

Научная статья
УДК 629.785

Научно-методический аппарат обоснования требований к конструктивным параметрам и режимам работы колёсных движителей планетоходов

Артём Иванович Быков

Филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге, г. Калуга, Россия,
bykovartem1994@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены методы, алгоритмы и модели, которые позволяют сформировать обоснованный выбор конструктивных параметров и режимов работы колёсных движителей шасси планетохода для повышения проходимости и подвижности при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации. Приведён анализ эксплуатации планетоходов на поверхности Марса, а также результатов наземной экспериментальной отработки шасси и колёсных движителей планетоходов при имитации пониженной гравитации. На основе результатов экспериментальных исследований описаны причины снижения сцепления колёсных движителей планетоходов со слабосвязанным грунтом в условиях пониженной гравитации. Представлены модели и алгоритм выбора конструктивных параметров грунтозацепов колёсных движителей для повышения сцепления колёсных движителей планетохода при движении по слабосвязанному грунту. Разработаны модели и закон управления распределением подводимой мощности к колёсным движителям шасси планетохода при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации. Результаты, представленные в данной работе, позволяют повысить проходимость и подвижность шасси планетоходов при движении в условиях слабосвязанного грунта и пониженной гравитации.

Ключевые слова: планетоход, проходимость и подвижность шасси планетохода, конструктивные параметры грунтозацепов колёсных движителей, регулирование подводимой мощности к колёсным движителям, движение по слабосвязанному грунту.

Для цитирования: Быков А.И. Научно-методический аппарат обоснования требований к конструктивным параметрам и режимам работы колёсных движителей планетоходов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. №4 (42).

Original article

Scientific and methodological apparatus for substantiating requirements for planetary rovers wheels design parameters and operating modes

Bykov Artyom I.

Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, Russia,

bykovartem1994@yandex.ru

Abstract. The article considers methods, algorithms and models that make it possible to form a reasonable choice of design parameters and operating modes of the wheeled propellers of the planetary rover chassis to increase cross-country ability and mobility when moving on loosely connected ground in conditions of reduced gravity. The analysis of the operation of planetary rovers on the surface of Mars, as well as the results of ground-based experimental testing of the landing gear and wheeled propellers of planetary rovers in imitation of reduced gravity, is presented. Based on the results of experimental studies, the reasons for the decrease in the adhesion of the wheeled propellers of planetary rovers with loosely bonded soil in conditions of reduced gravity are described. Models and an algorithm for selecting the design parameters of the ground hooks of wheel thrusters to increase the adhesion of the wheel thrusters of the planetoid when moving on loosely connected ground are presented. Models and a law for controlling the distribution of power supplied to the wheeled propellers of the planetary rover chassis when moving on loosely connected ground in conditions of reduced gravity have been developed. The results presented in this paper make it possible to increase the patency and mobility of the landing gear of planetary rovers when moving in conditions of loosely bonded soil and low gravity.

Keywords: planetary rover, cross-country ability and mobility of the planetary rover chassis, design parameters of the ground hooks of the wheel thrusters, regulation of the power supplied to the wheel thrusters, movement on loosely connected ground.

For citation: Bykov A.I. Scientific and methodological apparatus for substantiating requirements for planetary rovers wheels design parameters and operating modes. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. №4 (42).

Введение

Одними из наиболее важных характеристик шасси планетоходов являются проходимость и подвижность. В современных планетоходах используются подвески rocker-bogie для обеспечения высоких показателей

данных характеристик в условиях рельефа, грунта и гравитации космического объекта Солнечной системы. Преимуществом данных подвесок является способность преодолевать препятствия размером вдвое больше диаметра колёса, сохраняя контакт всех шести колёс с опорной поверхностью, и уменьшение угла наклона корпуса аппарата [1].

Однако, несмотря на все достоинства данной подвески, планетоходы НАСА при эксплуатации на поверхности Марса столкнулись со значительным снижением показателей подвижности и проходимости при движении по слабосвязанному грунту. Снижение данных показателей выражалось в значительном росте буксования колёсных движителей. В некоторых случаях значение коэффициента буксования превышало 90% [2].

Стоит выделить, что в рамках наземной экспериментальной отработки с применением ходовых макетов шасси планетоходов, обезвешенных в соответствии с гравитационными условиями Марса, не наблюдалось высоких значений буксования колёсных движителей при движении по слабосвязанному грунту [2].

В рамках дальнейших экспериментальных исследований динамики взаимодействия отдельного колёсного движителя с грунтом при имитации пониженной гравитации на борту самолёта-лаборатории, летящего по параболической траектории, было обнаружено, что с уменьшением гравитационного воздействия ухудшаются показатели сцепления колеса со слабосвязанным грунтом [2].

Для компенсации влияния гравитационных условий на сцепление колёсных движителей планетоходов со слабосвязанным грунтом возможно использовать следующие подходы:

- 1) обоснованный выбор конструктивных параметров грунтозацепов колёсных движителей планетохода;
- 2) управление распределением подводимой мощности к колёсным движителям планетохода.

Целью данной работы является разработка научно-методического аппарата обоснования требований к конструктивным параметрам и режимам работы колёсных движителей, направленные на повышение проходимости и подвижности шасси планетоходов в условиях движения по слабосвязанному грунту при пониженной гравитации.

Результаты анализа влияния условий пониженной гравитации на величину коэффициента сцепления колёсного движителя, перемещающегося по слабосвязанному грунту

Для имитации пониженной гравитации в рамках наземной экспериментальной отработки специальных колёсных шасси планетоходов обычно используется обезвешивание [3]. Данный способ подразумевает компенсацию влияния гравитации Земли в степени, обеспечивающей соответствие гравитационным условиям космического объекта. Реализация данной компенсации производится или созданием компенсирующего усилия, направленного вертикально вверх, или за счёт уменьшения массы объекта обезвешивания до той степени, чтобы он создавал нормальную нагрузку на опорную поверхность, соответствующую условиям притяжения космического объекта. Стоит обратить внимание, что в рамках данного подхода не учитывается влияние пониженной гравитации на слабосвязанный грунт в контакте с колёсным движителем, что значительно снижает достоверность результатов экспериментальных исследований [3].

Для одновременного воздействия пониженной гравитации на колесо и слабосвязанный грунт в рамках экспериментального исследования, описанного в работе [2], по оценке тягово-сцепных свойств колёсного движителя перспективного планетохода при движении по слабосвязанному грунту применялся самолёт-лаборатория. При движении самолёта-лаборатории по параболической траектории имитируются условия пониженной гравитации в течении 20-30 секунд. Результаты, приведённые в работе [2], показывают, что со снижением гравитации происходит

уменьшение угла наклона функциональной зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования, как показано на рис. 1. Это свидетельствует об ухудшении проходимости и подвижности при движении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации.

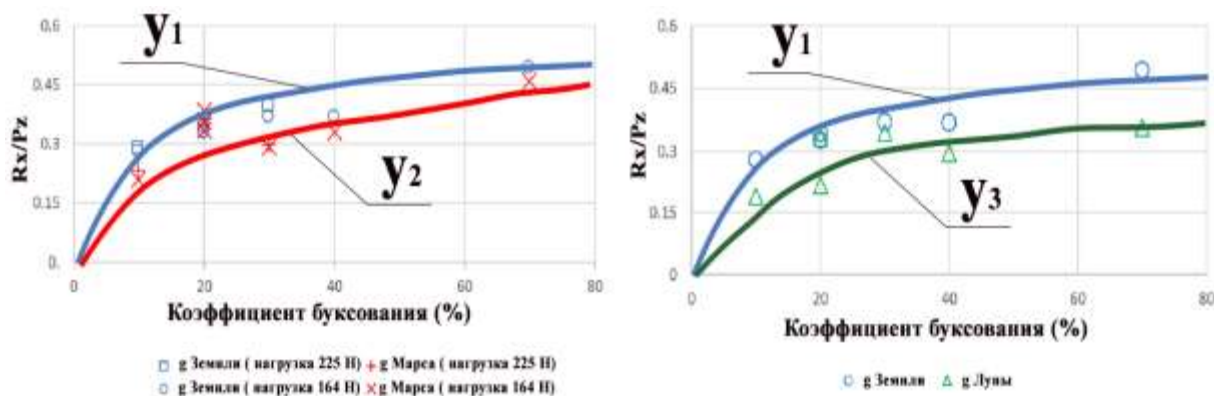


Рис. 1. Влияние гравитационных условий на функциональную зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования

- y_1 – аппроксимированная функциональная зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования в условиях гравитации Земли;
- y_2 – аппроксимированная функциональная зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования при имитации гравитации Марса;
- y_3 – аппроксимированная функциональная зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования при имитации гравитации Луны

Также, согласно результатам экспериментальных исследований работы [2], с уменьшением гравитационного воздействия увеличивается скорость движения грунта в контакте с колёсным движителем (рис. 2). Данный эффект свидетельствует об уменьшении несущей способности слабосвязанного грунта с уменьшением ускорения свободного падения.

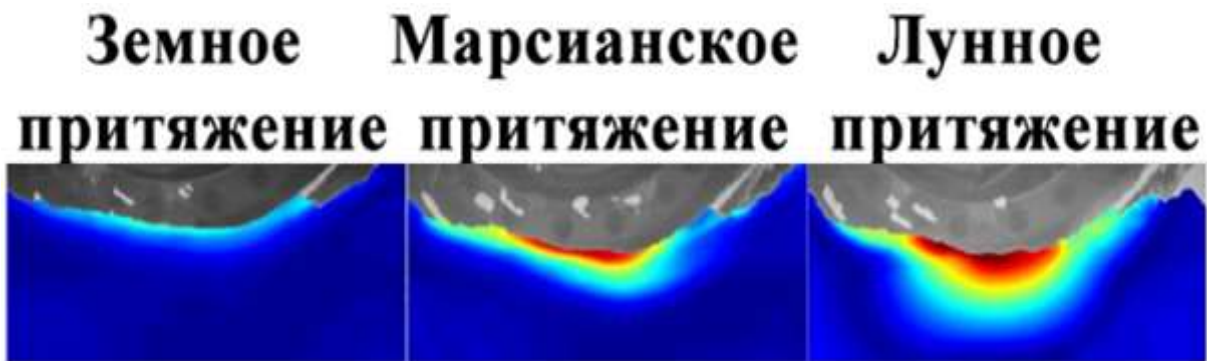


Рис. 2. Визуализация величины скорости движения грунта при имитации различных гравитационных условий на борту самолёта-лаборатории

Исходя из результатов, приведённых на рис. 1 и 2, можно сделать вывод, что уменьшение угла наклона функциональной зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования при пониженной гравитации вызвано увеличением скорости движения грунта в контакте с колёсным движителем, которое в свою очередь ведёт к росту коэффициента буксования.

В таком случае, повысить подвижность и проходимость шасси планетохода при движении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации возможно, применив комплекс мер, включающих в себя обоснованный выбор конструктивных параметров грунтозацепов колёсных движителей, которые будут уменьшать скорость движения грунта в контакте с колесом, а также управление распределением подводимой мощности к колёсным движителям планетохода.

Методика выбора конструктивных параметров грунтозацепов колёсных движителей планетоходов

В соответствии с анализом, приведенном в работах [4] и [5], наибольшее влияние на сцепление жестких металлических колёсных движителей, которыми оснащаются планетоходы, с опорной поверхностью оказывают угловой шаг и высота грунтозацепов. Поэтому в данной работе уделяется внимание только подбору данных конструктивных параметров для колёсных движителей планетохода.

В рамках исследования в работе [4] установлено, что с увеличением высоты и углового шага грунтозацепов колёсных движителей возрастает продольная реакция опорной поверхности и снижается скорость движения грунта в контакте с колёсным движителем (рис. 3 и 4).

В соответствии с выводами работы [4], максимальный эффект от грунтозацепов в части снижения скорости движения грунта в контакте с колёсным движителем и повышения сцепления с опорной поверхностью наблюдается, когда контакт грунтозацепа с опорной поверхностью при

вращении колёсного движителя происходит быстрее, чем качение обода по грунту. В соответствии с данным выводом можно сформировать функциональную зависимость (1):

$$\theta_1 < \frac{1}{(1-s)} \left(\sqrt{\left(1 + \hat{h}_r\right)^2 - \left(1 - \hat{z}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(1 - \hat{z}\right)^2} \right), \quad (1)$$

где θ_1 – угловой шаг грунтозацепов, град; s – величина коэффициента буксования; $\hat{h}_r$ – отношение высоты грунтозацепа к радиусу колёсного движителя; $\hat{z}$ – отношение величины осадки в грунт к радиусу колёсного движителя.

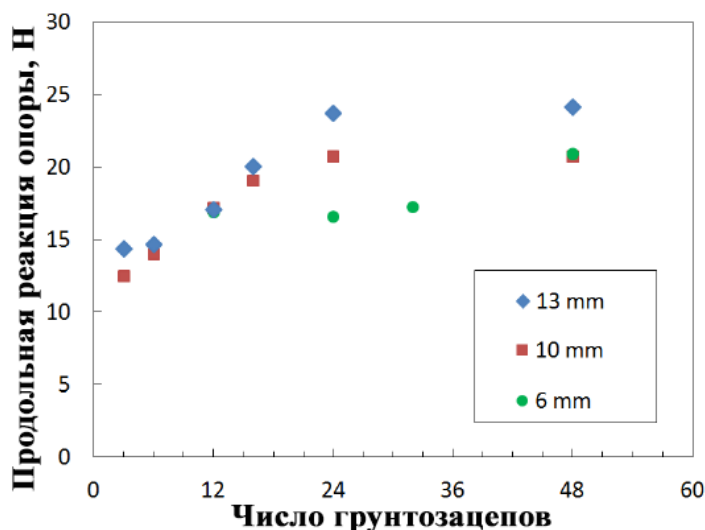
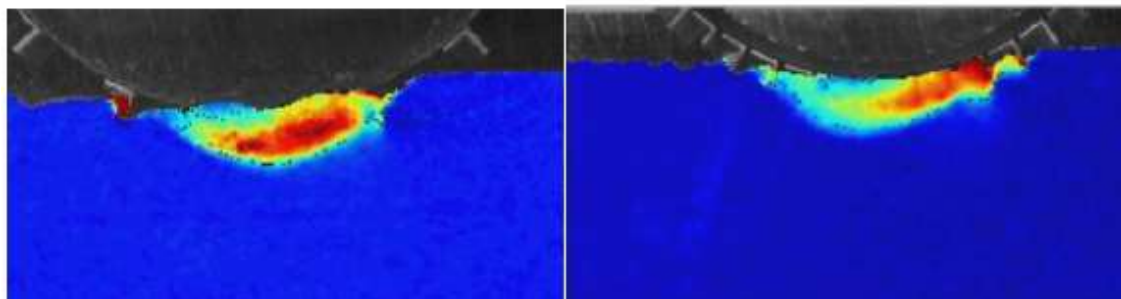


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований зависимости продольной реакции опоры от числа и высоты грунтозацепов



а) – колесо с 16 грунтозацепами; б) – колесо с 48 грунтозацепами

Рис. 4. Визуализация величины скорости движения грунта (синий цвет соответствует скорости 0, а красный – максимальной скорости) при движении колес с различным количеством грунтозацепов по слабосвязанному грунту

Стоит отметить, что наличие грунтозацепов в конструкции колёсного движителя может привести к снижению линейной скорости движения колеса. На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований влияния углового шага грунтозацепов на линейную скорость перемещения колеса по слабосвязанному грунту [5].

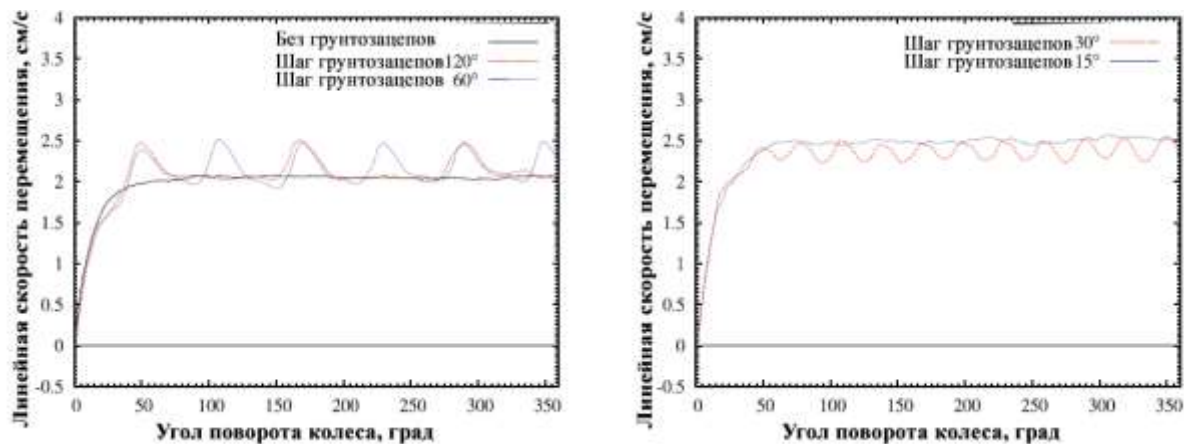


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований влияния шага грунтозацепов на линейную скорость перемещения колеса

На рисунке 5 видно, что с уменьшением углового шага грунтозацепов уменьшается амплитуда изменения линейной скорости движения колесного движителя. В соответствии с выводами работы [5], свести к минимуму влияние грунтозацепов на линейную скорость движения колеса можно, если выбирать угловой шаг грунтозацепов в соответствии с выражением (2):

$$\theta_2 \leq 0,5 \arccos \left(\frac{r_k - z}{r_k + h_r} \right), \quad (2)$$

где θ_2 – угловой шаг грунтозацепов, град;

r_k – радиус колёсного движителя, м;

z – осадка колёсного движителя в грунт, м; h_r – высота грунтозацепа, м.

Для шасси планетоходов используются колёсные движители с одинаковыми конструктивными параметрами. Из этого следует, что для соблюдения унификации конструкции колёсных движителей с учётом выражений (1) и (2) необходимо, чтобы величина их осадки в грунт была

одинаковой. Этого можно достичь в том случае, если распределение нагрузок между колёсными движителями будет примерно одинаковым [6]. Для транспортных средств данное условие можно описать коэффициентом неравномерности распределения нагрузок между осями шасси [7]. Для планетоходов, как и для наземных транспортных средств, в качестве граничного значения коэффициента неравномерности распределения нагрузок между осями шасси можно принять значение 1,5, как представлено в выражении (3):

$$k_n = \frac{P_{z \max}}{P_{z \min}} \leq 1,5, \quad (3)$$

где k_n – коэффициент неравномерности распределения нагрузок между осями; $P_{z \max}$ – максимальная нормальная нагрузка на ось, Н;
 $P_{z \min}$ – минимальная нормальная нагрузка на ось, Н.

Таким образом, при соблюдении условия в соответствии с выражением (3) результирующий шаг и высоту грунтозацепов с использованием выражений (1) и (2) предлагается выбирать согласно следующего алгоритма:

- 1) θ_1 должен быть меньше θ_2 , а результирующий шаг грунтозацепов $\theta_{рез}$ должен иметь промежуточное значение между этими величинами;
- 2) $\theta_{рез}$ должен делить окружность на целое число грунтозацепов, а если число грунтозацепов получилось дробным, то данное значение округляется в большую сторону и производится пересчет $\theta_{рез}$;
- 3) для обеспечения равномерности нагрузки на колёсный движитель число грунтозацепов должно быть четным, если на 2 шаге получилось нечетное число грунтозацепов, то к нему прибавляется 1 и пересчитывается $\theta_{рез}$.

Управление распределением подводимой мощности к колёсным движителям планетохода

Классический для наземных транспортных средств подход к управлению распределения подводимой мощности к колёсным движителям шасси подразумевает, что если одно из колёс вращается быстрее остальных, то его скорость вращения принудительно уменьшается. В таком случае целевая функция оптимизации режимов работы колёсных движителей принимает вид выражения (4) [8], [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(f_{Nf}) = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(\varphi_i + f_i) R_{zi} r_k] \omega_i - \sum_{i=1}^n \varphi_i R_{zi} v_{\Pi}}{G v_{\Pi} \cos \alpha} \right), \\ \sum_{i=1}^n P_{xi} = G \sin \alpha, \end{array} \right. \quad (4)$$

где f_{Nf} – коэффициент удельных мощностных потерь i -го колёсного движителя; φ_i – коэффициент сцепления с опорной поверхностью i -го колёсного движителя; f_i – коэффициент сопротивления качению i -го колёсного движителя; R_{zi} – нормальная реакция опорной поверхности, создаваемая i -м колёсным движителем, Н; ω_i – угловая скорость вращения i -го колёсного движителя, рад/с; v_{Π} – скорость движения центра масс планетохода, м/с; r_k – радиус колёсного движителя, м; n – число колёсных движителей шасси планетохода; G – вес планетохода, Н; α – угол наклона опорной поверхности, град; P_{xi} – продольное усилие, создаваемое i -м колёсным движителем, Н.

Однако для планетоходов, движущихся по слабосвязанному грунту необходимо учитывать эффект кинематической несогласованности между колёсными движителями. Данный эффект возникает в том случае, когда осадка колёсных движителей в грунт отлична между собой ввиду потери

несущей способности грунта в контакте с колёсным движителем [10]. Для предотвращения критического буксования колёсных движителей шасси планетохода, которое повлечёт за собой потерю проходимости, при использовании модели (4) необходимо производить оценку коэффициентов сцепления и сопротивления качению в реальном времени.

Для исключения из алгоритма регулирования подводимой мощности к колёсным движителям шасси планетохода измерений коэффициентов сцепления и сопротивления качению колёсного движителя, в работе [10] предлагается использовать алгоритмы, основанные на скорости вращения колёсных движителей и коэффициента буксования.

В данной работе предлагается модель (5), которая устанавливает зависимость скорости вращения колёсного движителя планетохода от требуемой скорости движения планетохода, коэффициента буксования и угла контакта колёсного движителя с опорной поверхностью.

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{v_{\Pi}}{r_k (1 - S_1) \cos \gamma_i}, & 0 \leq s_i < s_{np1}, \\ \frac{v_{\Pi}}{r_k (1 - S_2) \cos \gamma_i}, & s_{np1} \leq s_i < s_{np2}, \\ \dots & \dots \\ \frac{v_{\Pi}}{r_k (1 - S_j) \cos \gamma_i}, & s_i \geq s_{npj}, \end{cases} \quad \forall_i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где S_j – константа для определения функциональной зависимости ω_i при регулировании; s_{npj} – пороговое значение для перехода между функциями, определяющими параметры регулирования; γ_i – угол контакта с опорной поверхностью i -го колёсного движителя, град; n – число колёсных движителей.

Стоит выделить что в модели (5) предложено использовать константы для диапазонов коэффициентов буксования, что позволит компенсировать

неточность определения коэффициентов буксования в реальном времени. Также стоит отметить, что для эффективности предложенного подхода не требуется высокой степени дискретизации значений коэффициента буксования и будет достаточным выделение 3-4 подмножества.

На основе выражения (5) становится возможным сформировать ПИД-регулятор, представленный системой (6). Данный ПИД-регулятор будет определяться закон управления распределением подводимой мощности к колёсным движителям планетохода.

$$\omega_i(t) = \begin{cases} K_{p1}(v_{\Pi} - v_{i1}' \cos \gamma) + K_{i1} \int_0^t (v_{\Pi} - v_{i1}' \cos \gamma) dt + K_{d1} \frac{d(v_{\Pi} - v_{i1}' \cos \gamma)}{dt}, \\ v_{i1}' = \omega_i' r_k (1 - s_1), \\ K_{p2}(v_{\Pi} - v_{i2}' \cos \gamma) + K_{i2} \int_0^t (v_{\Pi} - v_{i2}' \cos \gamma) dt + K_{d2} \frac{d(v_{\Pi} - v_{i2}' \cos \gamma)}{dt}, \\ v_{i2}' = \omega_i' r_k (1 - s_2), \\ \dots \\ K_{pj}(v_{\Pi} - v_{ij}' \cos \gamma) + K_{ij} \int_0^t (v_{\Pi} - v_{ij}' \cos \gamma) dt + K_{dj} \frac{d(v_{\Pi} - v_{ij}' \cos \gamma)}{dt}, \\ v_{ij}' = \omega_i' r_k (1 - s_j), \end{cases} \quad (6)$$

где K_{pj} – пропорциональный коэффициент на заданном диапазоне изменения коэффициента буксования; K_{ij} – интегральный коэффициент на заданном диапазоне изменения коэффициента буксования; K_{dj} – дифференциальный коэффициент при учёте роста коэффициента буксования; v_{ij}' – расчётное значение скорости движения i -го колёсного движителя в момент времени $t-1$ на заданном диапазоне изменения коэффициента буксования, м/с; ω_i' – угловая скорость вращения i -го колёсного движителя в момент времени $t-1$ на заданном диапазоне изменения коэффициента буксования, рад/с.

Выводы

Результаты анализа опыта эксплуатации планетоходов на поверхности Марса и экспериментальных исследований динамики взаимодействия колёсного движителя с грунтом при имитации пониженной гравитации демонстрируют, что снижение гравитационного воздействия ведёт к снижению несущей способности слабосвязанного грунта в контакте с колёсным движителем. Данный эффект снижает подвижность и проходимость шасси планетохода по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации.

Предложенный в данной работе научно-методический аппарат позволяет сформировать требования к конструктивным параметрам грунтозацепов колёсных движителей планетоходов, учитывая их влияние на сцепление колеса со слабосвязанным грунтом и линейную скорость перемещения колеса, а также определить закон управления распределением подводимой мощности к колёсным движителям планетохода.

Сформированные результаты позволяют значительно повысить подвижность и проходимость шасси планетохода по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации.

Список источников

1. Анализ подвижности марсоходов для разработки систем передвижения и алгоритмов управления планетоходами нового поколения / М. И. Маленков, В. А. Волон, Н. К. Гусева, Е. А. Лазарев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 82-95. – EDN TNACPZ.
2. Niksirat, P. Characterizing the effects of reduced gravity on rover wheel-soil interactions using computer vision techniques / P. Niksirat, K. Skonieczny, A.A.F. Nassiraei // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Quebec, Canada, May 20-24, 2019. – P. 4739-4745. – DOI 10.1109/ICRA.2019.8793895.
3. Быков, А. И. Результаты сравнительного анализа влияния способов имитации пониженной гравитации на динамику взаимодействия колесного движителя с

грунтом / А. И. Быков // Двойные технологии. – 2022. – № 3(100). – С. 49-53. – EDN DHMKAA.

4. Skonieczny, Krzysztof. A Grouser Spacing Equation for Determining Appropriate Geometry of Planetary Rover Wheels / Krzysztof Skonieczny, Scott J. Moreland, David S. Wettergreen // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2012. – P. 5065-5070. – DOI 10.1109/IROS.2012.6386203.

5. Design of wheels with grousers for planetary rovers traveling over loose soil / Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida // Journal of Terramechanics. – 2013. – Vol. 50. – P. 345-353. – DOI 10.1016/j.jterra.2013.05.002.

6. Быков, А. И. Результаты анализа тяговой динамики и устойчивости движения планетохода для определения граничных конструктивных параметров специальных колесных шасси / А. И. Быков, А. В. Артемьев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 64-72. – DOI 10.31776/RTCJ.10107. – EDN XYNBQY.

7. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.

8. Котиев, Г. О. Закон распределения мощности по колесам для транспортного робототехнического комплекса / Г. О. Котиев, В. А. Горелов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3(104). – С. 124-127. – EDN LMCOSH.

9. Энергоэффективное распределение подводимой мощности к колесам планетохода при прямолинейном движении с ограничением свободной тяги движителя / Х. Чжэн, Г. О. Котиев, Б. Б. Косицын, Р. Л. Газизуллин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 4(139). – С. 113-123. – DOI 10.46960/1816-210X_2022_4_113. – EDN KKYGHJ..

10. Gonzalez, Ramon. Improving rover mobility through traction control: simulating rovers on the Moon / Ramon Gonzalez, Dimi Apostolopoulos, Karl Iagnemma // Autonomous Robots. – 2019. – Vol. 43. – P. 1977-1988. – DOI 10.1007/s10514-019-09846-3.

References

1. Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki*, 2015, no. 1(162), Pp. 82-95.
2. Niksirat P., Skonieczny K., Nassiraei A.A.F. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Quebec, Canada, 2019, pp. 4739-4745.
3. Bykov A.I. *Dvoynnye tekhnologii*, 2022, no. 3 (100), pp. 50-54.
4. Skonieczny Krzysztof, Moreland Scott J., Wettergreen David S. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 5065-5070.
5. Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida. *Journal of Terramechanics*, 2013, vol. 50, pp. 345-353.

6. Bykov A.I., Artem'ev A.V. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2022, vol.10, no. 1, pp. 64-72.
7. Agejkin YA.S. *Prohodimost' avtomobilej (Vehicle traffic)*, Moscow, Mashinostroenie, 1981, 232 p.
8. Kotiev G.O., Gorelov V.A. *Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2010, vol. 3, no. 104, pp. 124-127.
9. CHzhen Huajyuj, Kotiev G.O., Kosicyn B.B., Gazizullin R.L. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2022, no. 4 (139), pp. 113-123.
10. Ramon Gonzalez, Dimi Apostolopoulos, Karl Iagnemma. *Autonomous Robots*, 2019, vol. 43, pp. 1977-1988.

Рецензент: А.М. Иванов, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторе

Быков Артем Иванович, инженер-конструктор-схемотехник 1 категории,
филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге.

Information about the author

Bykov Artyom I., design-circuit engineer Affiliate of Lavochkin Association.

Статья поступила в редакцию 24.09.2024; одобрена после рецензирования 30.09.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 24.09.2024; approved after reviewing 30.09.2024; accepted for publication 24.12.2024.