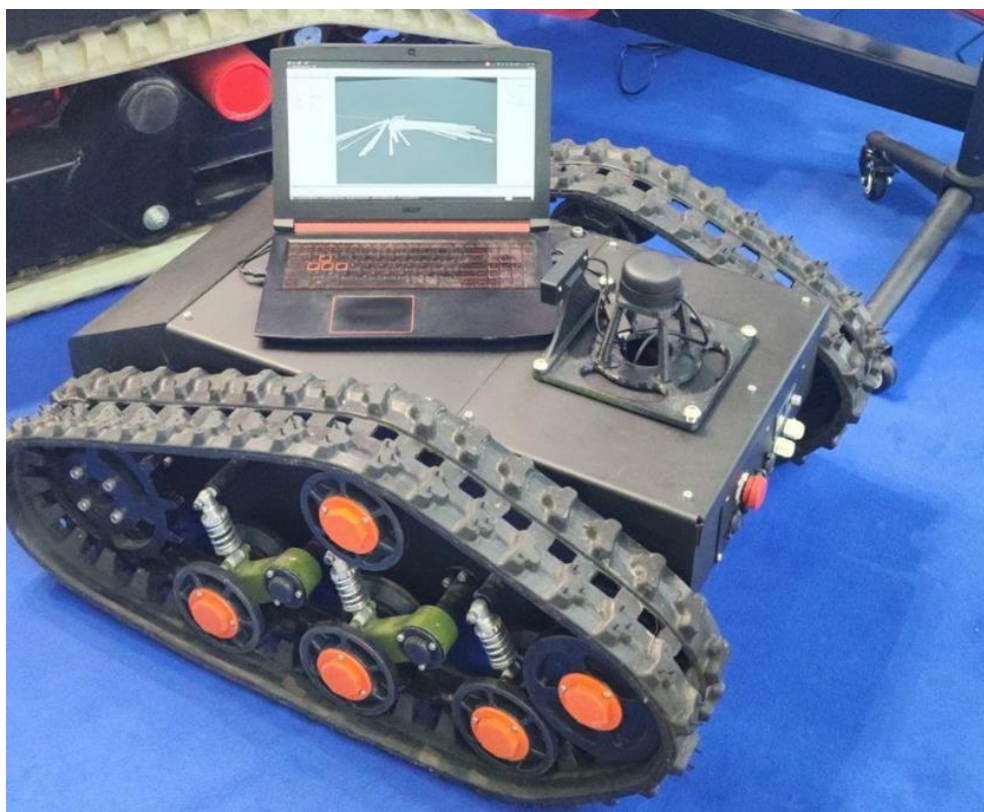
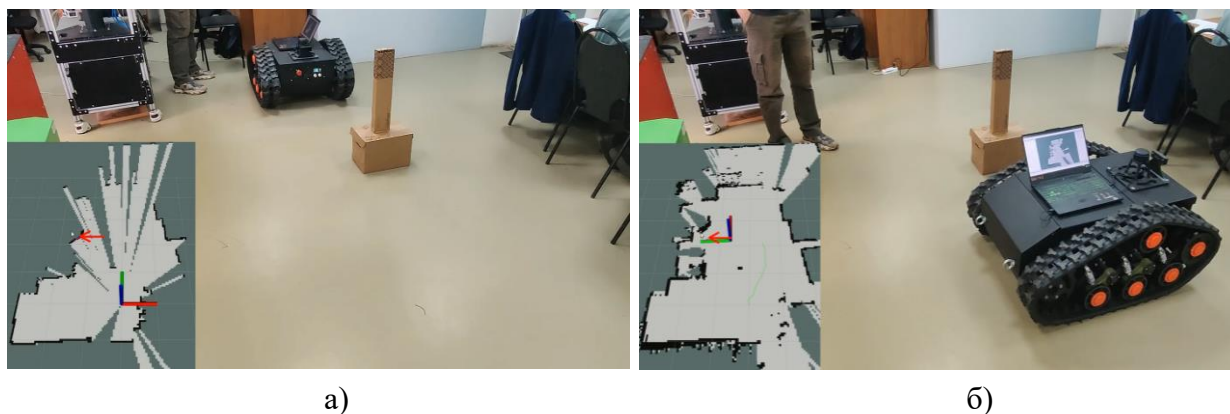


Рис. 15. Макетный образец / Fig. 15. Mock-up sample

Для проверки работоспособности систем навигации и картографирования были проведены испытания макетного образца проектируемого РТК. На рис. 16 (а, б) показаны результаты автономного перемещения робота: исходная позиция (рис. 16 (а)) и конечная позиция после выполнения перемещения с обновленной картой окружающего пространства (рис. 16 (б)).



*Рис. 16. Макетный образец в начальной позиции (а) и после автономного перемещения (б)
Fig. 16. The prototype in the initial position (a) and after autonomous movement (b)*

ВЫВОДЫ

В современной нефтяной промышленности хранение нефти и нефтепродуктов осуществляется в стальных вертикальных резервуарах, которые со временем загрязняются осадками и отложениями. В связи с этим особую актуальность приобретают роботизированные технологии, позволяющие автоматизировать процесс очистки и минимизировать участие человека.

В данной статье проведено исследование и моделирование мобильного гусеничного робота для очистки нефтехранилищ. Были рассмотрены основные методы очистки резервуаров, выявлены недостатки традиционных подходов и обоснована необходимость применения роботизированных систем для повышения эффективности и безопасности осуществления очистки нефтехранилищ. В рамках работы описана кинематическая и динамическая модели мобильного РТК, разработаны конструкция робота и система управления.

Результаты моделирования, представленные в табл. 3, показали, что при подаче мобильному РТК управляющих сигналов, в соответствии с которыми он должен проехать типовую траекторию в форме квадрата с длиной ребра 1 метр и вернуться в исходное положение, конечная ошибка положения робота составила не более 0,102 метра. Накопление ошибки позиционирования обусловлено отсутствием замкнутого контура управления по положению и компенсации погрешностей. С точки зрения выполнения технологического процесса достигнутая точность позиционирования шасси мобильного РТК является удовлетворительной для осуществления технологического воздействия. Результаты исследования подтверждают перспективность использования роботизированных систем для автономной очистки нефтехранилищ. Разработка такого комплекса позволяет повысить безопасность персонала, уменьшить временные и материальные затраты, а также минимизировать экологические риски, связанные с процессом очистки.

Таблица 3. Оценка результатов моделирования

Table 3. Evaluation of simulation results

Время t , с	Положение x , м	Положение y , м	Ориентация θ , рад	Ошибка по положению $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$, м	Ошибка $\Delta\theta$, рад
2	0,923	0	0	0,077	0
3	1,0	0,01	1,3	0,01	0,27
5	1,02	0,92	1,55	0,082	0,02
6	1,01	1,00	2,866	0,01	0,275
8	0,1	1,018	3,121	0,102	0,02
9	0,02	1,008	4,442	0,021	0,27
11	0,007	0,09	4,692	0,09	0,02
12	0,005	0,09	6,008	0,09	0,275

Изготовленный макетный образец подтверждает практическую реализуемость предложенных технических решений и позволяет проводить экспериментальную отработку алгоритмов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные испытания системы автономной навигации показали, что робот способен строить карту окружающего пространства, обнаруживать препятствия и выполнять автономное перемещение, что подтверждает применимость разработанного РТК для работы в условиях нефтехранилищ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щипкова Ю. В. Оптимизация процесса очистки РВС при эксплуатации // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 677–679. EDN: ZQLQKV
2. Крымская Р. С., Трусов В. И. Консервационный состав для оборудования хранения и переработки нефти // Естественные и технические науки. 2012. № 1. С. 229–233. EDN: OWMDEJ

3. Гулиев А. Г. Исследование потери углеводородов в системах хранения нефти и нефтепродуктов // *Мировая наука*. 2021. № 3. С. 37–42. EDN: IEJUPV
4. Ахтямов Р. Г. Обеспечение безопасности при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов: учебное пособие. Санкт-Петербург: ПГУПС, 2019. 50 с.
5. Велин А. С. Геологические особенности загрязнения грунтов и подземных вод в районе нефтехранилища «Красное Знамя» // *Вестник Воронежского государственного университета*. 2017. № 2. С. 158–162. EDN: WHEGJM
6. Расулов Р. С., Исаев А. Я. Пожаробезопасный способ очистки нефтяных резервуаров // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. 2010. № 4. С. 29–33. EDN: MVTCPР
7. Михель Е. С., Скуртова И. В. Анализ пожарной опасности процесса хранения нефтепродуктов // *Научный Лидер*. 2022. № 20. С. 83–85. EDN: LYQDFW
8. Макаров И. С., Колесников Н. П. Технологии и технические средства очистки резервуаров от нефтяных отложений // *Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции*. Воронеж: ВГАУ имени императора Петра 1, 2017. С. 69–72. EDN: YIQMLX
9. Джалалова К. Р., Мазур Е. В. Проблемы оптимизации процессов очистки вертикальных стальных резервуаров нефтебазы // *Вестник экономики и менеджмента*. 2021. № 4. С. 17–22. EDN: OSRICR
10. Тесленко Е. С. Проблемы ручного метода очистки нефтяных резервуаров // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых*. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 386–388. EDN: STAVDN
11. Маркеев В. А., Назаров В. П., Рожков А. В. Исследование эффективности струйной очистки поверхностей нефтяных резервуаров от загрязнений // *Вестник академии государственной противопожарной службы МЧС России*. 2005. № 4. С. 20–23. EDN: LQDPPA
12. Жбанова Ю. А. Методические аспекты оценки эффективности внедрения цифровых технологий в нефтегазовой области // *Актуальные проблемы нефти и газа: сборник трудов V Всероссийской молодежной научной конференции*. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2022. С. 186–188. EDN: SBPPMS
13. *Chrysalidis A., Kyzas G. Applied cleaning methods of oil residues from industrial tanks // Processes*. 2020. No. 8. Pp. 569–596. DOI: 10.3390/pr8050569; EDN: BNPMBI
14. Полосин Р. А. Революционные инновации в очистке нефтехранилищ // *Нефть. Газ. Новации*. 2020. № 5. С. 38–41. EDN: HJQUEJ
15. Гасымов Э. Т., Куличков С. В. Преимущества роботизированной установки «MARTIN» // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 31. С. 91–97. EDN: JZRMJJ
16. *Martínez J. L., Mandow A., Morales J. Approximating kinematics for tracked mobile robots // The International Journal of Robotics Research*. 2005. No. 10. Pp. 867–878. DOI: 10.1177/027836490505823
17. *Guerrero-Higueras Á. M., Álvarez-Aparicio C., Calvo Olivera M. C. Tracking people in a mobile robot from 2d lidar scans using full convolutional neural networks for security in cluttered environments // Frontiers in Neurorobotics*. 2019. No. 12. С. 85. DOI: 10.3389/fnbot.2018.00085

REFERENCES

1. Shchipkova Yu.V. Optimization of the cleaning process of vertical steel tanks (VST) during operation. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodyh uchyonyh* [Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XXI International Symposium named after Academician M.A. Usov for Students and Young Scientists]. Tomsk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2017. Pp. 677–679. EDN: ZQLQKV. (In Russian)

2. Krymskaya R.S., Trusov V.I. Conservation composition for oil storage and processing equipment. *Natural and Technical Sciences*. 2012. No. 1. Pp. 229–233. EDN: OWMDEJ. (In Russian)
3. Guliyev A.G. Study of hydrocarbon losses in oil and petroleum product storage systems. *Mirovaya nauka* [World Science]. 2021. No. 3. Pp. 37–42. EDN: IEJUPV. (In Russian)
4. Akhtyamov R.G. Ensuring safety in oil and petroleum product transportation and storage: textbook. Saint Petersburg: PGUPS, 2019. 50 p. (In Russian)
5. Velin A.S. Geological features of soil and groundwater contamination in the area of the "Krasnoye Znamya" oil storage facility. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2017. No. 2. Pp. 158–162. EDN: WHEGJM. (In Russian)
6. Rasulov R.S., Isaev A.Ya. Fire-safe method for cleaning oil storage tanks. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt* [Oil refining and petrochemistry. scientific and technical achievements and best practices]. 2010. No. 4. Pp. 29–33. EDN: MVTCPP. (In Russian)
7. Mikhel E.S., Skurtova I.V. Analysis of fire hazards in petroleum product storage processes. *Scientific Leader*. 2022. No. 20. Pp. 83–85. EDN: LYQDFW. (In Russian)
8. Makarov I.S., Kolesnikov N.P. Technologies and technical means for cleaning tanks from oil deposits. *Sovremennye tendencii razvitiya tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv v sel'skom hozyajstve: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern Trends in the Development of Technologies and Technical Means in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Voronezh: VGU imeni imperatora Petra 1, 2017. Pp. 69–72. EDN: YIQMLX. (In Russian)
9. Dzhahalova K.R., Mazur E.V. Problems of optimizing the cleaning processes of vertical steel tanks at oil depots. *Vestnik ekonomiki i menedzhmenta*. 2021. No. 4. Pp. 17–22. EDN: OSRICR. (In Russian)
10. Teslenko E.S. Problems of manual oil tank cleaning methods. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodyh uchenyh* [Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XVII International Symposium named after Academician M.A. Usov for Students and Young Scientists]. Tomsk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2013. Pp. 386–388. EDN: STAVDN. (In Russian)
11. Markeev V.A., Nazarov V.P., Rozhkov A.V. Study of the efficiency of jet cleaning of oil storage tank surfaces from contaminants. *Vestnik akademii gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii* [Bulletin of the Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. 2005. No. 4. Pp. 20–23. EDN: LQDPPA. (In Russian)
12. Zhanova Yu.A. Methodological aspects of evaluating the effectiveness of digital technology implementation in the oil and gas sector. *Aktual'nye problemy nefti i gaza: sbornik trudov V Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferencii* [Current Problems of Oil and Gas: Proceedings of the V All-Russian Youth Scientific Conference]. Moscow: Institut problem nefti i gaza RAN, 2022. Pp. 186–188. EDN: SBPPMS. (In Russian)
13. Chrysalidis A., Kyzas G. Applied cleaning methods of oil residues from industrial tanks. *Processes*. 2020. No. 8. Pp. 569–596. DOI: 10.3390/pr8050569. EDN: BNPMBI
14. Polosin R.A. Revolutionary innovations in oil storage tank cleaning. *Neft'. Gaz. Novacii* [Oil. Gas. Innovations]. 2020. No. 5. Pp. 38–41. EDN: HJQUEJ. (In Russian)
15. Gasymov E.T., Kulichkov S.V. Advantages of the robotic unit "MARTIN". *Innovacii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. Science. Education]. 2021. No. 31. Pp. 91–97. EDN: JZRMJJ. (In Russian)
16. Martínez J.L., Mandow A., Morales J. Approximating kinematics for tracked mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*. 2005. Vol. 24. No. 10. Pp. 867–878. DOI: 10.1177/027836490505823

17. Guerrero-Higueras Á.M., Álvarez-Aparicio C., Calvo Olivera M.C. Tracking people in a mobile robot from 2D-LIDAR scan using full convolutional neural networks for security in cluttered environments. *Frontiers in Neurorobotics*. 2019. No. 12. Article 85. DOI: 10.3389/fnbot.2018.00085

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012).

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSFS-2024-0012).

Информация об авторах

Шереушев Мадин Артурович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехника и мехатроника», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;

доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1;

shereuzhev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>, SPIN-код: 1734-9056

Ушаков Александр Евгеньевич, аспирант, инженер-исследователь кафедры «Робототехника и мехатроника», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;

ushakov_ae@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1467-5043>, SPIN-код: 5174-7378

Семяников Иван Владимирович, магистр, инженер лаборатории промышленной робототехники, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 1;

ivan.semyannickov@yandex.ru

Information about the authors

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Moscow State University of Technology “STANKIN”;

1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;

Associate Professor, Department of Robotic systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University;

5, build. 1, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;

shereuzhev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>, SPIN-code: 1734-9056

Alexander E. Ushakov, Postgraduate Student, Research Engineer, Department of Robotics and Mechatronics, Moscow State University of Technology “STANKIN”;

1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;

ushakov_ae@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1467-5043>, SPIN-code: 5174-7378

Ivan V. Semyannikov, Master’s Degree, Engineer of Industrial Robotics Laboratory, Moscow State University of Technology “STANKIN”;

1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russia;

ivan.semyannickov@yandex.ru