

Научная статья
УДК 629.785

Научно-методологический подход к исследованию динамики взаимодействия колесного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации

Артём Иванович Быков

Филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге, г. Калуга, Россия,

bykovartem1994@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрен научно-методологический подход к решению задачи исследования динамики взаимодействия колесного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации, которое обеспечивает полноту и достоверность результатов экспериментальных исследований ходовых характеристик при пониженной гравитации. Предложена математическая модель зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя планетохода при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации, которая основана на результатах анализа эксплуатации планетоходов на поверхности Марса, результатов экспериментальных исследований взаимодействия колеса со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации различными способами и моделей взаимодействия колёсных движителей с опорной поверхностью, используемых для наземных транспортных средств. Представлена конструкция стендового оборудования для исследования взаимодействия колёсных движителей со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации путём обезвешивания и масштабного моделирования. Приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия колёсного движителя со слабосвязанным грунтом, которые были получены в филиале АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге. Предложен подход имитации пониженной гравитации при экспериментальных исследованиях взаимодействия колёсного движителя со слабосвязанным грунтом, который обеспечивает полноту и достоверность результатов экспериментальных исследований.

Ключевые слова: планетоход, марсоход, луноход, имитация пониженной гравитации, взаимодействие колеса планетохода с грунтом, масштабное моделирование, наземная экспериментальная отработка планетохода.

Для цитирования: Быков А.И. Научно-методологический подход к исследованию динамики взаимодействия колесного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. №4 (42).

Original article

Scientific and methodological approach to the study of the dynamics of interaction between a planetary rover's wheeled propulsion system and loosely-bound soil under simulated reduced gravity conditions

Bykov Artyom I.

Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, Russia,

bykovartem1994@yandex.ru

Abstract. The article discusses a scientific and methodological approach to solving the problem of studying the dynamics of interaction of a planetary rover's wheeled propulsion system with weakly bound soil when simulating reduced gravity, which ensures the completeness and reliability of the results of experimental studies of driving characteristics under reduced gravity. A mathematical model is proposed for the dependence of the adhesion coefficient on the slip coefficient of a planetary rover's wheeled propulsion system when moving on loosely-bound soil under reduced gravity conditions, based on the results of analysis of planetary rover operation on the surface of Mars, the results of experimental studies of wheel interaction with loosely-bound soil under various methods of reduced gravity simulation, and models of wheeled propulsion system interaction with the supporting surface used for ground vehicles. The design of bench equipment for studying the interaction of wheeled propulsion systems with loosely-bound soil under reduced gravity simulation by weightlessness and scale modeling is presented. The results of experimental studies of wheeled propulsion system interaction with loosely-bound soil, obtained at the Affiliate of Lavochkin Association in Kaluga, are presented. An approach to simulating reduced gravity in experimental studies of wheeled propulsion system interaction with loosely-bound soil is proposed, which ensures the completeness and reliability of experimental research results.

Keywords: planetary rover, mars rover, lunar rover, reduced gravity simulation, planetary rover wheel-soil interaction, scale modeling, ground-based experimental testing of planetary rover.

For citation: Bykov A.I. Scientific and methodological approach to the study of the dynamics of interaction between a planetary rover's wheeled propulsion system and loosely-bound soil under simulated reduced gravity conditions. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. №4 (42).

Введение

Текущие и перспективные научно-исследовательские миссии с использованием планетоходов направлены на изучение поверхности Луны и Марса [1]. Поверхность данных космических объектов Солнечной системы в основном покрыта слабосвязанным грунтом – реголитом [2].

В рамках наземной экспериментальной отработки проводятся испытания движения макетов шасси планетоходов по слабосвязанному грунту. Имитация пониженной гравитации для данных макетов обеспечивается путём обезвешивания [3].

Однако опыт программы НАСА Mars Exploration Rover (MER) по изучению поверхности Марса с использованием планетоходов показал, что имитация пониженной гравитации с использованием обезвешивания не обеспечивает достоверности экспериментальных исследований взаимодействия колёсного движителя со слабосвязанным грунтом в условиях пониженной гравитации. Наземная экспериментальная отработка планетоходов MER показала высокие значения проходимости и подвижности шасси при движении по слабосвязанному грунту, но при эксплуатации планетоходов MER на Марсе при движении по слабосвязанному грунту колёсные движители стали буксовать сильнее, чем при наземной экспериментальной отработке, и проходимость шасси снизилась. Также стоит отметить, что при попадании на поверхности Марса планетоходов MER в песчаные ловушки, на Земле моделировались данные нештатные ситуации на специальных полигонах с использованием обезвешанных макетов шасси. Итогом данного подхода являлось то, что обезвешанные макеты на Земле выбирались из песчаных ловушек намного легче по сравнению с планетоходами MER на Марсе [4, 5].

Целью данной работы является разработка научно-методологического подхода исследований динамики взаимодействия колёсного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом с применением имитации условий

пониженной гравитации, которая обеспечивает полноту и достоверность результатов экспериментальных исследований.

Модель взаимодействия колёсного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом в условиях пониженной гравитации

Исходя из результатов программы НАСА MER на Марсе следует, что динамика взаимодействия колёсных движителей планетохода со слабосвязанным грунтом изменяется в условиях пониженной гравитации и данных изменений в земных гравитационных условиях нельзя достичь путём обезвешивания. Для анализа данного эффекта необходимо рассмотреть работу [4], в которой представлены результаты экспериментальных исследований Канадского космического агентства, в рамках которых оценивались тягово-сцепные свойства колёсного движителя при взаимодействии со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации. Важным является то, что имитация пониженной гравитации проводилась на борту самолёта, движущегося по параболической траектории. Преимуществом данного подхода является то, что в процессе эксперимента имитировалась пониженная гравитация не только для колёсного движителя, но и для грунта, а это в свою очередь более достоверно имитирует гравитационные условия на космическом объекте по сравнению с обезвешиванием на поверхности Земли. К недостатку данного подхода относится то, что время имитации пониженной гравитации составляет всего 30 с, поэтому в рамках эксперимента величина коэффициента буксования задавалась искусственно.

На основе результатов экспериментальных исследований в работе [4] были сформированы функциональные зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования для гравитационных условий Земли, Луны и Марса (рис. 1), которые можно описать функциональной зависимостью (1):

$$\varphi(s) = \varphi_{\max} \left(1 - e^{-\frac{s}{s_0}} \right), \quad (1)$$

где $\varphi(s)$ – значения коэффициента сцепления в зависимости от коэффициента буксования колёсного движителя; $\varphi_{\max}$ – максимальное значение коэффициента сцепления колёсного движителя; s – коэффициент буксования колёсного движителя; s_0' – эмпирический коэффициент, который определяется на основе экспериментальных результатов.

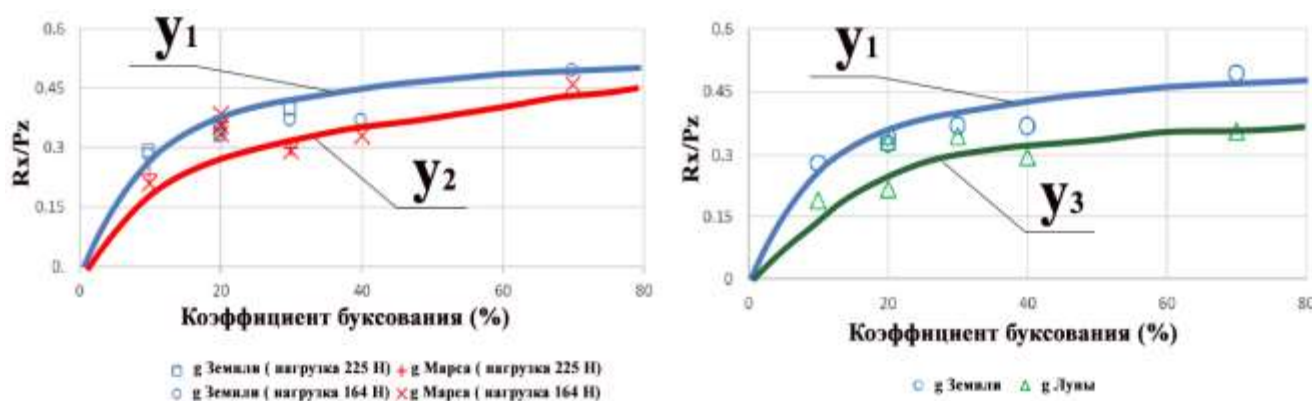


Рис. 1. Влияние гравитационных условий на функциональную зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования

- 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;

На рисунке 1 показано, что со снижением гравитационного воздействия происходит смещение данной функциональной зависимости вниз вдоль оси ординат относительно функциональной зависимости для земных гравитационных условий. Это свидетельствует о снижении эффективности передачи тягового усилия колёсными движителями планетохода при снижении гравитационного воздействия. Количественная оценка смещения функциональных зависимостей, представленных на рис. 1, в работе [4] даётся исходя из оценки среднего уменьшения продольной реакции опоры относительно земных гравитационных условий согласно выражения (2):

$$\overline{\Delta R_x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{R_{xPi}}{R_{x3i}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\overline{\Delta R_x}$ – среднее уменьшение продольной реакции опоры относительно земных гравитационных условий; R_{xzi} – продольная реакция опорной поверхности в земных гравитационных условиях для i -го эксперимента, Н; $R_{x\pi i}$ – продольная реакция опорной поверхности в условиях пониженной гравитации для i -го эксперимента, Н; n – число экспериментов с фиксированными значениями коэффициента буксования.

Результаты работы [4] показывают, что среднее снижение продольной реакции опоры при гравитационных условиях Марса составляет 8%, а для гравитационных условий Луны 20%.

Также, согласно результатам экспериментальных исследований работы [4], 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.

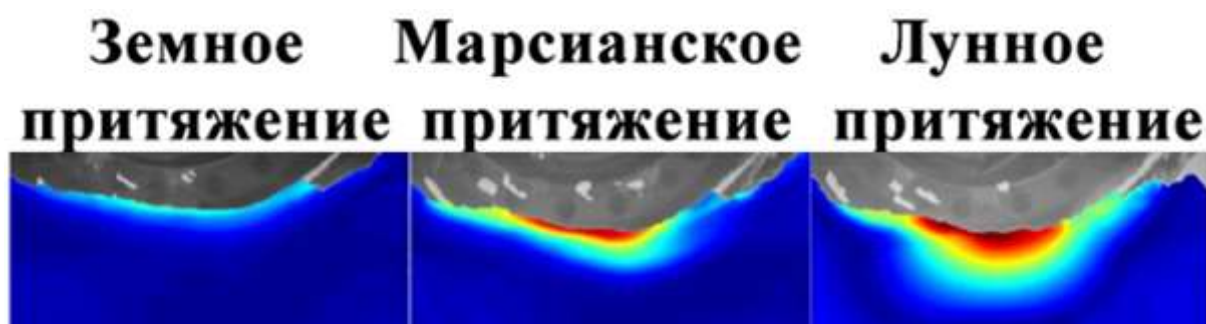


Рис. 2. Визуализация величины скорости движения грунта при имитации различных гравитационных условий на борту самолёта-лаборатории

Стоит отметить, что эффекты снижения коэффициента сцепления и роста скорости движения грунта в контакте с колёсным движителем наблюдаются и в земных гравитационных условиях.

Согласно результатам экспериментальных исследований Японского аэрокосмического агентства [6] с увеличением силы тяги и скорости движения колёсного движителя по слабосвязанному грунту возрастает скорость движения грунта в контакте с колесом (рис.3).



Рис. 3. Визуализация величины скорости движения грунта (интенсивность зеленых линий визуализирует относительную скорость движения грунта) при движении колеса с различным тяговым усилием и скоростью по слабосвязанному грунту

Также, согласно источника [7] с ростом скорости движения транспортного средства линейно уменьшается величина коэффициента сцепления с опорной поверхностью согласно выражению (3):

$$\varphi(v) = \varphi_{\max} (1 - Av), \quad (3)$$

где $\varphi(v)$ – значение коэффициента сцепления в зависимости от скорости движения транспортного средства; v – скорость движения транспортного средства, м/с; A – эмпирический коэффициент, зависящий от конструктивных параметров колёсного движителя и параметров опорной поверхности, с/м.

Исходя из того, что эффекты снижения коэффициента сцепления и роста скорости движения грунта в контакте с колёсным движителем схожи при снижении ускорения свободного падения и при росте скорости движения колеса в земных гравитационных условиях, становится возможным принять гипотезу, где эмпирический коэффициент A зависит от ускорения свободного падения. Поэтому в данной работе предлагается математическая модель (4), основанная на моделях (1) и (3), которая определяет функциональную зависимость коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации:

$$\varphi(s) = \varphi_{\max} (1 - Av) \left(1 - e^{-\frac{s}{s_0}} \right). \quad (4)$$

Стендовое оборудование и подходы к проведению экспериментальных исследований зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя при имитации пониженной гравитации

Для оценки влияния пониженной гравитации на значения эмпирических коэффициентов s_0' и A в выражении (4) в филиале АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге были проведены инициативные экспериментальные исследования зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях имитации пониженной гравитации.

Для проведения экспериментальных исследований было разработано и изготовлено специальное стендовое оборудование, представленное на рис. 4.

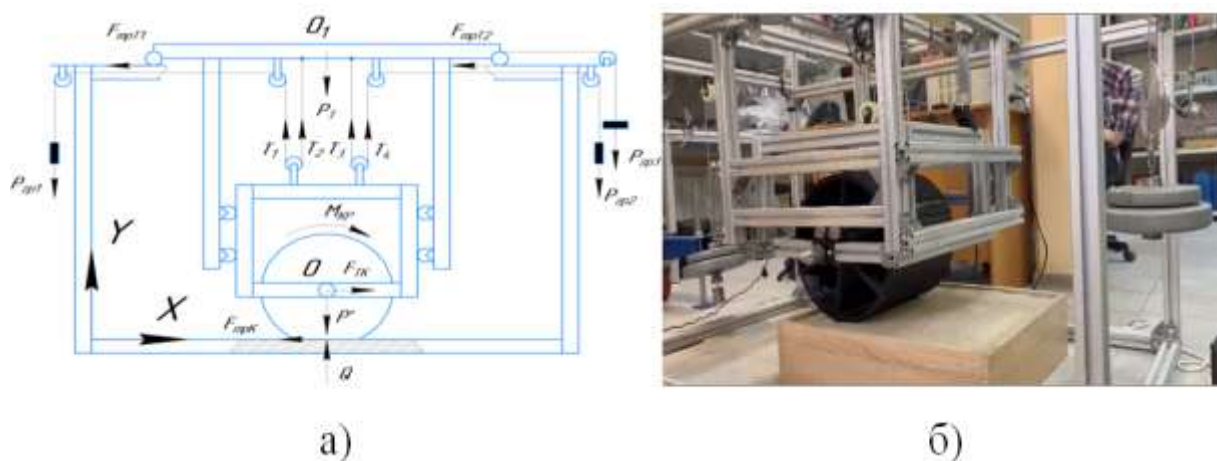


Рис. 4. Специальное стендовое оборудование для экспериментальных исследований зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях имитации пониженной гравитации

а) схема специального стендового оборудования;
б) конструкция специального стендового оборудования

Конструкция специального стендового оборудования включает в себя три каркаса: неподвижный каркас, каркас продольного перемещения и каркас вертикального перемещения. К каркасу вертикального перемещения крепится колесо и электропривод. Колесо под действием крутящего момента от электропривода движется по слабосвязанному грунту. За счёт того, что

каркас вертикального перемещения свободно движется вдоль направляющих каркаса продольного перемещения, обеспечивается степень свободы колеса в вертикальном направлении. Каркас продольного перемещения движется по направляющим неподвижного каркаса, за счёт этого обеспечивается степень свободы колеса в продольном направлении. Для компенсации силы трения при движении каркаса продольного перемещения по неподвижному каркасу используется груз с блоком. Для компенсации веса каркаса вертикального перемещения и имитации пониженной гравитации путём обезвешивания используются комбинированные блоки с грузами.

При движении колеса фиксируются значения скорости вращения колеса и скорость линейного перемещения колеса. Также определяется значение тягового усилия колеса. Исходя из того, что колесо движется равномерно, принимается допущение, что продольная реакция опоры по модулю равна тяговому усилию.

В рамках исследований сначала проводились эксперименты в земных гравитационных условиях под собственным весом колеса. В рамках эксперимента рассматривались три режима скорости движения колеса: $16 \cdot 10^{-3}$ м/с, $22 \cdot 10^{-3}$ м/с и $27 \cdot 10^{-3}$ м/с. Эксперименты проводились на пяти различных слабосвязанных грунтах со значениями насыпной плотности от 1400 кг/м^3 до 1600 кг/м^3 . Те же эксперименты проводились при имитации пониженной гравитации величиной $0,75g$ и $0,5g$ (где g – ускорение свободного падения на Земле).

При планировании эксперимента рассматривались следующие подходы к имитации пониженной гравитации: обезвешивание и масштабное моделирование.

Имитация пониженной гравитации путём обезвешивания заключается в создании дополнительного усилия, направленного вертикально вверх и компенсирующего вес тела в земных гравитационных условиях.

Имитация пониженной гравитации путём масштабного моделирования основано на π -теореме и заключается в изменении параметров масштабной физической модели [3], определяющих взаимодействия колеса с грунтом. Коэффициенты масштаба, определяющие параметры физических масштабных моделей при имитации пониженной гравитации, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов масштаба при имитации пониженной гравитации

№	Наименование параметра	Имитируемые гравитационные условия	
		0,75 g	0,5 g
1	Коэффициент линейного размера	0,75	0,5
2	Коэффициент массы	$(0,75)^3$	$(0,5)^3$
3	Коэффициент силы	$(0,75)^2$	$(0,5)^2$
4	Коэффициент скорости	1	1
5	Коэффициент давления	1	1
6	Коэффициент плотности	1	1
7	Коэффициент угловой скорости	4/3	2

Также в рамках экспериментального исследования была выдвинута гипотеза о том, что среднее уменьшение продольной реакции опоры при снижении ускорения свободного падения в основном зависит от гравитационных условий и для колёсных движителей с различными конструктивными параметрами будет одинаковым. Поэтому на основании результатов экспериментальных исследований работы [4] была сформирована функциональная зависимость среднего уменьшения продольной реакции опоры от величины ускорения свободного падения, которая была аппроксимирована выражением (5):

$$\begin{aligned} \overline{\Delta R_x} &= k \cdot e^{g \cdot a} + b, \\ k &= 40,3982, \\ a &= -0,4126, \\ b &= -0,7056. \end{aligned} \tag{5}$$

На рисунке 5 представлена функциональная зависимость (5) и определены ожидаемые значения среднее уменьшение продольной реакции опоры при имитации гравитационных условий 0,75g и 0,5g.

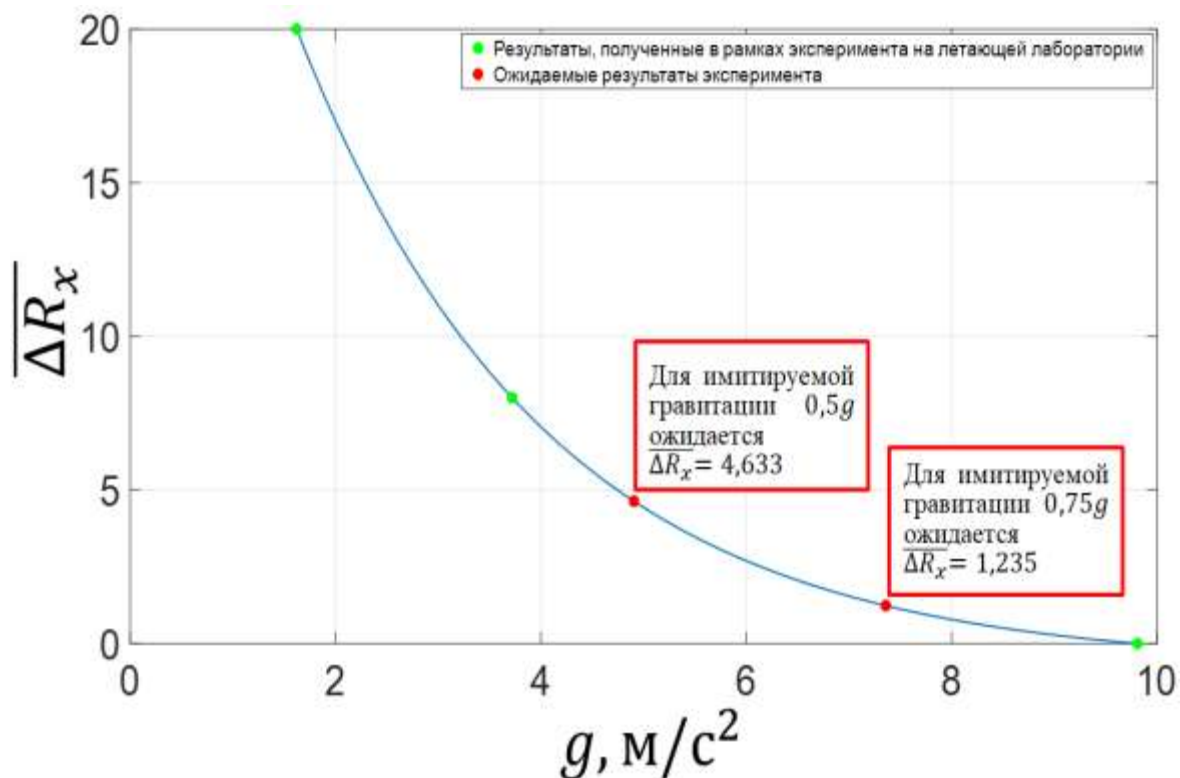


Рис. 5. Зависимость среднего уменьшения продольной реакции опоры при имитации пониженной гравитации

Анализ результатов экспериментальных исследований взаимодействия колёсного движителя со слабосвязанным грунтом в условиях имитации пониженной гравитации

Первая серия экспериментальных исследований проводилась на слабосвязанном грунте с насыпной плотностью 1600 кг/м³. Результаты экспериментальных исследований в земных гравитационных условиях и при имитации пониженной гравитации различными способами, представлены на рис. 6.

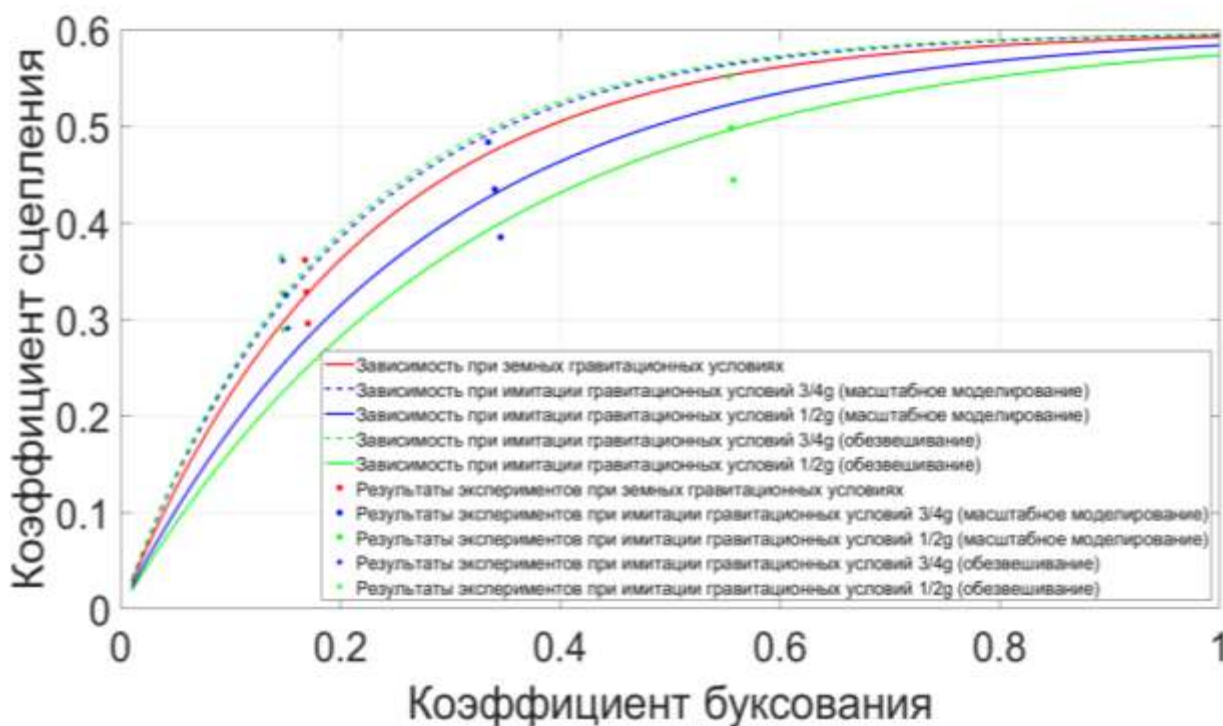


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований

Как показано на рис. 6, при имитации пониженной гравитации путём обезвешивания, коэффициент буксования уменьшается, а коэффициент сцепления возрастает с уменьшением имитируемого гравитационного воздействия. Это свидетельствует о том, что эффективность передачи тягового усилия колёсным двигателем возрастает. Данные результаты противоречат результатам экспериментальных исследований на борту летающей лаборатории и свидетельствуют о том, что обезвешивание не обеспечивает достоверности результатов экспериментальных исследований взаимодействия колёсного двигателя со слабосвязанным грунтом при имитации пониженной гравитации. Однако полученные результаты с использованием обезвешивания объясняют причину, по которой обезвешанные макеты шасси планетоходов MER на Земле выбирались из песчаных ловушек намного легче по сравнению с планетоходами MER на Марсе.

Рассматривая результаты на рис. 6, полученные при имитации пониженной гравитации путём масштабного моделирования, можно увидеть,

что со снижением гравитационного воздействия возрастает коэффициент буксования. Данный эффект соответствует результатам эксплуатации планетоходов MER на Марсе. Так как в рамках экспериментов коэффициент буксования не задавался, а был получен естественным образом, среднее уменьшение продольной реакции опоры было рассчитано исходя из аппроксимированных функций зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования при имитации различных гравитационных условий путём масштабного моделирования. Результаты расчётов показывают, что при имитации гравитационных условий $0,75g$ среднее уменьшение продольной реакции опоры составило 7%, а при имитации гравитационных условий $0,5g$ среднее уменьшение продольной реакции опоры составило 13%. Данные значения намного больше расчётных и дальнейший анализ позволил установить причину несоответствия: коэффициент масштаба давления при данном подходе равняется 1, иными словами при имитации пониженной гравитации масштабная модель колёсного движителя создавала давление на грунт, соответствующее земным гравитационным условиям. Для решения данной проблемы была выдвинута гипотеза: совмещение масштабного моделирования и обезвешивания позволит добиться среднего уменьшения продольной реакции опоры, соответствующего рис.5. Результаты экспериментальных исследований с применением комбинации масштабного моделирования и обезвешивания приведены на рис. 7.

Действительно при данном подходе результаты расчётов показывают, что при имитации гравитационных условий $0,75g$ среднее уменьшение продольной реакции опоры составило 1,86%, а при имитации гравитационных условий $0,5g$ среднее уменьшение продольной реакции опоры составило 5,83%. Исходя из того, что данные результаты близки к расчётным значениям, была сформирована модель (6), которая позволяет

дать оценку влияния гравитационных условий на эмпирические коэффициенты выражения (4).

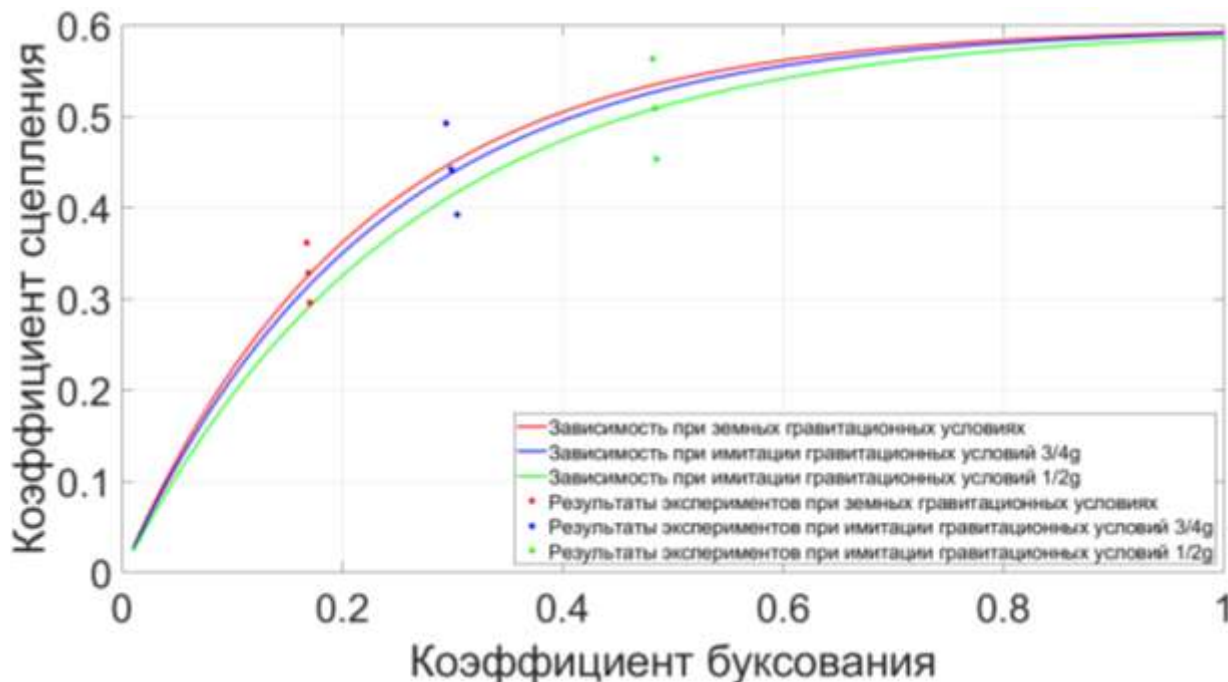


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований с применением комбинации масштабного моделирования и обезвешивания

$$\varphi(s) = \varphi_{\max} \left(1 - \frac{A_3}{\sqrt{k_g}} v \right) \left(1 - e^{-\frac{s \sqrt{k_g}}{s_{03}'}} \right), \quad (6)$$

где A_3 , s_{03}' – эмпирические коэффициенты, соответствующие земным гравитационным условиям; k_g – коэффициент масштаба гравитации равный отношению ускорения свободного падения на космическом объекте к ускорению свободного падения на Земле.

Экспериментальные исследования на остальных грунтах были проведены с применением комбинированного подхода масштабного моделирования и обезвешивания. Результаты данных экспериментальных исследований представлены на рис. 8 и рис. 9.

Анализ результатов на грунте с насыпной плотностью 1500 кг/м³ демонстрирует, что среднее уменьшение продольной реакции опоры при имитации пониженной гравитации 0,75g и 0,5g соответственно составило

1,54% и 5,2%, а при экспериментальных исследованиях на грунте 1500 кг/м^3 среднее уменьшение продольной реакции опоры при имитации пониженной гравитации $0,75g$ и $0,5g$ соответственно составило 1,81% и 5,2%.

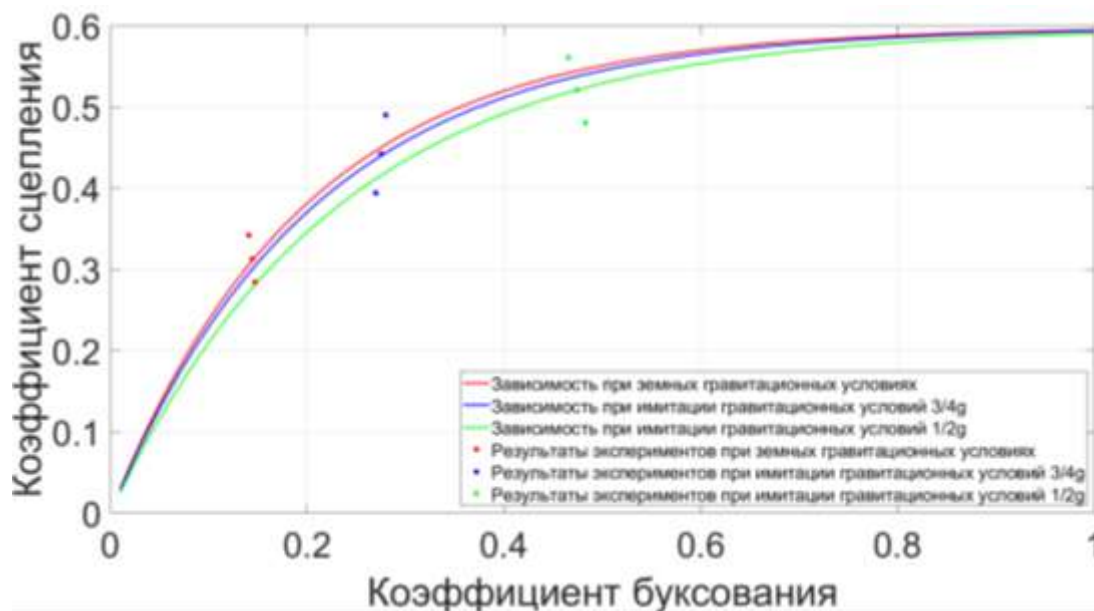


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований на грунте с насыпной плотностью 1500 кг/м^3

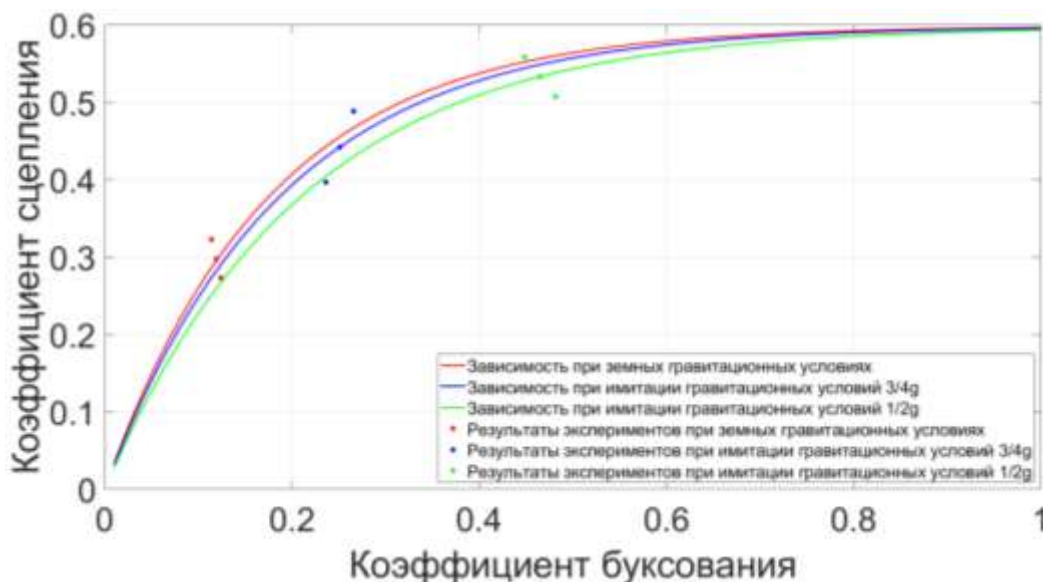


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований на грунте с насыпной плотностью 1400 кг/м^3

Выводы

Результаты анализа работ [4] и [5] демонстрируют, что снижение гравитационного воздействия изменяет форму кривой функциональной зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования при

перемещении колесного движителя по слабосвязанному грунту. Также снижение гравитационного воздействия увеличивает скорость движения грунта в контакте с колесом. Данные изменения свидетельствуют о снижении эффективности передачи тягового усилия колёсным движителем.

На основании того, что наблюдаемые процессы при взаимодействии колеса с грунтом схожи при снижении гравитационного воздействия и при увеличении скорости движения и тягового усилия колеса, была предложена модель зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя при перемещении по слабосвязанному грунту в условиях пониженной гравитации.

Результаты экспериментальных исследований, проведённых в филиале АО «НПО Лавочкина» в г. Калуге, рассмотренные в данной работе, позволили сформировать подход к экспериментальным исследованиям взаимодействия колёсного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом в условиях пониженной гравитации, который даёт схожие показатели среднего уменьшения продольной реакции опоры с результатами, полученными в эксперименте на борту летающей лаборатории, а также демонстрирует рост коэффициента буксования при снижении гравитационного воздействия, что соответствует результатам эксплуатации планетоходов MER на Марсе. Кроме того, предложенный подход не ограничен во времени имитации пониженной гравитации в отличие от подхода имитации пониженной гравитации на борту самолёта. Следовательно, предложенный подход повышает полноту и достоверность наземной экспериментальной отработки взаимодействия колёсного движителя планетохода со слабосвязанным грунтом в условиях имитации пониженной гравитации.

Также на основании результатов экспериментальных исследований была дана оценка влияния условий пониженной гравитации на эмпирические коэффициенты модели зависимости коэффициента сцепления от коэффициента буксования колёсного движителя планетохода при

перемещении по слабосвязанному грунту. Данная оценка может быть использована в рамках моделирования движения планетохода на ранних этапах проектирования.

Список источников

1. Хамуков, Ю. Х. Высокоподвижный планетоход для исследования планет солнечной системы / Ю. Х. Хамуков, Ю. И. Попов, Л. Б. Кокова // Наука и инновации - современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 14 декабря 2023 года. – Москва: ООО "Инфинити", 2023. – С. 92-102.
2. Проблемы тестирования робототехнических систем для перемещения по космическим объектам / П. П. Ананьев, А. В. Плотникова, А. С. Тимофеев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 180-185. – DOI 10.31776/RTCJ.9303. – EDN XWOWVU.
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 DHMКАА.
4. 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.
5. John L. Callas Mars Exploration Rover Spirit End of Mission Report / John L. – California Institute of Technology. U.S. Government sponsorship acknowledged, 2015. – 29 p.
6. Hirotooshi, Nakamura. Soil flow analysis for grouser wheels based on a particle image velocimetry method / Hirotooshi Nakamura, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida // Journal of Terramechanics. – 2020. – Vol. 91(2). – P. 233-241. – DOI 10.1016/j.jterra.2020.07.001.

References

1. Khamukov, Yu. Kh., Popov Yu. I., Kokova L. B. Nauka i innovatsii – sovremennyye kontseptsii, Sbornik statey po itogam raboty Mezhdunarodnogo, Moscow, ООО "Infiniti", 2023, pp. 92-102.
2. Ananyev P.P., Plotnikova A.V., Timofeev A.S. [et al.] Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 180-185.
3. Bykov A.I. Dvoynnye tekhnologii, 2022, no. 3 (100), pp. 50-54.

4. Niksirat P., Skonieczny K., Nassiraei A.A.F. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Quebec, Canada, 2019, pp. 4739-4745.
5. John L. Callas Mars Exploration Rover Spirit End of Mission Report, California Institute of Technology. U.S. Government sponsorship acknowledged, 2015, 29 p.
6. Hirotohi Nakamura, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida, *Journal of Terramechanics*, 2020, vol. 91(2), pp. 233-241.

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 02.12.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

The article was submitted 02.12.2024; approved after reviewing 12.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.