

УДК 629.369+629.3.032

DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-54-66

## Анализ конструкций упругих колес для перспективных российских луноходов с точки зрения оценки проходимости

В.Н. Наумов<sup>1</sup>, **О.Е. Козлов<sup>2</sup>**, К.Ю. Машков<sup>1</sup>, К.Е. Бяков<sup>1</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1<sup>2</sup> ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 117997, Москва, Российская Федерация, Профсоюзная ул., 84/32

## An Analysis of the Design of Elastic Wheels for Prospective Russian Lunar Rovers from the Viewpoint of Cross-Country Capability

V.N. Naumov<sup>1</sup>, **O.E. Kozlov<sup>2</sup>**, K.Y. Mashkov<sup>1</sup>, K.E. Byakov<sup>1</sup><sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1<sup>2</sup> Federal State Budgetary Scientific Institution: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN), 117997, Moscow, Russian Federation, Profsoyuznaya St., Bldg. 84/32

e-mail: makon111@rambler.ru, konst.byakov@yandex.ru



Рассмотрены возможности применения упругих колес в планетоходах. Созданная авторами МГТУ им. Н.Э. Баумана достаточно полная математическая модель взаимодействия упругого колеса с грунтами в различных режимах движения позволяет с высокой степенью точности прогнозировать поведение планетохода при прямолинейном и криволинейном перемещениях на основе тяговых характеристик одиночного колеса. Проведены работы как теоретические, так и экспериментальные на стенде, где протестированы более 50 прототипов движителей планетоходов. Эластичные колеса характеризуются радиальной, боковой и крутильной жесткостями. Наиболее оптимальной является конструкция, у которой только в радиальном направлении наблюдается податливость, а в других — максимальная жесткость. Представлено большое количество колес, созданных для отработки луноходов и марсоходов и их практической реализации. Разработаны критерии оценки для сравнения геометрической и опорной проходимости, качественно отражающие поведение колес на грунте. Предложенные критерии позволяют определить возможные типы колес для перспективных конструкций отечественных планетоходов.

**Ключевые слова:** взаимодействие движителя с грунтами, металлические шины, опорная проходимость, упругие колеса, критерии оценки



In this article, the possibilities of using elastic wheels in planetary rovers are considered. A rather comprehensive mathematical model of the interaction of an elastic wheel with the soil in different driving modes was created at the Bauman Moscow State Technical University. The model allowed the authors to predict, with a high degree of accuracy, the behavior of the planetary rover when moving rectilinearly and curvilinearly based on the traction characteristics of a single wheel. Theoretical research was carried out and experimental tests were performed on a stand where more than 50 prototypes of the planetary rover chassis were tested. Elastic wheels are characterized by radial, lateral and torsional rigidities. Optimally, the wheel should have only radial compliance, while in the other directions it should

have the maximum rigidity. The article presents a large number of wheels to be used for the development of lunar and mars rovers and for the practical implementation. The evaluation criteria that qualitatively reflect the behavior of the wheels on the soil are developed for comparing the geometric and the flotation cross-country capability. The proposed criteria make it possible to select potential types of wheels for the prospective Russian planetary rovers.

**Keywords:** chassis-soil interaction, metal tires, flotation ability, elastic wheels, evaluation criteria

Отечественный и зарубежный опыт создания планетоходов позволяет утверждать, что в перспективных аппаратах, предназначенных для передвижения по грунтам Луны и других планет, целесообразно использовать упругие колеса.

Цель работы — обзор и анализ данного типа движителя и разработка критериев оценки для сравнения геометрической и опорной проходимости, качественно отражающих поведение колес на грунте.

**Упругие колеса.** При проектировании луноходов проводились большие научные изыскания [1, 2]. В первую очередь были изучены патенты начала XX века, когда появилось много схем металлоэластичных колес (рис. 1), так как бурно развивающаяся автомобильная промышленность того времени требовала эластичных колес, а каучука не хватало.

В НАСА при создании лунохода LRV проводились сравнительные испытания эластичных колес трех типов (рис. 2), разработанных компаниями Boeing–General Motors, Grumman и Bendix [3].

**Колесо компаний Boeing–General Motors** (Пат. 3568748 США, 1971; рис. 2, а) [4, 5] в качестве основного упругого элемента имело метал-лосетчатую шину. Сетка сплетена из стальных

проволок диаметром 0,8 мм, покрытых цинком. На беговой поверхности шины расположены титановые полосы, установленные «елочкой» под углом  $90^\circ$  друг к другу и занимающие более 50 % опорной поверхности. Их назначение — защита проволочной сетки от истирания. Кроме того, в какой-то мере они играют роль грунтозацепов, улучшающих тяговые возможности колеса. Для ограничения прогиба сетки внутри колеса установлен упругий каркас. Доработанное колесо после испытаний использовали в конструкции LRV. Его ресурс составил 120 км пробега.

**Колесо компании Grumman** (Пат. 3698461 США, 1972; рис. 2, б) [6], разработанное Э.Дж. Марковым, в качестве упругой поверхности имело конус. Упругие оболочки склонны к потере устойчивости и не отличаются компактностью. Видимо, это и стало причиной того, что на сегодняшний день известно только одно такое колесо.

**Колесо компании Bendix** (рис. 2, в) [7–9] оснащено беговой дорожкой, выполненной из упругой металлической ленты, которая связана с диском металлическими упругими кольцами, установленными в шахматном порядке. При испытаниях колесо показало лучшие результаты по сопротивлению качению, коэффициенту свободной силы тяги, воздействию на грунт и преодолению единичных препятствий (см. рис. 2, в, справа): препятствия, соизмеримые с прогибом колеса, не оказывали существенного воздействия на его движение. К недостаткам такой конструкции относится незащищенность упругих колец от расклинивания грунтом в местах их крепления к ободу. При испытаниях наблюдался отрыв колец от обода вследствие накопления в зоне их соединения грунта, относительно которого и происходило расклинивание и отрыв колец.

**Колесо с продольными упругими элементами большого радиуса** (рис. 3, а) [10] разработано Э.Дж. Марковым для лунохода с гермокабиной, обеспечивающей длительное пребывание кос-

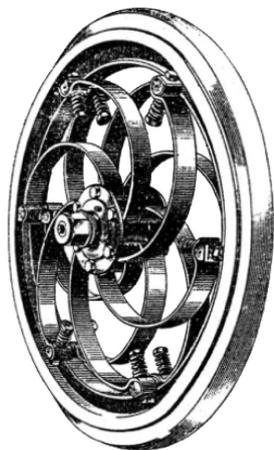


Рис. 1. Колесо с внутренней амортизацией (1915 г.)

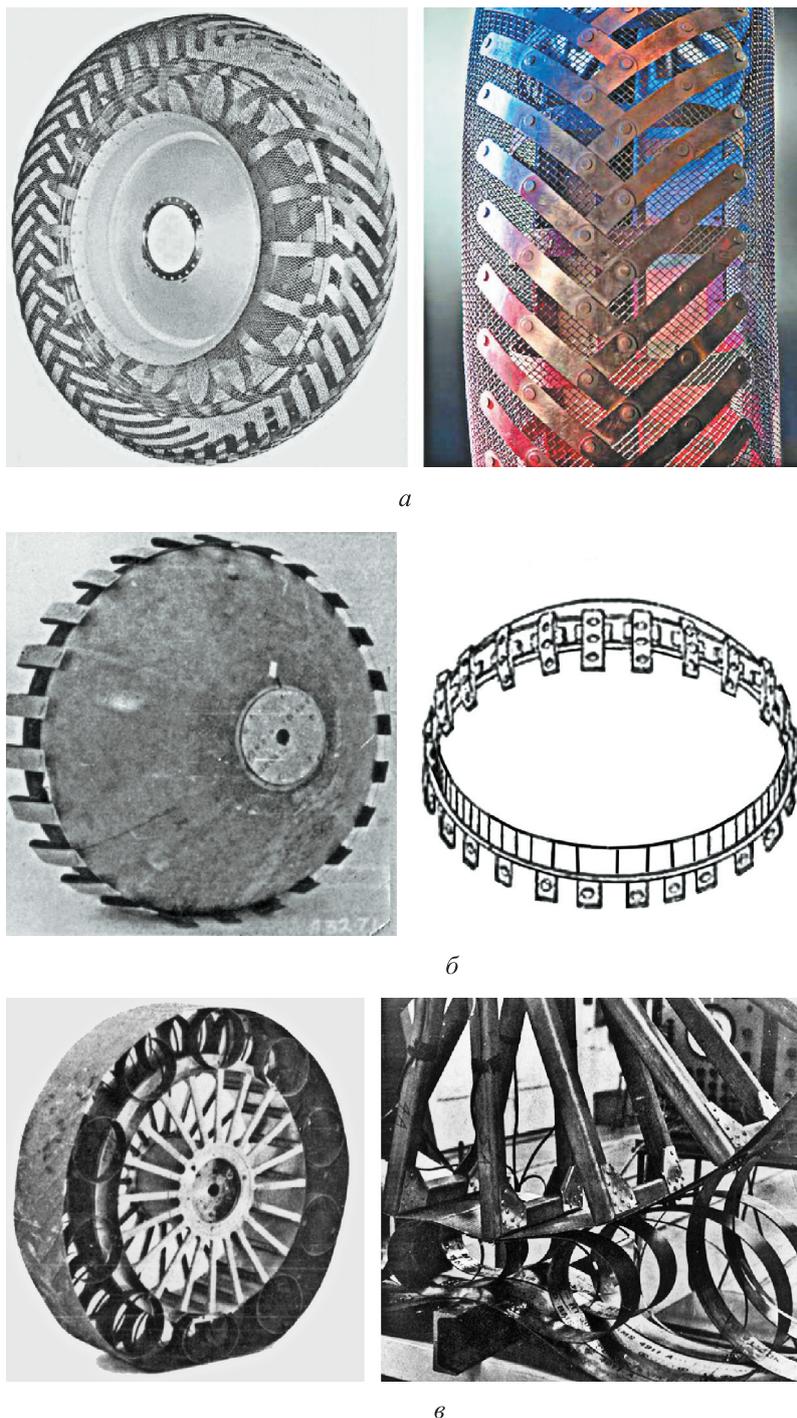


Рис. 2. Колеса для лунохода LRV, разработанные компаниями Boeing–General Motors (а), Grumman (б) и Bendix (в)

монавтов на Луне. Колесо — цилиндрическое, открытого типа, с упругими элементами шириной, равной ширине колеса. Все упругие элементы закручены в одном направлении, следовательно, колесо имеет несимметричную крутильную жесткость, зависящую от знака приложенного момента. Недостаток колеса — возможность расклинивания упругих элементов

грунтом в местах крепления к ободу. Такая конструкция, обладающая малой радиальной и большой боковой жесткостями, послужила прототипом для создания целого семейства колес, в которых разработчики пытались добиться высокой и симметричной крутильной жесткости.

**Колесо макета лунохода Tri-Star IV** (рис. 3, б) [11–13], созданное Токийским технологическим



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Колеса с продольными упругими элементами большого радиуса:

*a* — лунохода с гермокабиной; *б* — макета лунохода Tri-Star IV; *в* — разработки ОАО «ВНИИтрансмаш»

институтом и космическим агентством JAXA (Япония), представляет собой модернизированную модель колеса Маркова. Упругие спицы установлены по касательным к ступице и ободу в три ряда навстречу друг другу. Изготовлен-

ный из полимера обод является податливым элементом, не объединяющим упругие элементы в единое целое. На нем расположены относительно высокие грунтозацепы. По воздействию на грунт такая схема будет работать отдельными грунтозацепами, а обод между ними может продавливаться, что вызовет рост глубины колеи и сопротивления качению. Высокие грунтозацепы, создающие дополнительное сопротивление движению, при буксовании приведут к большому экскавационному эффекту и резкому увеличению глубины колеи, а следовательно, и коэффициента сопротивления качению.

**Колесо разработки ОАО «ВНИИтрансмаш»** (рис. 3, *в*) повторяет конструкцию колеса Маркова (см. рис. 3, *a*) с некоторым отличием: вместо обода использованы две проволоки, к которым прикреплены грунтозацепы, а к части грунтозацепов присоединены упругие элементы. Колесо опирается на грунт упругими элементами после их деформации в зоне контакта с грунтом. В такой конструкции устранен недостаток прототипа колеса — расклинивание упругих элементов грунтом в местах крепления к ободу, но осталась нерешенной проблема несимметричности крутильной жесткости.

**Колесо марсохода «Пастер»** (рис. 4), разработанное в рамках проекта EхоMars [14–17], имеет несколько рядов кольцевых пружин, расположенных в его плоскости и деформированных так, что в трех точках они прикреплены к ступице и в трех — к ободу. Для ограничения прогиба колеса на ступице сделаны жесткие ребра. Колесо — открытое с отношением ширины к диаметру более 0,4, что ограничивает свободное перетекание грунта сквозь него. При



Рис. 4. Колесо марсохода «Пастер»

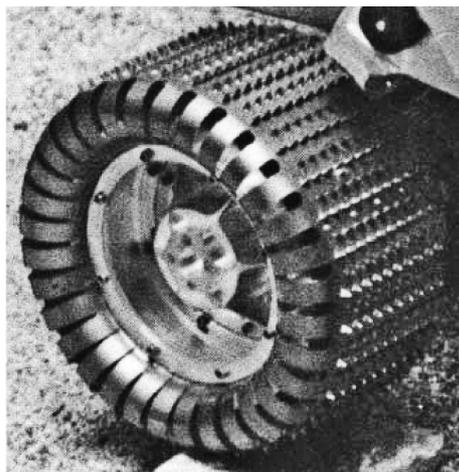


Рис. 5. Эластичное колесо макета микромарсохода Rocky-4

этом ограничители прогиба также оказывают негативное влияние на освобождение колеса от грунта. Другим недостатком такой конструкции является возможность расклинивания упругих элементов грунтом в зоне присоединения к ободу.

**Эластичное колесо макета микромарсохода Rocky-4** (рис. 5), созданного для отработки навигации и управления движением марсохода Sojourner, имеет вид металлической шины, края которой образуют арочные пружины, закрепленные на ступице колеса. Арочные пружины расположены очень часто, что препятствует освобождению колеса от песка и камней.

**Упругое колесо макета лунного автомобиля «Селена»**, разработанное в МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 6), предназначено для отработки поведения эластичных колес на грунте. Колесо — открытое. Упругие элементы образованы арочными пружинами. Обод колеса сплетен узкими металлическими полосами, причем в обод вплетены и арочные пружины. Плетеный обод обеспечивает хорошее сцепление с грунтом, а арочные пружины — высокую крутильную и малые радиальную и боковую жесткости. Однако переплетение упругих элементов и обода создает при деформации большие гистерезисные потери в колесе.

В 70-е годы XX века специалисты ОАО «ВНИИТрансмаш» разработали несколько металлоэластичных колес для разных макетов с целью развития шасси «Лунохода-1» [18–20].

**Колесо с внутренней амортизацией** (А.с. 416265 СССР, 1974; рис. 7, а) оснащено жесткими ободьями, связанными со ступицей арочными пружинами. Поверх ободьев и пружин

натянута сетчатая оболочка. Крепление ободьев, пружин и сетчатой оболочки обеспечивают грунтозацепы. При перемещении по грунту колесо ведет себя как жесткое, а при наезде на препятствие — как эластичное. Недостатками такой конструкции являются возможность проникновения грунта внутрь колеса и трудность выхода из него грунта.

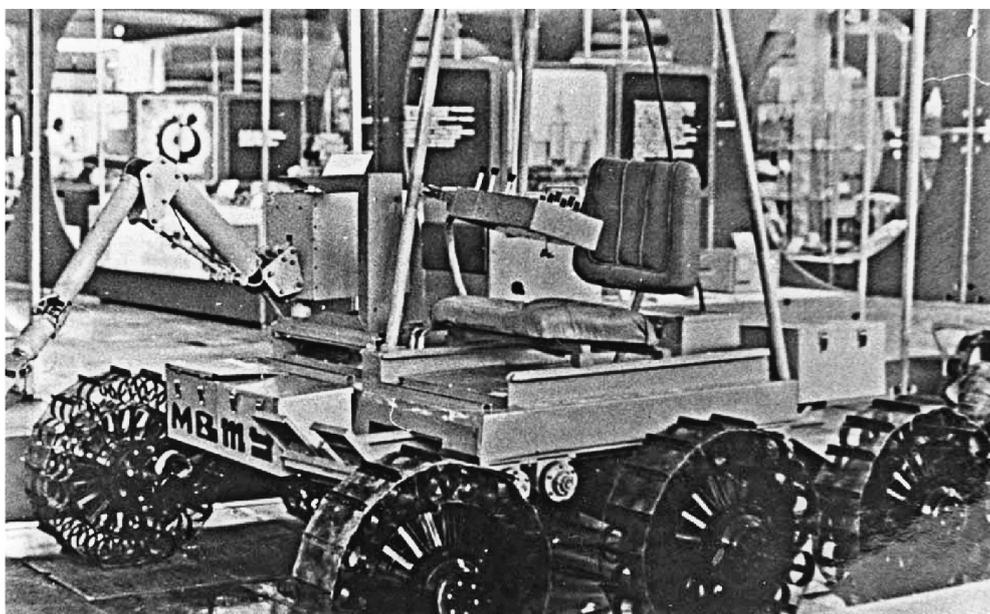
**Металлосетчатое колесо** (А.с. 806472 СССР, 1981; рис. 7, б) имеет внутренний упругий каркас, поверх которого натянута сетчатая оболочка, прикрепленная к нему грунтозацепами. Упругий каркас собран из арочных пружин и продольных лент. Сетка предохраняет колесо от попадания в него крупных фракций грунта, а мелкие могут проникнуть сквозь сетку и увеличить сопротивление передвижению. Из рис. 7, б видно, что в таком колесе не выдержаны прочностные свойства арочных пружин и продольных лент, в результате чего на нем появились продавленные места.

**Упругое «двухскатное колесо»** (А.с. 416265 СССР, 1974; рис. 7, в) создано по такому же принципу. Однако его устройство несколько сложнее: сетчатая шина напоминает в поперечном сечении двухскатную автомобильную шину. В центральной части профиля установлен жесткий обод с грунтозацепами, который связывает упругий каркас и сетку, обеспечивая «круглость» колеса. Одну часть нагрузки при качении воспринимает упругий каркас, а другую — сетка. Согласно теоретическому предположению, подтвержденному испытаниями, «двухскатные» колеса при движении поперек склона уменьшают боковое сползание на сыпучих грунтах, что объясняется увеличением ширины шины при деформации упругого каркаса и сетки. Деформация колеса приведет к потерям при контакте и трении сетчатой оболочки по упругому каркасу.

**Колесо с изменяемой геометрией**, сплетенное из тонкой проволоки (А.с. 935320 СССР, 1982; рис. 7, г), примечательно тем, что его авторы попытались решить проблему регулирования жесткости колеса, которая чрезвычайно актуальна для металлоэластичных колес. Регулирование осуществлялось путем изменения расстояния между двумя подвижными элементами обода, к которым крепились сетка: для повышения жесткости колеса (например, при перемещении по жесткому грунту) расстояние уменьшалось (при этом также возрастал дорожный просвет), а для снижения жесткости



а



б

Рис. 6. Упругое колесо (а) макета лунного автомобиля «Селена» (б) разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана

(при передвижении по песчаным и слабосвязным грунтам) — увеличивалось.

**Колесо с арочными и кольцевыми пружинами** (рис. 7, д) обладает высокими крутильной и боковой и малой радиальной жесткостями. При создании колеса учтены недостатки предыдущих конструкций: упругие кольца крепятся к беговой дорожке через проставки, что исключает расклинивание этих соединений грунтом.

Все сетчатые колеса имеют один общий недостаток — большое внутреннее сопротивление при деформации сетки. Затраты на преодоление такого трения составляют до 50 % общих затрат на перемещение.

**Сегментно-шагающее колесо** (А.с. 906728 СССР, 1989; рис. 8, а) состоит из сегментных грунтозацепов сложной формы, связанных между собой с двух сторон тросами. Упругими элементами являются пружины переменного сечения, изогнутые в плоскости колеса и прикрепленные с помощью шарнира к грунтозацепам. При перемещении колеса грунтозацепы будут занимать на грунте положение с наименьшим деформированием упругих элементов, создавая эффект шагания. Недостатком конструкции является сложность движения колеса через препятствия: грунтозацепы вместо «зацепления» за камень будут с него «сворачиваться», поскольку при деформации трос уже

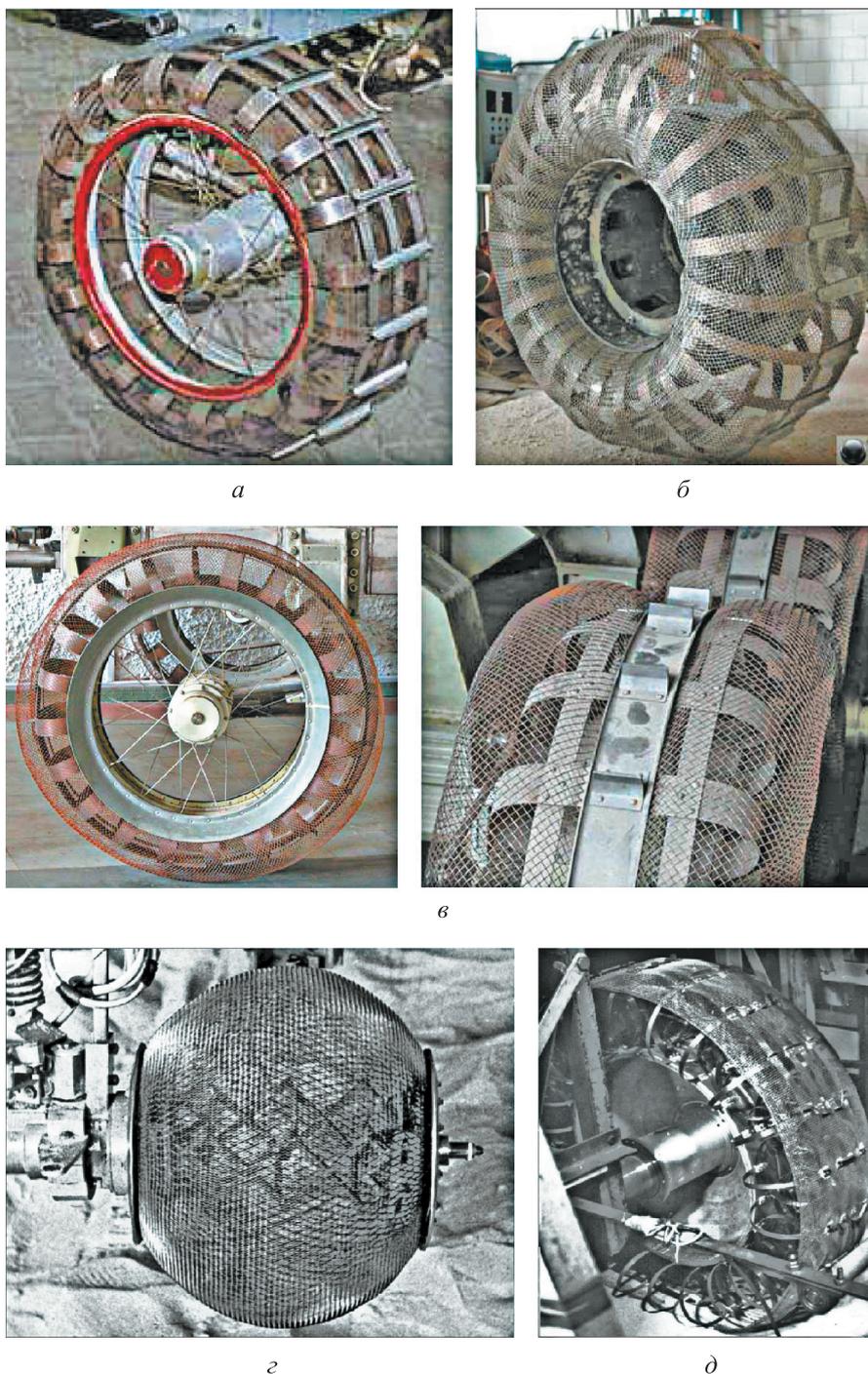


Рис. 7. Металлосетчатые колеса:

*a* — с внутренней амортизацией; *б* — с внутренним упругим каркасом; *в* — упругое «двухскатное»; *г* — с изменяемой геометрией; *д* — с арочными и кольцевыми пружинами

не держат грунтозацепы, а шарнир позволяет им искать положение с наименьшим энергетическим напряжением. Кроме того, шарнир увеличивает потери энергии на трение в самом колесе. Недостатком также является тросовая связь грунтозацепов, так как если трос лопнет или перетрется о камни, то колесо потеряет работоспособность.

**Металлоэластичное колесо** (Пат. 2059467 РФ, 1996), показанное на рис. 8, б, стало попыткой улучшения колес компании Bendix (см. рис. 2, в), Edward G. Markow (см. рис. 3, а) и металлосетчатого колеса (см. рис. 7, б). Основная цель модернизации заключалась в упрощении конструкции колеса, уменьшении внутренних потерь и зависимости от попадания грунта

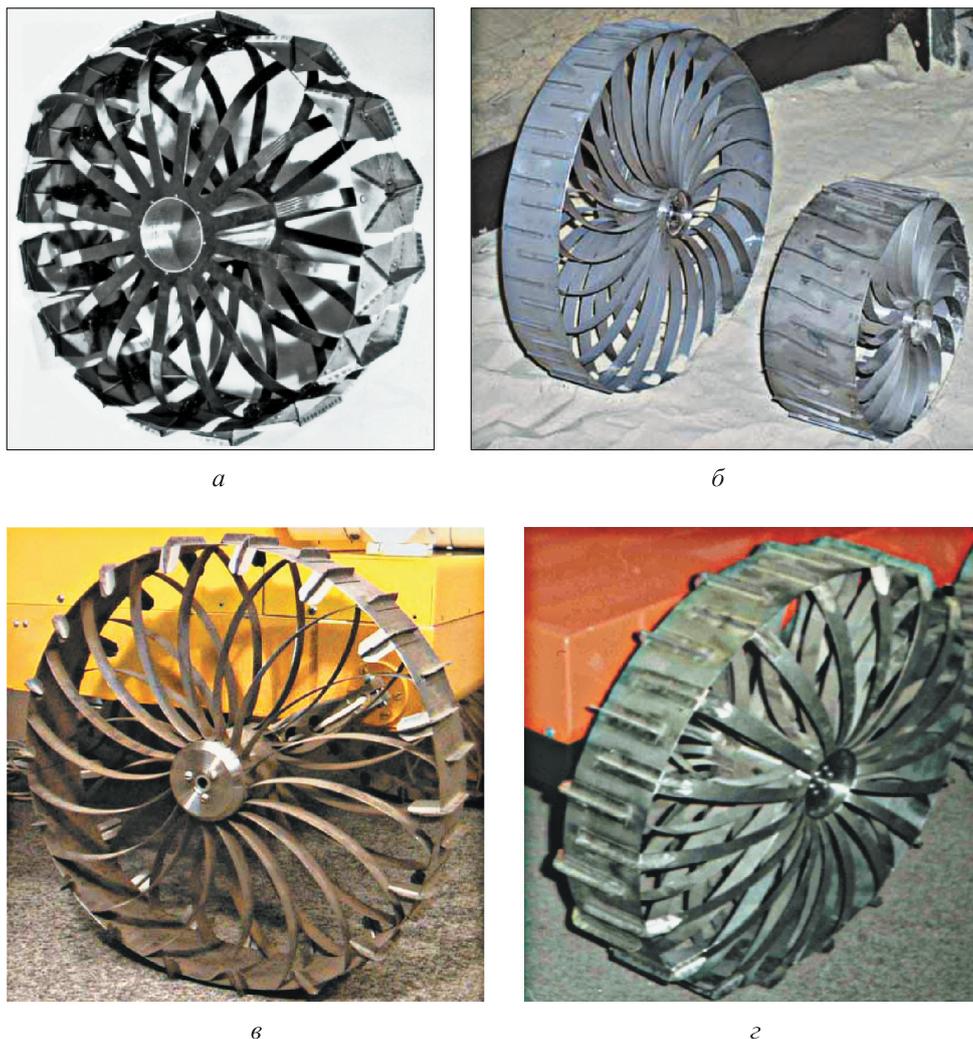


Рис. 8. Металлоэластичные колеса:

*a* — сегментно-шагающее; *б* — с минимальными гистерезисными потерями; *в* — с увеличенной относительной шириной; *г* — с повышенной крутильной жесткостью

внутри обода, улучшении тяговых свойств, снижении давления на грунт и динамических нагрузок на транспортное средство.

Цель была достигнута созданием сварного колеса (с минимальными гистерезисными потерями — потери энергии на деформацию колеса не превышали 5 %) с плоскими упругими элементами, изгибающимися в плоскости колеса в виде элементов окружности и образующими в месте контакта с ободом и ступицей угол не менее  $45^\circ$ , что при деформации не создает проблемных мест для накопления грунта. Колесо получилось цилиндрическим с минимальным воздействием на грунт. Равномерное воздействие упругих элементов на обод и максимальная сила сцепления обеспечиваются путем подбора количества сегментных упругих элементов и грунтозацепов. Колесо можно рассчитать тео-

ретически, что позволяет оптимизировать все его параметры при проектировании.

**Металлоэластичное колесо с увеличенной относительной шириной** (рис. 8, *в*), обеспечивающей повышение боковой и крутильной жесткостей, является дальнейшим развитием подобных конструкций. По рекомендациям специалистов-грунтоведов колеса выпущены за пределы ободьев и имеют плоскую часть, что повысило их устойчивость на склонах и тягово-сцепные свойства [21, 22]. Колесо испытано с положительными результатами на стенде «Грунтовой канал» в МВТУ им Н.Э. Баумана [23].

Такие колеса, уже примененные в нескольких макетах марсоходов и роботов, предполагается использовать в отечественных проектах луноходов. В процессе эксплуатации элементы

колеса не ломались, не деформировались, во внутренней полости колеса грунт и камни не задерживались.

**Металлоэластичное колесо с повышенной крутильной жесткостью** (рис. 8, з) представляет собой модернизированный вариант предыдущей модели. К упругим элементам в плоскости колеса добавлены упругие элементы в поперечной плоскости. Для улучшения тягово-сцепных свойств в бортовом повороте в конструкции предусмотрены боковые грунтозацепы (рис. 9) [24]. Колеса, приведенные на рис. 8, б и в, идентичны по воздействию на грунт. Первое из них можно рассматривать как базовое малонагруженное колесо, для которого крутильная жесткость не является определяющей, а второе — как базовое сильно нагруженное колесо с минимальной радиальной и максимальными крутильной и боковой жесткостями.

**Анализ конструкций колес.** Рассмотренные колеса созданы для отработки планетоходов и их практической реализации. При выборе колеса необходимо учитывать следующие условия Луны: глубокий вакуум, при этом существует возможность холодной сварки деталей; широкий диапазон температур  $\pm 150^\circ\text{C}$ , что ограничивает выбор конструкционных материалов для колес; тип грунта — реголит, являющийся абразивным материалом; значительное количество кратеров и камней, для преодоления которых необходима соответственно опорная и геометрическая проходимость колеса. Все это и высокие тягово-сцепные свойства определяют ограничения по выбору перспективных колес.

Из рассмотрения исключены все металлосетчатые колеса, имеющие большие внутренние

потери, малый ресурс пробега на грунте и возможность холодной сварки нитей сетки.

Известно, что проходимость колес подразделяют на опорную (характеризуемую в первую очередь давлением колеса на грунт) и геометрическую, определяемую возможностью преодоления препятствий как в статическом (при минимальной скорости), так и динамическом (при максимальной скорости) режиме.

Для оценки геометрической проходимости в статическом режиме введем параметр  $K_1 = G_k/D$  ( $G_k$  — нагрузка на колесо в реальных условиях эксплуатации;  $D$  — диаметр колеса), характеризующий эффективность преодоления единичных препятствий.

Для оценки геометрической проходимости в динамическом режиме примем параметр  $K_2 = K_1 v$  ( $v$  — скорость движения планетохода), определяющий эффективность преодоления единичных препятствий на максимальной скорости.

Для оценки опорной проходимости колес введем параметр  $K_3 = K_1/B$  ( $B$  — ширина колеса), пропорциональный давлению в зоне взаимодействия колеса и грунта.

В таблице приведены все известные данные, а также рассчитанные параметры  $K_1$ – $K_3$  для реализованных и планируемых к использованию колес планетоходов.

**Результаты анализа.** Параметр  $K_1$ , с одной стороны, характеризует нагрузку, приходящуюся на единицу диаметра колеса, а с другой — нагрузку от встречи с единичным препятствием, действующую на колесо.

У марсохода Curiosity параметр колеса  $K_1$  в несколько раз больше, чем у всех остальных планетоходов (см. таблицу), вследствие чего он должен иметь проблемы при движении по каменистой поверхности. Из проведенного обзора известно, что некоторые колеса этого марсохода получили сильные повреждения, т. е. нагрузка на колесо не соответствует его размеру и прочностным свойствам.

У колеса марсохода «Пастер» значение параметра  $K_1$  также немалое, вследствие чего у него могут возникнуть те же проблемы, что и у марсохода Curiosity.

Колесо «Лунохода-1» имеет самый большой параметр  $K_2$ . Среди представленных планетоходов только он смог развить скорость до 2 000 м/ч, хотя его средняя скорость составляла 170 м/ч. У всех последующих проектов планетоходов скорость была примерно в 10 раз

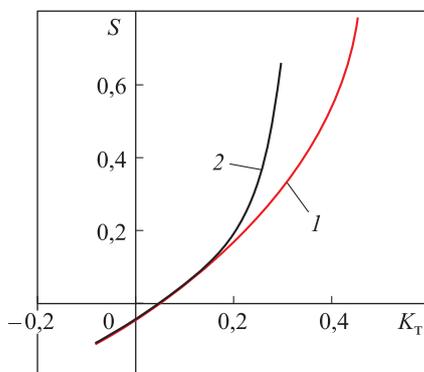


Рис. 9. Зависимость коэффициента буксования  $S$  от коэффициента тяги  $K_T$  колеса с боковыми грунтозацепами (1) и без них (2) при движении по песку с углом увода  $\delta = 30^\circ$

Значения параметров колес планетоходов

Параметр	Планетоход (разработчик)					
	«Луноход-1» (НПО им. С.А. Ла- вочкина, СССР)	Spirit и Opportunity (JPL, США)	Curiosity (JPL, США)	MPE (Kaiser- Threde, Гер- мания)	ЛХ240 (ИКИ РАН, Россия)	«Пастер» (Astrium, ЕКА*)
Масса планетохода $G$ , кг	756	174	899	15,8	240	300
Нагрузка на колесо $G_k$ , Н	153	108	556	6,4	65	186
Скорость движения $v$ , м/ч	2000	180	144	50	250	108
Диаметр колеса $D$ , м	0,51	0,255	0,5	0,25	0,37	0,28
Ширина колеса $B$ , мм	0,2	0,16	0,4	0,06	0,1	0,12
Тип колеса	Открытое жесткое	Закрытое жесткое	Открытое жесткое	Открытое жесткое	Открытое эластичное	Открытое эластичное
$K_1$ , Н/м	300	424	1 112	26	176	664
$K_2$ , Н·м/(м·ч)	600 000	76 000	160 000	1 280	44 000	72 000
$K_3$ , Н/м <sup>2</sup>	1 500	2 650	2 780	427	1 760	5 536

\* ЕКА — Европейское космическое агентство (ЕКА — European Space Agency).

меньше, чем у «Лунохода-1». При испытаниях макетов «Лунохода-1» повреждались грунтозацепы и сетка, поскольку они первыми воспринимали динамическое воздействие при ударе колеса о камень.

Самый большой параметр  $K_3$  наблюдается у марсохода «Пастер». При этом благодаря эластичным колесам он может несколько снизиться, но проблему с опорной проходимостью транспортное средство будет испытывать на всем пути следования.

Среди реализованных планетоходов большие значения параметра  $K_3$  имеют марсоходы Curiosity, Spirit и Opportunity. Из опыта эксплуатации моделей Spirit и Opportunity известно, что они несколько раз попадали в грунтовые «ловушки», из которых выбирались с большим трудом. Марсоход Curiosity большую часть времени ездил по каменистой пустыне, где и повредил колеса.

Минимальными параметрами  $K_1$ – $K_3$  обладают колеса мини-луноходов массой 15...30 кг, при этом их тип (жесткие/эластичные) не имеет большого значения и будет определяться конструктивными особенностями транспортного средства. Для луноходов массой 200...300 кг по параметрам  $K_1$ – $K_3$  оптимальными являются колеса, показанные на рис. 8, б и в.

## Выводы

1. Предложенные параметры  $K_1$ – $K_3$  качественно отражают поведение колес на грунте.
2. Выявлены две весовые категории колес для отечественных луноходов — 15...30 кг и 200...300 кг, — имеющие наиболее оптимальные параметры движения.
3. Определены возможные типы колес для отечественных луноходов.

## Литература

- [1] Кемурджиан А.Л., ред. *Планетоходы*. Москва, Машиностроение, 1993. 400 с.
- [2] Кемурджиан А.Л., ред. *Передвижение по грунтам Луны и планеты*. Москва, Машиностроение, 1986. 267 с.
- [3] 15 попыток заново изобрести колесо. URL: <http://www.lgai.ru/publ/moistati/513490-15-popytok-zanovo-izobresti-koleso.html> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [4] Williams D.R. *The Apollo Lunar Roving Vehicle*. URL: [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo\\_lrv.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_lrv.html) (дата обращения 27 сентября 2016).
- [5] NASA's Lunar Rover: Everything You Need to Know. URL: <http://www.armaghplanet.com/blog/nasas-lunar-rover-everything-you-need-to-know.html> (дата обращения 27 сентября 2016).

- [6] 11 машин, на которых не стыдно отправиться в космос. URL: [http://topgearussia.ru/news/22030\\_11\\_mashin\\_na\\_kotoryih\\_ne\\_styidno\\_otpravitsya\\_v\\_kosmos](http://topgearussia.ru/news/22030_11_mashin_na_kotoryih_ne_styidno_otpravitsya_v_kosmos) (дата обращения 27 сентября 2016).
- [7] Dual Mode Rover. URL: <http://astrotek.ru/remote-i-dual-mode-rover> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [8] Хроника: первый автомобиль на Луне. URL: [http://www.zr.ru/content/news/341753-hronika\\_pervyj\\_avtomobil\\_na\\_lune](http://www.zr.ru/content/news/341753-hronika_pervyj_avtomobil_na_lune) (дата обращения 27 сентября 2016).
- [9] На мягких металлических лапах. Луноход от Bendix corp. URL: <http://strangernn.livejournal.com/769732.html> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [10] Metalastic Wheels (1962). URL: <https://www.wired.com/2013/01/metalastic-wheels-1962> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [11] Японцы испытали трехколесный луноход. URL: <http://www.membrana.ru/particle/16107> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [12] JAXA разработало луноход на 3-х колесах. URL: <http://www.nashkosmos.ru/news/jaxa-news/2011/05/1679-jaxa-3-wheel-moonrover> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [13] Робот-трицикл будет исследовать Луну. URL: [http://www.prorobot.ru/11/robot\\_lunocikl.php](http://www.prorobot.ru/11/robot_lunocikl.php) (дата обращения 27 сентября 2016).
- [14] Новый марсоход. URL: [http://inright.ru/prep/20100323/id\\_66](http://inright.ru/prep/20100323/id_66) (дата обращения 27 сентября 2016).
- [15] Марсоход ExoMars готовится к очередным испытаниям. URL: <http://24space.ru/853-marsohod-exomars-gotovitsya-k-ocherednym-ispytaniyam.html> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [16] ExoMars Rover (2015). URL: <http://exploration.esa.int/mars/45084-exomars-rover> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [17] UCL's ExoMars PanCam kit one step closer to Mars. London's global university. URL: <http://www.ucl.ac.uk/news/news-articles/1215/041215-mars-rover-pancam> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [18] Колесные планетоходы ВНИИТМ. URL: <http://www.enlight.ru/post/6055> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [19] Хроника событий. ОАО «ВНИИтрансмаш». URL: <http://www.vniitransmash.ru/MENU/WE/kosmos.html> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [20] Наш путь через тернии к звездам. URL: <https://m.geektimes.ru/post/150169/> (дата обращения 27 сентября 2016).
- [21] Рождественский Ю.Л., Наумов В.Н. Математическая модель взаимодействия металлоупругого колеса с уплотняемым грунтом. *Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана*, 1980, № 28, С. 84–111.
- [22] Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю. Математическая модель взаимодействия металлоупругого колеса с уплотняемым грунтом в режиме бортового поворота. *Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана*, 1984, № 411, с. 85–108.
- [23] Чижов Д.А. Разработка комплексного метода повышения энергоэффективности полноприводной колесной машины. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012, 146 с.
- [24] Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю., Харитонов В.Е., Корсунский В.А., Наумов В.Н. Колесо транспортного средства. А.с. 1685754 СССР, № 4435151/11, заявл. 03.06.88, опубл. 23.10.91, бюл. № 39. 3 с.

## References

- [1] Planetokhody [The Planetary Rovers]. Ed. Kemurdzhian A.L., Moscow, Mashinostroenie publ., 1993. 400 p.
- [2] Peredvizhenie po gruntam Lunny i planet [The movement of the soils of the moon and planets]. Ed. Kemurdzhian A.L. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 267 p.
- [3] 15 попыток заново изобрести колесо [15 attempts to reinvent the wheel]. Available at: <http://www.1gai.ru/publ/moistati/513490-15-popytok-zanovo-izobresti-koleso.html> (accessed 27 September 2016).
- [4] Williams D.R. *The Apollo Lunar Roving Vehicle*. Available at: [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo\\_lrv.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_lrv.html) (accessed 27 September 2016).

- [5] NASA's *Lunar Rover: Everything You Need to Know*. Available at: <http://www.armaghplanet.com/blog/nasas-lunar-rover-everything-you-need-to-know.html> (accessed 27 September 2016).
- [6] *11 mashin, na kotorykh ne stydno otpravit'sia v kosmos* [11 vehicles, which is not ashamed to go into space]. Available at: [http://topgearussia.ru/news/22030\\_11\\_mashin\\_na\\_kotoryih\\_ne\\_styidno\\_otpravitsya\\_v\\_kosmos](http://topgearussia.ru/news/22030_11_mashin_na_kotoryih_ne_styidno_otpravitsya_v_kosmos) (accessed 27 September 2016).
- [7] *Dual Mode Rover*. Available at: <http://astrotek.ru/remote-i-dual-mode-rover> (accessed 27 September 2016).
- [8] *Khronika: pervyi avtomobil' na Lune* [Chronicle: the first car on the moon] (2011). Available at: [http://www.zr.ru/content/news/341753-hronika\\_pervyj\\_avtomobil\\_na\\_lune](http://www.zr.ru/content/news/341753-hronika_pervyj_avtomobil_na_lune) (accessed 27 September 2016).
- [9] *Na miagkikh metallicheskih lapakh. Lunokhod ot Bendix corp* [The soft metal legs. Rover from Bendix corp]. Available at: <http://strangerenn.livejournal.com/769732.html> (data obrashcheniia 27 September 2016).
- [10] *Metalastic Wheels (1962)*. Available at: <https://www.wired.com/2013/01/metalastic-wheels-1962> (accessed 27 September 2016).
- [11] *Iapontsy ispytali trekhkolesnyi lunokhod* [The Japanese experienced a three-wheeled rover]. Available at: <http://www.membrana.ru/particle/16107> (accessed 27 September 2016).
- [12] *JAXA razrabotalo lunokhod na 3-ekh kolesakh* [JAXA has developed a lunar Rover on three wheels]. Available at: <http://www.nashkosmos.su/news/jaxa-news/2011/05/1679-jaxa-3-wheel-moonrover> (accessed 27 September 2016).
- [13] *Robot-tritsikl budet issledovat' Lunu* [Robot tricycle will explore the moon]. Available at: [http://www.prorobot.ru/11/robot\\_lunocikl.php](http://www.prorobot.ru/11/robot_lunocikl.php) (accessed 27 September 2016).
- [14] *Novyi marsokhod* [New Mars Rover]. Available at: [http://inright.ru/prep/20100323/id\\_66](http://inright.ru/prep/20100323/id_66) (accessed 27 September 2016).
- [15] *Marsokhod ExoMars gotovit'sia k ocherednym ispytaniiam* [The ExoMars Rover to prepare for the next test]. Available at: <http://24space.ru/853-marsokhod-exomars-gotovitsya-k-ocherednym-ispytaniyam.html> (accessed 27 September 2016).
- [16] *ExoMars Rover*. Available at: <http://exploration.esa.int/mars/45084-exomars-rover> (accessed 27 September 2016).
- [17] *UCL's ExoMars PanCam kit one step closer to Mars. London's global university*. Available at: <http://www.ucl.ac.uk/news/news-articles/1215/041215-mars-rover-pancam> (accessed 27 September 2016).
- [18] *Kolesnye planetokhody VNIITM* [Wheeled planetary Rovers VNIITM]. Available at: <http://www.enlight.ru/post/6055> (accessed 27 September 2016).
- [19] *Khronika sobytii. OAO «VNIITransmash»* [Chronicle of events. JSC «Vniitransmash»]. Available at: <http://www.vniitransmash.ru/MENU/WE/kosmos.html> (accessed 27 September 2016).
- [20] *Nash put' cherez ternii k zvezdam* [Our path per aspera ad astra]. Available at: <https://m.geektimes.ru/post/150169/> (accessed 27 September 2016).
- [21] Rozhdestvenskii Iu.L., Naumov V.N. *Matematicheskaia model' vzaimodeistviia metallouprugogo kolesa s uplotniaemym gruntom* [A mathematical model of the interaction of metal-elastic wheels with the sealing primer]. *Trudy MVTU im. N.E. Baumana* [Trudy MVTU named after N.E. Bauman]. 1980, no. 284, pp. 84–111.
- [22] Rozhdestvenskii Iu.L., Mashkov K.Iu. *Matematicheskaia model' vzaimodeistviia metallouprugogo kolesa s uplotniaemym gruntom v rezhime bortovogo povorota* [A mathematical model of the interaction of metal-elastic wheels with sealing soil in the mode of onboard turn]. *Trudy MVTU im. N.E. Baumana* [Trudy MVTU named after N.E. Bauman]. 1984, no. 411, pp. 85–108.
- [23] Chizhov D.A. *Razrabotka kompleksnogo metoda povysheniia energoeffektivnosti polnoprivodnoi kolesnoi mashiny*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of complex techniques to improve energy-wheel drive wheeled vehicle. Cand. tehn. sci. diss.]. Moscow, 2012. 146 p.
- [24] Rozhdestvenskii Iu.L., Mashkov K.Iu., Kharitonova V.E., Korsunskii V.A., Naumov V.N. *Koleso transportnogo sredstva* [The wheel of the vehicle]. Patent USSR no. 1685754, 1988. 3 p.

## Информация об авторах

**НАУМОВ Валерий Николаевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**КОЗЛОВ Олег Евгеньевич** (Москва) — зав. лабораторией. ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (117997, Москва, Российская Федерация, Профсоюзная ул., 84/32).

**МАШКОВ Константин Юрьевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: makon111@rambler.ru).

**БЯКОВ Константин Евгеньевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: konst.byakov@yandex.ru).

## Information about the authors

**NAUMOV Valeriy Nikolaevich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

**KOZLOV Oleg Evgenievich** (Moscow) — Head of the Laboratory. Federal State Budgetary Scientific Institution: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN) (117997, Moscow, Russian Federation, Profsoyuznaya St., Bldg. 84/32).

**MASHKOV Konstatin Yurievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: makon111@rambler.ru).

**BYAKOV Konstantin Evgenievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: konst.byakov@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание учебного пособия  
под редакцией Д.А. Ягодникова

### «Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок»

Изложены основы теории, расчета и проектирования агрегатов регулирования жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и ЖРДУ в целом. Рассмотрены основные характеристики ЖРДУ, даны примеры определения статических и динамических режимов работы двигательной установки. Описаны схемы и элементы конструкции агрегатов регулирования ЖРДУ. Приведена конструкторская оценка динамической устойчивости систем регулирования. На примере реальных схем ЖРДУ рассмотрено практическое применение агрегатов регулирования.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru