

УДК 621.83

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-4-13

**Разработка математической модели механической системы  
внутритрубного робототехнического комплекса**

Д. Н. Кучев, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

*Рассмотрена проблема диагностики трубопроводов Российской Федерации. Приведена краткая статистическая информация по отказам технологических трубопроводов различного назначения. Представлены причины возникновения аварий, проанализированы технические решения своевременной диагностики трубопроводов с использованием внутритрубных робототехнических устройств. Предложена новая конструкция внутритрубного робототехнического комплекса с возможностью движения по участкам сложной геометрии, представлено исследование по разработке математического описания механической системы внутритрубного робототехнического комплекса для последующего создания системы управления движением устройства по его перемещению внутри трубопровода. При выполнении исследования использованы методы анализа, синтеза, обобщения научного опыта в области автоматизированных внутритрубных устройств, методы теоретической механики, мехатроники и робототехники.*

*В результате получено математическое описание перехода статически уравновешенной механической системы в движение устройства, когда  $F_{тяги\ расч} > F_c$ . Получены зависимости влияния параметров конструкции и ее ориентации на скалярные величины сил реакций опор колесных движителей; так, при массе устройства 12 кг, ориентации угла наклона трубопровода 0 градусов и минимальной силе прижатия колесных движителей результирующая сил реакций опор составляет 117,6 Н. Полученные зависимости позволяют учитывать распределение силы тяжести между опорными ногами в зависимости от параметров конструкции автоматизированного устройства, а также ее ориентации. При этом силы реакции опор колесных движителей являются главной составляющей при определении тягового усилия движения устройства. В свою очередь, это позволяет вычислить необходимые усилия на опорных ногах для поддержания пространственного положения устройства в зависимости от углов ориентации  $(\theta, \alpha)$ , перемещения диагностического оборудования устройства на необходимую позицию диагностирования относительно трубопровода, выполнить подбор электродвигателя. Результаты исследования могут быть использованы при разработке внутритрубных робототехнических устройств опорно-нажимного типа.*

**Ключевые слова:** технологические трубопроводы, внутритрубная диагностика, аварии на трубопроводах, робототехнические устройства, опорно-прижимные роботы, новая конструкция робота, статика механической системы.

**Введение**

**Т**ехнологические трубопроводы в Российской Федерации (РФ) являются ключевыми элементами энергетического сектора. Их надежность и безопасность – важнейшие аспекты для экономики страны. На территории РФ функционирует свыше 200 тыс. км трубопроводного транспорта [1], включая трубопроводы для транспортировки нефтяных газообразных продуктов. Основную часть аварийности в числе стальных трубопроводов составляет внутренняя и наружная коррозия – 24,7 %, а также брак при строительно-монтажных рабо-

тах – 23,3 %. На трубопроводах по транспортировке нефти и газа к основным причинам возникновения аварий относятся: низкие темпы проведения диагностики и ремонта, сквозная коррозия, разрушение сварного соединения, образования сквозных трещин, появление продольных трещин коррозионного растрескивания под напряжением [2]. При этом на трубопроводах систем теплоснабжения появление коррозионных растрескиваний, язв и питтингов на стенке трубопровода, дефекты сварных швов представляют наибольшую вероятность разгерметизации оборудования теплоснабжения на технологиче-

ских трубопроводах диаметром  $D = 300$  и  $D = 200$  мм [3].

Своевременная диагностика и ремонт этих систем не только предотвращают финансовые потери, но и ограждают окружающую среду от потенциального ущерба. Применение ручных методов неразрушающего контроля не является достаточно эффективным, особенно с учетом сложности и масштаба современных трубопроводных систем. Внедрение робототехнических устройств в диагностический процесс позволит значительно повысить точность и надежность данных, способствуя более точному прогнозированию остаточного срока службы трубопроводов и предотвращению серьезных аварий. Актуальной задачей является разработка эффективного устройства для диагностики технологических трубопроводов диаметрами от 200 до 450 мм и сложной пространственной геометрией (неравномерности сечения, отводы). На сегодняшний день существующие внутритрубные роботы, несмотря на свой инновационный потенциал, имеют значительные ограничения, особенно при работе в условиях сложной геометрии. Внутритрубные снаряды-дефектоскопы требуют дополнительных затрат по внедрению пуско-приемочных камер в технологические трубопроводы, а также имеют недостатки конструкции для движения на участках сложной геометрии. Так, роботы на колесной или гусеничной платформе по типу конструкции тележ-

ки эффективно функционируют в прямых сегментах, но сталкиваются с трудностями на более сложных участках [4–6]. Роботы ползающего и шагающего типа конструкции также имеют трудности на участках сложной геометрии ввиду неустойчивости конструкции, что может приводить к заклиниванию или опрокидыванию внутритрубного робота [7–12]. Это приводит к ограничению их функциональности на труднодоступных участках, что важно для полноценной диагностики и обслуживания трубопроводов. Исследования в области конструкций опорно-прижимного типа внутритрубных роботов, проведенные как отечественными, так и зарубежными учеными, оказали значительный вклад в научную область робототехнических устройств диагностики трубопроводов [13–21]. Однако анализ данных работ выявил определенные недостатки в несущих конструкциях этих устройств. Ключевыми проблемами являются: зависимость кинематических механизмов, управляющих расположением опорными ногами роботов, и отсутствие индивидуальных демпферов для каждой опорной ноги, представленные на рисунке 1 (см., например, Голубкин И. А., Щербатов И. А. Внутритрубная диагностика газопроводов мобильным роботом. Часть 1. Гибридная математическая модель перемещения робота внутри трубы // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 2(34). С. 69–81).

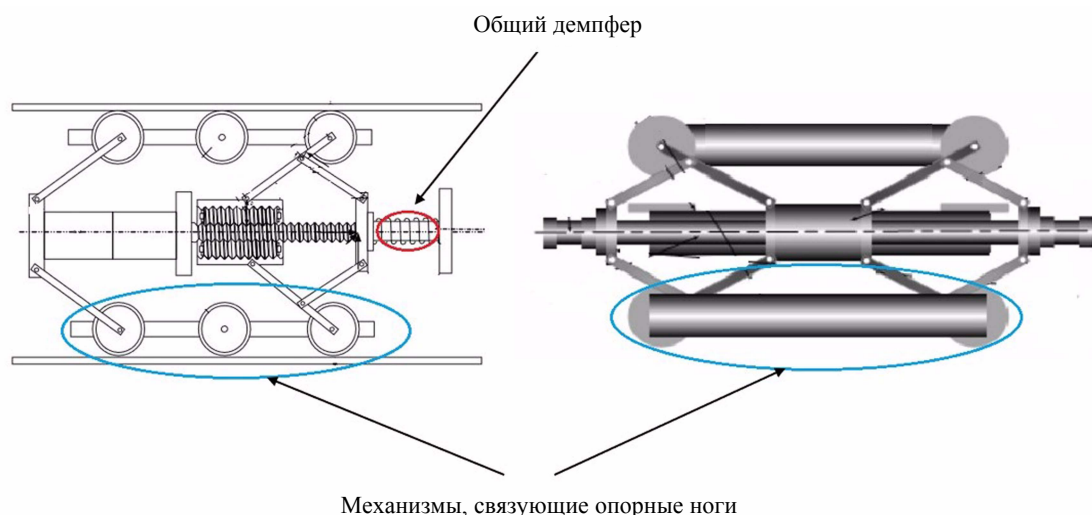


Рис. 1. Структурные кинематические схемы существующих робототехнических устройств опорно-прижимного типа

Fig. 1. Structural kinematic schemes of existing robotic devices of the support-clamping type

Эти недостатки часто приводят к блокировке устройства в прямолинейных сегментах трубопровода с неравномерным сечением диаметра

или на участках с наличием отводов ввиду возникновения различных действующих нагрузок на каждую опорную ногу. В связи с этим проис-

ходит либо складывание опорных ног, либо их раскрытие с последующим изменением опорной длины в плоскости поперечного сечения трубопровода перпендикулярно оси трубопровода.

**Целью** исследовательской работы является определение эффективного внутритрубного устройства с последующей разработкой математического описания его статически уравновешенной механической системы для осуществления равномерного движения роботизированного устройства по внутритрубному пространству.

Объектом исследования является внутритрубное робототехническое устройство, а предметом исследования – статическое равновесие механической системы устройства.

При выполнении исследования использованы методы анализа, синтеза, обобщения научного опыта в области автоматизированных внутри-

трубных устройств, методы теоретической механики, мехатроники и робототехники.

### Разработка математической модели

В результате анализа робототехнических устройств, имеющих конструкцию опорно-прижимного типа, разработана и предложена конструкция внутритрубного робототехнического комплекса (ВРК) [22], имеющего 6 опорных ног с индивидуальным демпфирующим элементом для каждой опорной ноги, расположенных в механической системе приводных и неприводных опорных ног. Предлагаемая конструкция (рис. 2) позволяет перемещаться в технологических трубопроводах диаметром 200...475 мм с наличием участков сложной геометрии благодаря выполнению корпусных элементов криволинейной формы и особой кинематической схемы опорных ног.

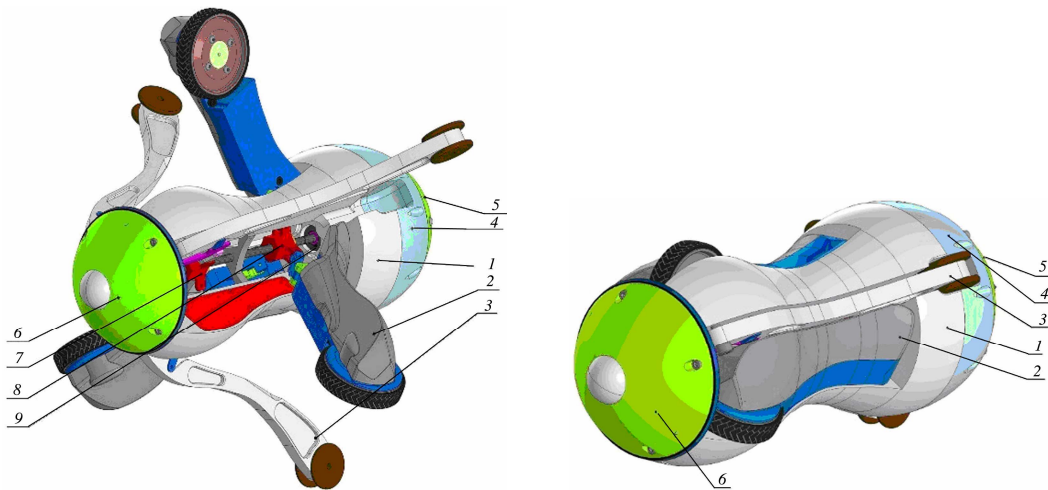


Рис. 2. Предлагаемая конструкция ВРК: 1 – корпус; 2 – нога приводная опорная с колесным движителем; 3 – нога неприводная опорная с колесным движителем; 4 – отсек корпуса; 5 – задняя крышка; 6 – передняя крышка; 7, 8 – механическая система рычагов неприводных и приводных опорных ног; 9 – ось

Fig. 2. The proposed design of the IRC: 1 - body; 2 - drive support leg with a wheel drive; 3 - non-drive support leg with a wheel drive; 4 - housing compartment; 5 - rear cover; 6 - front cover; 7, 8 - mechanical lever system of non-drive and drive support legs; 9 - axis

Однако в работах по исследованию статики и динамики таких конструкций (см., например, Егоров И. Н., Кадхим Д. А. Управление перемещением диагностического робота в трубопроводах с переменным поперечным сечением // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 2) предлагается рассматривать исключительно одно несущее основание робота с расположенными на нем тремя опорными ногами, когда учитываются только две возникающие силы реакций опор, которые удерживают силу тяжести устройства, при этом обоснования исключения из уравнений статики действующих сил от прижатия опорных ног к стенке трубопровода не

приводятся. В разработанной конструкции опорно-прижимного типа опорные ноги расположены под углом 60 градусов относительно друг друга. Составляющая сила тяги ВРК определяется зависимостью  $F_{\text{тяги расч}}$  с учетом коэффициента трения-качения колеса  $\mu$  (рис. 3); для прямолинейного участка и для движения в отводе принимается допущение, что сила прижатия каждого колеса скомпенсирована силой упругости пружины системы опорной ноги  $F_{\text{п}} = F_{\text{упр}}$ , а коэффициент трения качения колеса приблизительно равен коэффициенту трения покоя  $\mu \approx \mu_{\text{п}}$ .

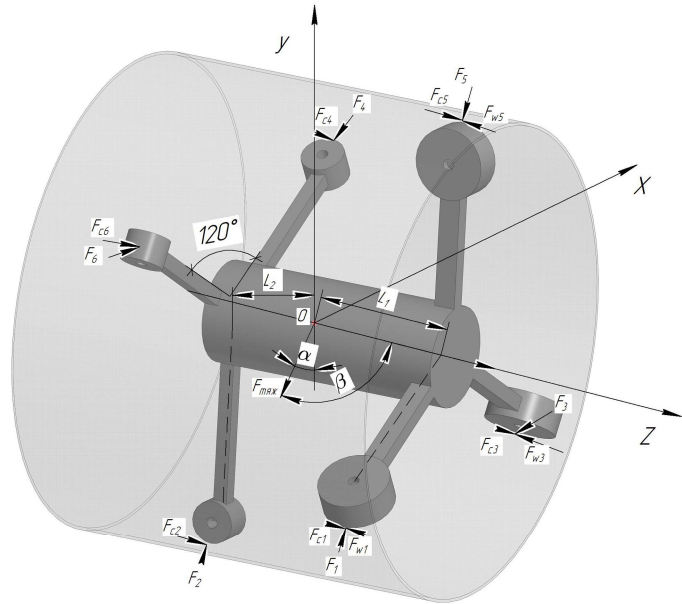
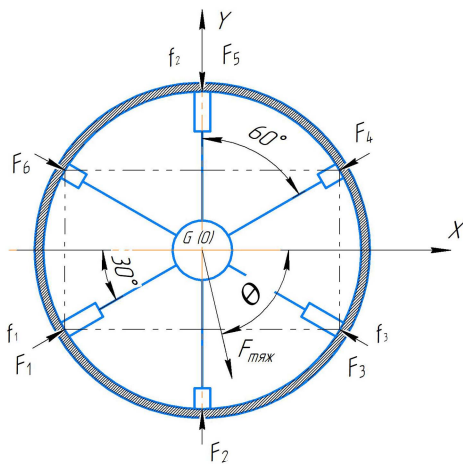


Рис. 3. Расположение ВРК во внутритрубном пространстве с учетом статического уравнивания

Fig. 3. The location of the IRC in the inner tube space, taking into account static balancing

Проекции сил включают в себя неизвестные силы реакций опор от колесных движителей, силы трения-качения, а также силы от крутящего момента на каждом колесном движителе, которые необходимо создавать электродвигателями для равномерного движения ВРК. С учетом статики механической системы

$$\begin{cases} \sum F_x = F_6 \cos 30^\circ - F_4 \cos 30^\circ + F_1 \cos 30^\circ - \\ - F_3 \cos 30^\circ + mg \cos(\theta) \cos(\alpha), \\ \sum F_y = -F_5 + F_2 + F_3 \cos 60^\circ + F_1 \cos 60^\circ - \\ - F_4 \cos 60^\circ - F_6 \cos 60^\circ + mg \sin(\theta) \cos(\alpha), \\ \sum F_z = (F_1 + F_2 + F_3) \mu + (-F_{w5} - F_{w1} - F_{w3}) + \\ + (F_6 + F_5 + F_4) \mu + mg \cos(\beta), \\ \sum M_{ox} = F_6 \cos 60^\circ L_2 + F_1 \cos 60^\circ L_1 + \\ + F_4 \cos 60^\circ L_2 + F_3 \cos 60^\circ L_1 - F_5 L_1 - F_2 L_1, \\ \sum M_{oy} = F_6 \cos 30^\circ L_2 - F_1 \cos 30^\circ L_1 - \\ - F_4 \cos 30^\circ L_2 + F_3 \cos 30^\circ L_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_i$  – реакция опоры;  $\theta$  – угол расположения ВРК относительно оси  $X$ , определяет направление силы тяжести в плоскости  $OXY$ ;  $F_{wi}$  – сила от крутящего момента на колесном движителе;  $\alpha$  – локальный угол наклона трубопровода в проекции на ось  $Y$  относительно направления ускорения свободного падения;  $\beta$  – угол расположения ВРК относительно оси  $Z$ , определяет направление силы тяжести в плоскости  $OZY$ ;  $m$  – масса ВРК;  $g$  – ускорение свободного падения.

Рассмотрим систему уравнений проекций действия сил без учета моментов и выполним преобразование. С учетом равновесия ВРК, когда  $F_{wi} = 0$ , определение сил имеет следующий вид:

$$\vec{f}_1 = \vec{F}_1 + \vec{F}_4; \quad (2)$$

$$\vec{f}_2 = \vec{F}_2 + \vec{F}_5; \quad (3)$$

$$\vec{f}_3 = \vec{F}_3 + \vec{F}_6; \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum f_x = f_1 - f_3 = -\frac{mg \cos(\theta) \cos(\alpha)}{\cos \frac{\pi}{6}}, \\ \sum f_y = f_1 - \frac{f_2}{\sin \frac{\pi}{6}} + f_3 = -\frac{mg \sin(\theta) \cos(\alpha)}{\sin \frac{\pi}{6}}, \\ f = f_1 + f_2 + f_3 = mg \cos(\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

Направление векторов  $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3$  определено исходя из реакций опор колесных движителей ввиду того, что управление тяговой силой выполняется через приводные опорные ноги. При этом если реакции опор неприводных опорных ног  $\vec{F}_2, \vec{F}_4, \vec{F}_6$  являются единственной составляющей в векторной сумме  $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3$ , то данные реакции распределяются между векторной суммой, где присутствуют реакции опор от колес-

ных движителей  $\overline{F_1}, \overline{F_3}, \overline{F_5}$ , воспринимаемые нагрузку от силы тяжести.

Получим поле решения для системы линейных алгебраических уравнений матричным методом:

$$f_i(\theta, \alpha, m) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & \frac{-1}{\sin \frac{\pi}{6}} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -mg \left( \frac{\cos(\theta)}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cos(\alpha) \\ -mg \left( \frac{\sin(\theta)}{\sin \frac{\pi}{6}} \right) \cos(\alpha) \\ mg \cos(\alpha) \end{pmatrix} + \sum F_{\text{приж}}, \quad (6)$$

$$m > 0, \theta \in \left[ -\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2} \right], \alpha \in \left[ 0; \frac{\pi}{2} \right], \beta \in [0; -2\pi],$$

где  $\sum F_{\text{приж}}$  – суммарная сила прижатия от колесных движителей к стенке трубопровода, в последующих расчетах принимается минимальной для демонстрации распределения силы тяжести.

Тогда силу тяги  $F_{\text{тяги}}$  ВРК и силу сопротивления движения  $F_c$  можно определить следующими зависимостями с учетом угла наклона трубопровода  $\alpha$  относительно направления ускорения свободного падения:

$$F_{\text{тяги расч}} > F_c = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & \frac{-1}{\sin \frac{\pi}{6}} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -mg \left( \frac{\cos(\theta)}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cos(\alpha) \\ -mg \left( \frac{\sin(\theta)}{\sin \frac{\pi}{6}} \right) \cos(\alpha) \\ mg \cos(\alpha) \end{pmatrix} + \sum F_{\text{приж}} \end{pmatrix} \mu + mg \cos(\beta). \quad (7)$$

С учетом наличия трех приводных колесных движителей получим зависимость для начала движения ВРК, когда силы тяги устройства  $F_{\text{тяги расч}} > 0$ :

$$F_{\text{тяги расч}} = (F_{w1} + F_{w2} + F_{w3}) - F_c. \quad (8)$$

Численное определение скалярных величин реакций опор от колесных движителей ВРК в зависимости от массы устройства при различных углах наклона ориентации  $\theta = 30, 45, 60$  и  $90$  градусов и угле наклона трубопровода  $\alpha = 0^\circ$  представлено на рисунке 4, где красным

цветом отображена результирующая сила реакций опор колесных движителей; синим, зеленым и фиолетовым цветом определены суммы противоположно направленных скалярных значений сумм векторов реакций опор, соответственно,  $\overline{f_1}, \overline{f_2}, \overline{f_3}$ . Зависимости скалярных величин модуля суммы сил и суммы противоположно направленных реакций опор от массы ВРК имеют линейный характер, отрицательные значения свидетельствуют о преобладании противоположно направленной силы реакции. Также при массе устройства ВРК  $m = 12$  кг результи-

рующая сила реакций опор составляет 117,6 Н. Зависимости позволяют определить силы тяжести между опорными ногами. Зависимости скалярных величин результирующей силы реакций

опор и суммы противоположно направленных скалярных величин в реакциях опор от угла ориентации ВРК имеют синусоидальный характер (рис. 5).

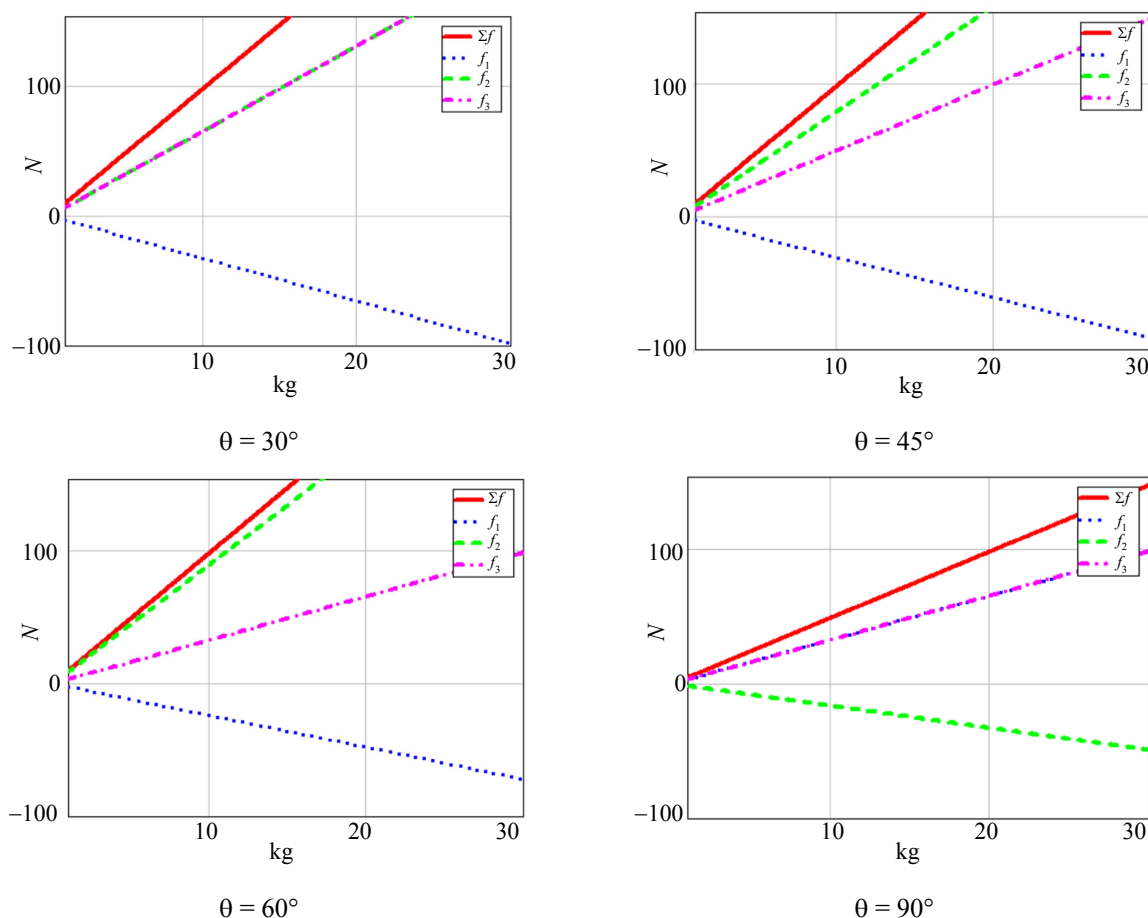


Рис. 4. Зависимости распределения скалярных величин реакций опор ВРК от его массы при различных углах  $\theta$

Fig. 4. The dependences of the distribution of scalar values of the reactions of the supports of the IRC on its mass at different angles  $\theta$

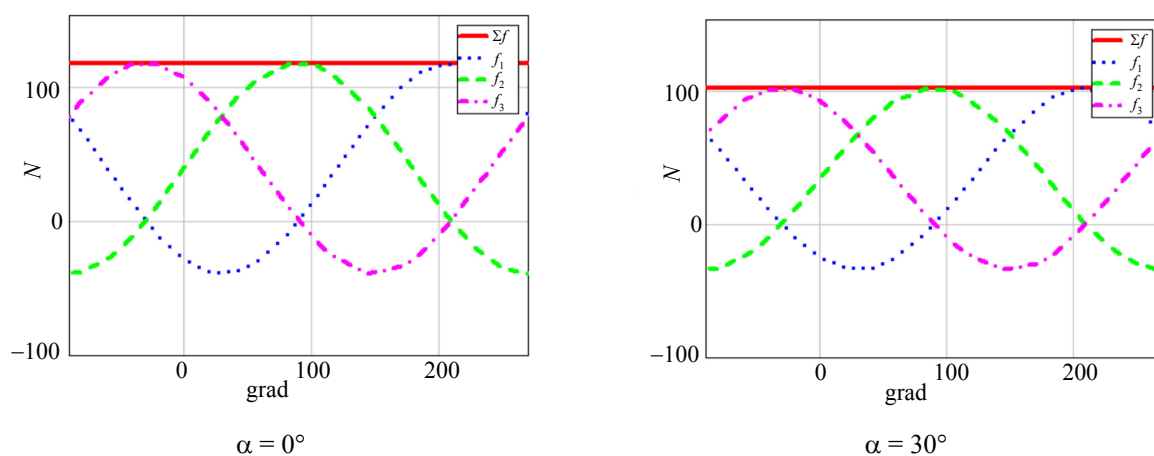


Рис. 5. Зависимости скалярных величин реакций опор от угла ориентации ВРК  $\theta$  при различных углах наклона трубопровода  $\alpha$

Fig. 5. The dependences of the scalar values of the reactions of the supports on the orientation angle of the IRC  $\theta$  at different angles of inclination of the pipeline  $\alpha$

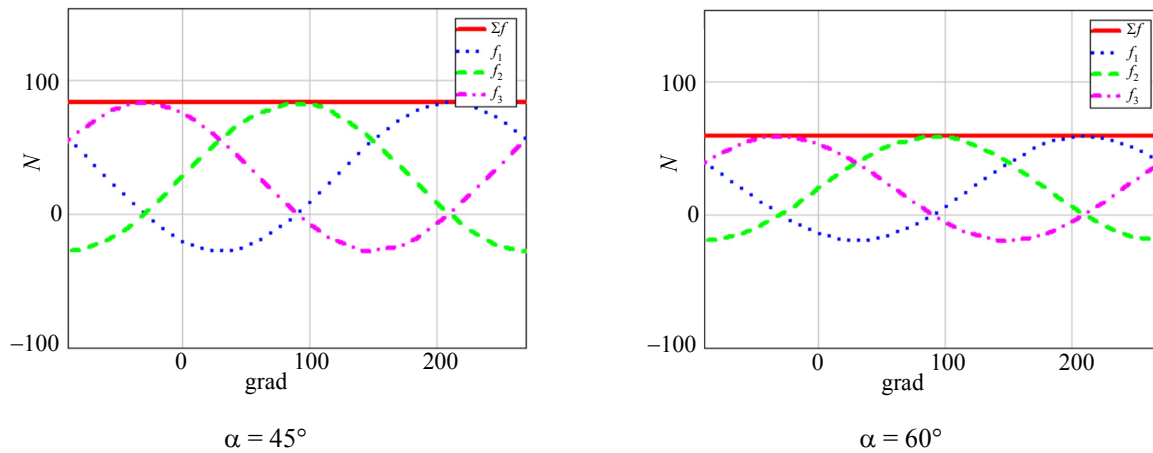


Рис. 5 (окончание). Зависимости скалярных величин реакций опор от угла ориентации ВРК  $\theta$  при различных углах наклона трубопровода  $\alpha$

Fig. 5 (continued). The dependences of the scalar values of the reactions of the supports on the orientation angle of the IRC  $\theta$  at different angles of inclination of the pipeline  $\alpha$

Когда угол наклона  $\theta = -\frac{\pi}{2}$ , то скалярная сумма реакции опор  $\bar{f}_1, \bar{f}_3$  равна силе тяжести ВРК; отрицательное значение  $\bar{f}_2$  свидетельствует о создании необходимой силы поджатия для контакта колесного движителя со стенкой трубопровода. Когда  $\alpha \rightarrow 90^\circ$ , результирующая сила реакций опор уменьшается, в этом случае для статического равновесия на наклонных поверхностях, действие силы тяжести по проекции оси  $Z$  необходимо скомпенсировать силами поджатия колесных движителей. Полученные результаты позволяют выполнить подбор электродвигателей для движения устройства во внутритрубном пространстве, а также вычислить необходимое усилия на опорных ногах для поддержания пространственного положения ВРК по углу  $\theta$ , что предоставляет возможность перемещать диагностическое оборудование ВРК на необходимую позицию диагностирования относительно трубопровода.

### Выводы

Результаты полученных исследований отражают актуальность разработки робототехнических устройств для внутритрубной диагностики. Определена эффективная конструкция ВРК, которая включает в себя шесть опорных ног, расположенных под углом 60 градусов относительно друг друга для создания устойчивого положения во внутритрубном пространстве, а также опорные ноги выполнены с индивидуальным демпфером для движения на участках сложной геометрии. Получено математическое описание

перехода статически уравновешенной механической системы в движение устройства, когда  $F_{\text{тяги расч}} > F_c$ , представлены зависимости влияния параметров конструкции и ее ориентации на скалярные величины сил реакций опор. Так, при массе устройства 12 кг, ориентации угла наклона ВРК, угла наклона трубопровода 0 градусов и минимальной силе прижатия колесных движителей результирующая сил реакций опор составляет 117,6 Н. Полученные зависимости позволяют определить силы тяжести между опорными ногами, при этом силы реакции опор являются основной составляющей для определения тягового усилия движения устройства, где влияние оказывают углы ориентации ВРК  $\theta$  и  $\alpha$ , а также масса самого устройства  $m$  и сила прижатия колесных движителей  $F_{\text{приж}}$ , что отражено в полученных зависимостях скалярных величин результирующей силы и суммы сил реакции опор. Разработанная математическая модель позволит создать систему управления для равномерного движения ВРК по внутритрубному пространству как для линейной части трубопроводов, так и сложной геометрии с учетом распределения тягового усилия между тремя колесными движителями.

Результаты исследования могут быть использованы при подборе электродвигателей колесных движителей при обеспечении необходимого тягового усилия для перемещения во внутритрубном пространстве, а также при создании методики проектирования внутритрубных робототехнических устройств.

## Библиографические ссылки

1. Гибадулин П. Д., Уланов В. В. К вопросу о безопасности трубопроводного транспорта нефти и газа // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2022. № 12(132). С. 16–20.
2. Короткова Т. Г., Боженова К. С. Статистика и причины аварий на объектах нефтегазодобычи // Научные труды КубГТУ. 2019. № 1. С. 115–127.
3. Емельянова В. А., Соколова Е. В. Исследование риска аварий на объекте теплоснабжения и разработка комплекса мероприятий по повышению безопасности его функционирования // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17, № 3. С. 44–55.
4. Холоденко В. Б., Пахомов А. П. Внутритрубные диагностические роботизированные мобильные комплексы для труб различного диаметра // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 52. С. 630–645.
5. Рыльцева Ю. А., Орлов В. А. Системы визуального обследования и ремонта водопроводных и водоотводящих трубопроводов // Инженерный вестник Дона. 2020. № 4(64). С. 23.
6. Роботы для обработки трубопроводов малого диаметра в условиях агрессивных сред / И. О. Вторушин, В. В. Левщанов, С. А. Косарев [и др.] // Экстремальная робототехника. 2021. Т. 1, № 1. С. 330–346.
7. Venkateswaran S., Chablat D. (2019). A new inspection robot for pipelines with bends and junctions. In: Uhl, T. (eds) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2019. Mechanisms and Machine Science, vol. 73. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_4)
8. Liu J., Wang Y., Li M. and R. Deng (2023) Joint Linkage and Motion System Design of Pipeline Detecting Snake Robot, 2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yichang, China, 2023, pp. 1545-1550. DOI: 10.1109/CCDC58219.2023.10327219
9. Virgala I., Kelemen M., Prada E. (2021) A snake robot for locomotion in a pipe using trapezium-like travelling wave. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, vol. 158, p. 104221. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104221
10. Ворочаева Л. Ю., Савин С. И. Исследование установившихся периодических движений модулей ползающего робота при наличии внешних возмущений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 4(733). С. 18–29. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-18-29
11. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю. Восстановление вертикального равновесия шагающего робота как оптимизационная задача // Завалишинские чтения 19 : сборник докладов конференции, Санкт-Петербург, 17–20 апреля 2019 года. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 260–263.
12. Krishna G.A., Castillo U.A., Mishra A. (2022) Hereid and S. Kolathaya, “Linear Policies are Sufficient to Realize Robust Bipedal Walking on Challenging Terrains”. In *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 2047-2054, April 2022. DOI: 10.1109/LRA.2022.3143227
13. Yan H., Wang L., Li P., Wang Z., Yang X., Hou X. (2020) Research on Passing Ability and Climbing Performance of Pipeline Plugging Robots in Curved Pipelines. *IEEE Access* 2020, 8, 173666-173680.
14. Wu K., Sang H., Xing Y., Lu Y. (2023) Design of wireless in-pipe inspection robot for image acquisition. *Ind. Robot.-Int. J. Robot. Res. Appl.*, 50, pp. 145-161.
15. Zheng T., Wang X., Li H. (2022) Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 6, pp. 4608-4618.
16. Chen J., Cao X., Xu H., Zhang X. and Deng Z. (2020) Structure Design and Characteristic Analysis of Compound-Driven Unit for Pipeline Robot, 2020, 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Shenzhen, China, pp. 353-358.
17. Zheng T. (2022) Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 6, pp. 4608-4618.
18. Chen J., Zhang X., Cao X., Deng Z. (2019) Speed Control Characteristics and Energy Consumption Modeling for Composite Driving in-Pipe Robot, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Dali, China, 2019, pp. 2583-2588.
19. Kazeminasab S., Akbari A., Jafari R., Banks M.K. (2021) Design, Characterization and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems, 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Valencia, Spain, pp. 39-46.
20. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. (2021) Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot, 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Singapore, pp. 136-140.
21. Miao X., Zhao H., Ma Y. (2022) Perception Modeling of In-Pipe Robot based on Machine Learning, 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), Malang, Indonesia, pp. 322-327.
22. Обоснование выбора конструкции автономного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии / Кучев Д. Н., Тонков Е. Ю., Поезжаева Е. В., Щелудяков А. М., Гумаров Э. Х., Белобородов Ф. С. // *Строительные и дорожные машины*. 2023. № 4. С. 47–52.

## References

1. Gibadulin P.D., Ulanov V.V. (2022) [On the issue of safety of pipeline transport of oil and gas]. *Delovoj zhurnal Neftegaz.RU*, no. 12, pp. 16-20 (in Russ.).
2. Korotkova T.G., Bozhenova K.S. (2019) [Statistics and causes of accidents at oil and gas production facilities]. *Nauchnye trudy KubGTU*, no. 1, pp. 115-127 (in Russ.).
3. Yemelyanova V.A., Sokolova E.V. (2020) [Investigation of the risk of accidents at a heat supply facility and development of a set of measures to improve the safety of its operation]. *Problemy analiza riska*, vol. 17, no. 3, pp. 44-55 (in Russ.).



4. Kholodenko V.B., Pakhomov A.P. (2022) [Intube diagnostic robotic mobile complexes for pipes of various diameters]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, no. 52, pp. 630-645 (in Russ.).
5. Ryltseva Yu.A., Orlov V.A. (2020) [Systems of visual inspection and repair of water supply and drainage pipelines]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, no. 4, p. 23 (in Russ.).
6. Vtorushin I.O., Levshchanov V.V., Kosarev S.A. (2021) [Robots for processing small diameter pipelines in aggressive environments]. *Jekstremal'naja robototekhnika*, vol. 1, no. 1, pp. 330-346 (in Russ.).
7. Venkateswaran S., Chablat D. (2019). A new inspection robot for pipelines with bends and junctions. In: Uhl, T. (eds) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2019. *Mechanisms and Machine Science*, vol. 73. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_4)
8. Liu J., Wang Y., Li M. and R. Deng (2023) Joint Linkage and Motion System Design of Pipeline Detecting Snake Robot, 2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yichang, China, 2023, pp. 1545-1550. DOI: 10.1109/CCDC58219.2023.10327219
9. Virgala I., Kelemen M., Prada E. (2021) A snake robot for locomotion in a pipe using trapezium-like travelling wave. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 158, p. 104221. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104221
10. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I. (2021) [Investigation of steady periodic movements of modules of a crawling robot in the presence of external disturbances]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, no. 4, pp. 18-29 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-18-29
11. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. (2019) [Restoration of vertical equilibrium of a walking robot as an optimization task]. In: Zavalishinsky readings 19 : Collection of conference reports, St. Petersburg, April 17-20, 2019. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019, pp. 260-263 (in Russ.).
12. Yang X., Bai P., Shen X. (2018) Design and modeling of a walking mechanism for the self-adapting pipeline robot. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Qingdao City, Shandong Province, August 23-25, 2018. Qingdao City, Shandong Province, p. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/186/5/012035
13. Yan H., Wang L., Li P., Wang Z., Yang X., Hou X. (2020) Research on Passing Ability and Climbing Performance of Pipeline Plugging Robots in Curved Pipelines. *IEEE Access* 2020, 8, 173666-173680.
14. Wu K., Sang H., Xing Y., Lu Y. (2023) Design of wireless in-pipe inspection robot for image acquisition. *Ind. Robot.-Int. J. Robot. Res. Appl.*, 50, pp. 145-161.
15. Zheng T., Wang X., Li H. (2022) Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 6, pp. 4608-4618.
16. Chen J., Cao X., Xu H., Zhang X., Deng Z. (2020) Structure Design and Characteristic Analysis of Compound-Driven Unit for Pipeline Robot, 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Shenzhen, China, pp. 353-358.
17. Zheng T. (2022) Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 6, pp. 4608-4618.
18. Chen J., Zhang X., Cao X., Z. Deng (2019) Speed Control Characteristics and Energy Consumption Modeling for Composite Driving in-Pipe Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Dali, China, 2019, pp. 2583-2588.
19. Kazeminasab S., Akbari A., Jafari R., Banks M. K. (2021) Design, Characterization and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems, 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Valencia, Spain, pp. 39-46.
20. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. (2021) Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot, 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Singapore, pp. 136-140.
21. Miao X., Zhao H., Ma Y. (2022) Perception Modeling of In-Pipe Robot based on Machine Learning, 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), Malang, Indonesia, pp. 322-327.
22. Kuchev D.N., Tonkov E.Yu., Poezhaeva E.V., Shcheludyakov A.M., Gumarov E.H., Beloborodov F.S. (2023) [Substantiation of the choice of the design of an autonomous robotic complex for the diagnosis of pipelines of complex geometry]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, no. 4, pp. 47-52 (in Russ.).

## Mathematical Model Development of an In-Line Robotic Complex Mechanical System

D.N. Kuchev, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

*The article considers the problem of pipeline inspection of the Russian Federation, provides brief statistics on failures of various purpose industrial pipelines, presents the causes of accidents, analyzes technical solutions for pipeline timely inspection using in-line robotic devices, proposes a new design of an in-line robotic complex with the possibility of movement along complex geometry sections, a study presents the mathematical description development of an in-line robotic complex mechanical system for the subsequent creation of a motion control system for the device moving inside the pipeline. The research uses methods of analysis, synthesis, generalization of scientific experience in the field of automated in-tube devices, methods of theoretical mechanics, mechatronics and robotics.*

*As a result, a mathematical description of a statically balanced mechanical system transition into the movement of the device is obtained when  $F_{\text{тяги расч}} > F_c$ ; relations of design parameters and its orientation on scalar values of wheel propeller reaction forces are obtained; thus, for a device weight of 12 kg, the orientation of the pipeline inclination angle of 0 degrees and the minimum clamping force of wheel propellers, the resulting reaction forces of the supports*

is 117.6 N. The obtained relations make it possible to determine the gravity distribution between the supporting legs with respect to design parameters of an automated device, as well as its orientation, while the wheel propeller reaction forces are the main component in determining the device traction force. In turn, this allows calculation of the required forces on the supporting legs to maintain the device spatial position with respect to the orientation angles  $(\theta, \alpha)$ , to move the inspecting equipment of the device to the required diagnostic position relative to the pipeline and to select an electric motor. The results of the study can be used in the development of in-line robotic devices of the push-pull type.

**Keywords:** industrial pipelines, in-line inspection, pipeline accidents, robotic devices, support and clamping robots, new robot design, mechanical system statics.

Получено 25.12.2023

#### Образец цитирования

Кучев Д. Н. Разработка математической модели механической системы внутритрубного робототехнического комплекса // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 1. С. 4–13. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-4-13

#### For Citation

Kuchev D.N. (2024) [Mathematical Model Development of an In-Line Robotic Complex Mechanical System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 4-13 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-4-13