

УДК 629.33.03-83

М.И. Маленков, В.А. Волов**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ
САМОХОДНЫХ ШАССИ ПЛАНЕТОХОДОВ***

Приведены результаты исследований, направленных на обобщение и систематизацию опыта разработки шасси колесных самоходных тихоходных автоматических планетоходов. Данные результаты являются дальнейшим развитием материалов на эту тему, опубликованных в настоящем журнале (2015 год, №1). При выборе базовых конструктивных параметров движителя главными критериями проходимости на деформируемых грунтах могут служить коэффициенты удельной полной и свободной тяги, а также коэффициент сопротивления качению колеса. В качестве критериев оценки эффективности схем балансирных подвесок предлагается в частности коэффициент удельной загрузки приводов колес. Он представляет реализуемый динамический фактор i -го мотор-колеса, определенный с учетом свойств грунта и рельефа. Идеальным является равенство этих коэффициентов, что теоретически достижимо при применении активных адаптивных подвесок. В качестве такой подвески предложено использовать механизмы шагающего колесно-шагающего движителя. Для анализа эффективности работы подвески на пересеченной местности, при движении через одиночные препятствия, камни, выступы, предлагается критерий минимально-необходимого коэффициента сцепления. В статье рассматривается также ситуация, когда опорная поверхность движения и поверхность преодолеваемого одиночного препятствия имеют разные свойства. Это, например, верхняя часть камня, выступающая из песка. Двумерная картина ближе к реальным условиям и позволяет более информативно и наглядно оценить работу подвески. Приводится анализ подвески типа Rocker-Bogie, в которой бортовые балансиры связаны межбортовыми механизмами синхронизации, и подвески с двумя продольными тележками и поперечным балансиром, которую называют также трехточечной подвеской. В качестве расчетных ситуаций выбраны движение на подъемах по слабо связному грунту и преодоление одиночных препятствий. Получена количественная оценка преимуществ новой схемы подвески как при движении на крутых подъемах по слабо связному грунту, так и при преодолении одиночных препятствий на различных грунтах.

*Планетоход; колесно-шагающий движитель; балансирная подвеска; система пере-
движения; проходимость.*

M.I. Malenkov, V.A. Volov**COMPARATIVE ANALYSIS OF PROPULSOR COMPONENTS
OF PLANETARY ROVER CHASSIS**

Research results, which are directed to generalization and systematization of experience of development of wheeled self-propelled low-speed rover chassis, are given. These results are further development of the materials on this subject published on pages the present magazine in 2015 (No. 1). When choosing basic design parameters of the propulsion unit specific coefficients of total and free traction and the coefficient of rolling resistance of the wheel can serve as the main criteria of the trafficability for deformable soils. As criteria of assessment of efficiency of the schemes of the balancing suspensions in particular the specific wheel-loading coefficient are proposed. This coefficient presents the attainable dynamic factor of motor-wheel in dependence on the ground conditions and the inclination of the surface. The ideal case is the equality of these coefficients which is theoretically achievable at application of active adaptive suspension only. As such a suspension it is proposed to use a mechanism of wheel-walking propulsion unit. For the analysis of the suspension efficiency on rough terrain, when driving through single discrete obstacles as rocks, scarps, required wheel-soil friction coefficient is proposed. In the article the situation is also considered, when the surface of the movement and the surface of the discrete obstacle have different properties.

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: проект № 14.576.21.0050.

It is, for example, the upper part of a rock acting from sand. The two-dimensional characteristic is closer to real conditions and allows to estimate the work of a suspension unit more informatively and clearly. The analysis of the suspension type Rocker-Bogie in which the rockers are connected by transverse synchronization mechanism, and a suspension with two longitudinal bogies, and with one transversal balancing suspension of wheels, also called three-point suspension, is present. As the calculating situations, the movement on loose soil and overcoming of discrete obstacles are chosen. Quantified assessment of advantages of the new suspension scheme, when driving on steep inclines with the loose ground and overcoming discrete obstacles on different surface properties, is given.

Planetary rover; wheel-walking propulsion unit; balancing suspension; locomotion system; cross-country ability.

Введение. Применение в составе советских автоматических луноходов индивидуальных электромеханических приводов, жестких металлических колес, неизбежность их проскальзывания при преодолении подъемов и других препятствий, потребовало дальнейшего развития теории движения колесных транспортных машин на деформируемых грунтах. Подавляющее большинство исследований в этом направлении, проведенных в начале второй половины XX века, относилось к колесным транспортным машинам с механической трансмиссией и пневматическими резинокордными шинами низкого или переменного давления [1–6].

В редких исследованиях, посвященных транспортным машинам с мотор – колесами вопросы взаимодействия с грунтом не рассматривались, поскольку движение, например, карьерных самосвалов большой грузоподъемности, которые требовали применения индивидуальных электромеханических приводов колес, осуществляется на прочных грунтах [7]. За рубежом в эти годы наиболее последовательно развивал теорию транспортных машин, предназначенных для движения по неподготовленной местности, включая луноходы, американский ученый польского происхождения М.Г. Веккер [8, 9].

Его идеи о проектировании транспортных машин с учетом физико – механических свойств (ФМС) грунта и рельефа местности оказались очень близкими с подходами разработчиков ВНИИТрансмаш (г. Ленинград), где в это время, по ТЗ ОКБ имени С.А. Лавочкина, создавались самоходные шасси луноходов.

Успешная эксплуатация Лунохода-1 и Лунохода-2 на Луне подтвердила правильность конструкторских решений в целом по шасси, его подсистемам и узлам, выполненным на уровне изобретений. Это относится, в частности, к конструкциям электромеханического привода, колеса с сетчатым ободом и развитыми грунтозацепами и направляющего механизма подвески колес на основе параллелограмма. Описанию этих компонентов, результатам исследований, направленных на обоснование и дальнейшее улучшение их характеристик в прошлом веке были посвящены более сотни авторских свидетельств на изобретения, десятки объемных научно – технических отчетов и публикаций.

В какой-то мере этот огромный материал отражен в публикациях [10–16] и в литературе, которая приведена в их библиографических ссылках. Лучшая часть этого материала остается актуальной до настоящего времени за рубежом и у нас в стране [17, 18]. Об этом свидетельствует, например, конструкция наружного обода колеса лунохода «Юйту», в которой частично используются отработанные технические решения советских разработчиков. [19].

Перспективным направлением для разработки новых планетоходов является также отечественный научно-технический задел по системам передвижения с колесно – шагающим движителем (КШД) [20–22].

Нужно отметить, что еще в начале 90-х годов прошлого века, во многом благодаря деятельности Планетного общества США (The Planetary Society) и лично его директора доктора Lois Friedman, российские и американские специалисты прово-

дили совместные ходовые испытания одного из российских макетов марсохода с сочлененно-балансирным трех секционным шасси, обеспечивающим реализацию колесного и колесно – шагающего способов передвижения. Испытания проводились на кварцевых песках Калифорнии и вулканических песках Камчатки и продемонстрировали высокую, недостижимую прежде, проходимость [23–25].

Однако, несмотря на существенные, преимущества трех секционной несущей конструкции перед монолитной рамой по проходимости и устойчивости от опрокидывания, ниже рассматриваются только односекционные схемы. Они позволяют организовать единый контейнер, в котором обеспечиваются комфортные условия для работы всей чувствительной к среде эксплуатации служебной и научной аппаратуры.

Цель настоящей статьи – изложение методических подходов и расчетный анализ механики балансирных подвесок планетоходов на основе общих подходов и критериев, свойственных научной школе, созданной российскими учеными и специалистами под руководством главного конструктора самоходного автоматического шасси Лунохода-1 А.Л. Кемурджиана.

В статье рассматривается подвеска типа *Rocker-Bogie* (см. рис. 1), использованная, в различных исполнениях, в конструкции всех четырех реальных американских марсоходов [26–30] и конструкции китайского лунохода [19]. В качестве альтернативного решения приводится трехточечная подвеска (см. рис. 2), базирующаяся на применении параллелограммных механизмов и использованная в конструкции нескольких масштабных и полноразмерных макетов самоходного шасси европейского марсохода проекта *Echomars* [31, 32]. Учтены новейшие тенденции использования механизмов колесно-шагающего движителя в качестве активных подвесок [33, 34]. Полученные результаты существенно дополняют информацию о свойствах этих типов подвесок, изложенную в зарубежных публикациях, посвященных адаптивным роботам [35, 36].

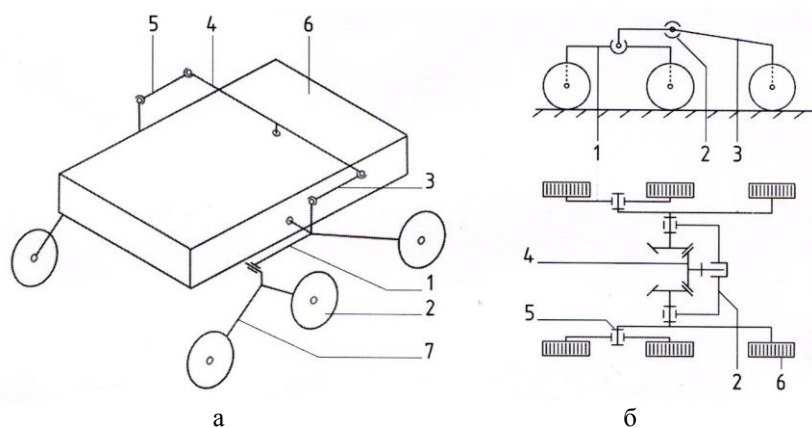


Рис. 1. Структурно - кинематические схемы подвесок *Rocker-Bogie*: (а) с межбортовым балансиrom (коромыслом) (марсоходы *Sojourner* и *Curiosity*): 1–балансир тележки, 2–колесо, 3, 5– левая и правая тяги, 4–коромысло, 6 – рама шасси, 7– тележка; (б) с межбортовым дифференциалом (марсоходы *Spirit* и *Opportunity*): 1 – тележка, 2 – рама шасси, 3 – правый бортовой балансир, 4 – дифференциал, 5 – подшипники шарниров, 6 – колесо

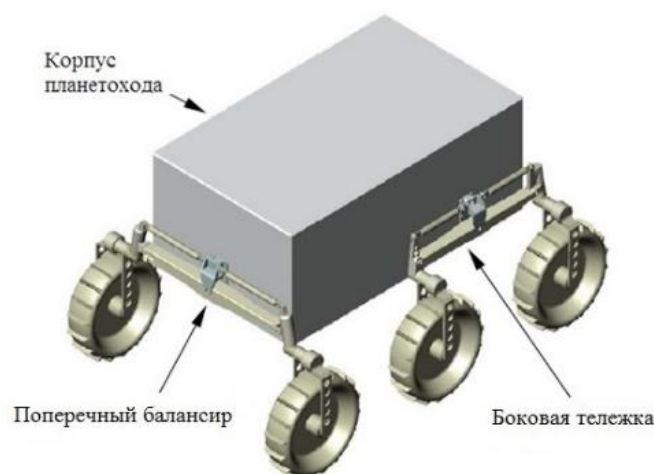


Рис. 2. Структурно-кинематическая схема трехточечной подвески [31]

1. Методы и критерии оптимизации параметров колеса. В теории транспортных машин различают опорную и профильную проходимость, связанные, соответственно, с физико-механическими свойствами грунта, образующего опорную поверхность, и с рельефом этой поверхности. В обоих случаях главную роль играет ходовая часть самоходного шасси, которая может включать колесный движитель, подвеску и иные механизмы, обеспечивающие операции колес на грунте. Существенное влияние на проходимость оказывает также схема электромеханической трансмиссии.

Ниже рассматриваются только индивидуальный электромеханический привод, жесткие колеса, радиальная деформация обода которых под нагрузкой

ничтожна по сравнению с деформацией грунта, и только балансирные, неупругие подвески, а также комбинации таких подвесок с механизмами шагания колес. Предполагается также, что окончательному выбору конструкции колес и подвески предшествуют проектно-компоновочные проработки планетохода, позволяющие определить зоны размещения и предельные габариты компонентов ходовой части.

Движение по слабо связным грунтам на сложном рельефе происходит с продольным скольжением колес – буксованием или юзом, что приводит к задаче механики тел с неголономными связями. Существует большое количество работ, которые посвящены расчетно – теоретическому обоснованию тягово – сцепных свойств (ТСС) с учетом как конструктивных параметров колес, так и ФМС грунта, определяемых с помощью традиционного инструментария механики грунтов – различного рода пенетрометров, штампов и приспособлений. Общим недостатком получающихся при этом выражений, применительно к транспортным средствам высокой проходимости, является узкая область их применения. При проектировании новых машин, оценке ходовых качеств в новых районах эксплуатации, как правило, необходимо проведение дополнительных испытаний на конкретных грунтах или их физических моделях.

Главной особенностью физической картины взаимодействия многоколесного полно приводного самоходного шасси со слабо связными грунтами является возможность реализации индивидуального для каждого мотор – колеса режима движения [17]. В отсутствие регулирования скорости вращения отдельных колес, например, с целью их синхронизации, это означает, что силовые и кинематические харак-

теристики режимов работы определяются исключительно свойствами грунта и рельефом местности в точке контакта колеса с опорной поверхностью и в пределах колесной базы шасси.

Это обстоятельство позволяет всесторонне исследовать взаимодействие колес со слабо связными грунтами, во всем диапазоне коэффициентов буксования, при испытаниях одиночных полно размерных макетов колес на физических моделях лунного и марсианского грунта. Невысокие скорости движения позволяют применение для этих целей компактных грунтовых каналов, ширина и длина которых определяется проектными значениями ширины и диаметра колес. Схемы и методики испытаний на таких стендах рассмотрены, например, в работах [15, 20, 21].

К числу наиболее важных параметров, характеризующих тягово-сцепные свойства i -го колеса рассмотренной системы, относятся: коэффициент буксования колеса S_{bi} , коэффициенты свободной тяги k_{ii} и сопротивления качению (движению) колеса f_i . Коэффициенты S_{bi} и k_{ii} определяются по формулам:

$$S_{bi} = 1 - \frac{v_f}{\omega_{ki} \cdot r_k}, \quad (1)$$

где v_f - фактическая скорость поступательного движения оси колеса, ω_{ki} - угловая скорость колеса, r_k - радиус колеса, который, чаще всего, принимают по грунтозацепам, $i = 1, 2 \dots n$ - порядковый номер колеса, n - количество колес;

$$k_{ii} = F_{ki} / P_{zi} \quad (2)$$

где F_{ki} - сила тяги на крюке при испытаниях одиночных колес на горизонтальных площадках, P_{zi} - нормальная реакция грунта.

Для планетохода величина силы тяги на крюке характеризует возможности транспортного средства преодолевать подъемы (рис. 3). Поскольку рельеф морских районов Луны на трассах движения луноходов определяется, главным образом, кратерами (камни можно объехать), эта схема является основной для выбора параметров тяговых (колесных) приводов.

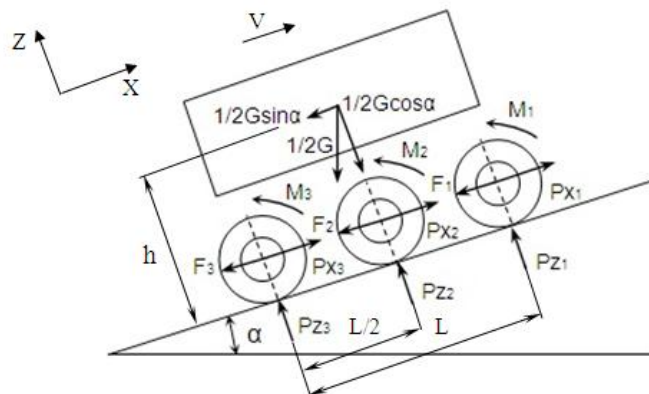


Рис. 3. Схема внешних сил, приведенных к оси колеса и действующих на планетоход при движении на подъем: P_{xi} - тяговая сила колеса, P_{zi} - нормальная реакция колеса, F_i - сила сопротивления качению колеса; M_i - реактивный крутящий момент привода колеса; L - колесная база; h - высота центра тяжести планетохода; G - вес планетохода

Учитывая то, что для транспортного средства массой m , рассматриваемого как единое симметричное тело с центром масс, расположенном на оси, проходящей через геометрический центр опорного прямоугольника шасси нормально к поверхности, при равномерном движении на подъеме, сила тяги на крюке равна $P_x = m \cdot g_m \cdot \sin \alpha$, а реакция грунта $P_z = m \cdot g_m \cdot \cos \alpha$, коэффициент его удельной свободной тяги связан с углом подъема местности формулой:

$$k_t = \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где α – угол подъема местности (на колесной базе планетохода), g_m – ускорение свободного падения в месте эксплуатации.

Полученные соотношения позволяют оценить по результатам испытаний одиночных колес преодолеваемый планетоходом угол подъема α – главный и наиболее универсальный параметр, характеризующий опорную проходимость на лунном реголите и марсианских песчаных дюнах, в функции от S_{bi} :

$$\alpha = \operatorname{arctg} k_{ti}(S_{bi}), \quad (4)$$

поскольку для кормовых, наиболее загруженных колес:

$$k_{ti} = k_t. \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления качению колеса определяется по формуле:

$$f_i = F_i / P_{zi}, \quad (6)$$

Прямое измерение силы F_i при испытаниях в грунтовых каналах не представляется возможным, однако достаточно точно можно определить величину тяговой силы P_{xi} на колесе:

$$P_{xi} = M_{ki} / r_k \quad (7)$$

и коэффициент удельной полной тяги:

$$\Psi_{bi} = M_{ki} / (r_k \cdot P_{zi}), \quad (8)$$

где M_{ki} – крутящий момент на колесе.

С учетом этих соотношений экспериментальные функции $f_i(S_{bi})$ и $f_i(\alpha)$ могут быть определены из выражения:

$$f_i = \Psi_{bi} - k_{ti}. \quad (9)$$

Функции $k_{ti}(S_{bi})$, $f_i(S_{bi})$, $\Psi_{bi}(S_{bi})$, полученные в диапазоне реальных нагрузок раскрывают тягово–сцепные свойства колес во взаимодействии с конкретным грунтом, позволяют определить количественные критерии при оптимизации их геометрических параметров, включая рисунок и высоту грунтозацепов. Они могут быть использованы также для разработки корректных математических и компьютерных моделей планетоходов.

Универсальность этих функций позволяет проверить корректность результатов стендовых экспериментов в процессе ходовых испытаний макетов планетоходов, которые, необходимы для комплексной отработки взаимодействия систем и подтверждения проектных характеристик.

Так коэффициент сопротивления движению макета при его испытаниях на грунтовых стендах типа «Переменный уклон» может быть определен по формуле:

$$f = \frac{\sum^n M_{ki}}{g_m \cdot r_k \cdot m \cdot \cos \alpha} - \operatorname{tg} \alpha = \Psi_b - \operatorname{tg} \alpha \quad (10)$$

где первый член представляет собой коэффициент удельной (полной) тяги макета Ψ_b .

В некоторых работах Ψ_{bi} отождествляют с коэффициентом сцепления φ , но, чтобы сохранить некоторую преемственность с понятийным аппаратом теории автомобиля, коэффициент φ в случае движения по слабо связным грунтам логичнее, на наш взгляд, трактовать как предельную величину Ψ_{bi} при некотором, допускаемом в данной экспедиции, буксовании.

$$\Psi_{bi} \leq \varphi.$$

Так, например, для лунных вездеходов Lunar Roving Vehicle (LRV), по некоторым публикациям рекомендовалось $S_{bi} \leq 0,2$, а буксование колес американских марсоходов при попадании в песчаные ловушки достигало $S_{bi} \leq 0,95-0,98$, что, конечно, нужно относить к аварийным ситуациям. У советских луноходов среднее значение S_{bi} составляло $0,05 \dots 0,07$, но при выезде из кратеров достигало $S_{bi} \leq 0,4 \dots 0,5$. Эту величину, видимо, следует считать предельной, так как при дальнейшем увеличении буксования колеса зарываются в грунт и рост тяги не компенсирует увеличения сопротивления движению.

Профильная проходимость марсоходов характеризуется высотой выступа (эскарпа) h_1 , уступа (контрэскарпа), преодолеваемых одним и двумя бортами одновременно и высотой препятствий H (клиренс), которые свободно проходят под днищем марсохода. При выбранных геометрических параметрах колес, опорная и профильная проходимость определяется схемой и геометрическими параметрами подвески.

2. Методы и критерии оптимизации схемы и параметров подвески. В качестве основного критерия оптимизации схемы и параметров подвески при анализе опорной проходимости целесообразно использовать коэффициент удельной загрузки мотор-колеса D_{Γ_i} , который представляет собой реализуемый динамический фактор i -го мотор-колеса, определенный с учетом свойств грунта и угла подъема поверхности движения при допущении о равенстве коэффициентов сопротивления качению всех колес:

$$f_i = f. \quad (11)$$

Это позволяет исключить из расчетного анализа вес машины и, таким образом, сделать его более универсальным.

Коэффициент удельной загрузки мотор-колеса равен:

$$D_{\Gamma_i} = \frac{P_{xi} \cdot n}{G}, \quad (12)$$

где $P_{xi} = P_{zi} \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$ – сила тяги колеса, $G = m \cdot g_m$ – вес планетохода в месте эксплуатации.

Отсюда видно, что одинаковая нагрузка всех мотор-колес при движении на подъем определяется условием

$$D_{\Gamma_i} = f \cos \alpha + \sin \alpha. \quad (13)$$

Но выполнение этого условия возможно только в подвесках с активной адаптацией. В пассивных балансирных подвесках наиболее нагруженными являются задние колеса и выбор двигателей мотор-колес производится по режиму их работы.

При движении машины на подъем задние колеса начинают раньше, чем остальные колеса, зарываться в грунт при буксовании, поэтому меньшие значения удельных коэффициентов загрузки кормовых колес характеризуют, в определенной степени, их меньшую величину буксования, а значит меньшие потери энергии на работу буксования.

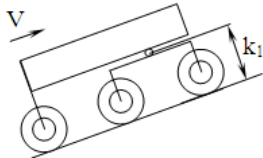
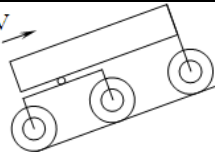
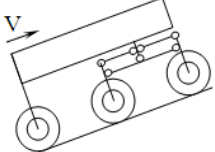
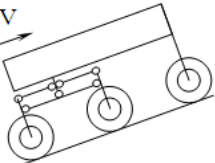
Для сравнительного анализа балансирных подвесок с использованием коэффициента удельной загрузки мотор-колес в расчете необходимо принять определенные условия эксплуатации, например, $f = 0,12$, $\alpha = 25^\circ$.

С использованием коэффициента удельной загрузки был выполнен расчетный анализ 2-х схем, а именно, были рассмотрены подвеска Rocker-Bogie и трехточечная подвеска. Структурно-кинематические схемы данных подвесок, представляющие один борт шасси, приведены в табл. 1.

Необходимо обратить внимание на параметр k_1 для схемы Rocker-Bogie. Этот параметр определяет высоту места крепления оси поворота тележки и существенно влияет на распределение коэффициентов удельной загрузки колес.

Таблица 1

Схемы балансирных подвесок

Тип подвески		Структурно-кинематическая схема подвески одного борта
Подвеска Rocker- Bogie Примечание: k_1 - высота расположения оси поворота тележки	Тележка впереди (схема RB-1)	
	Тележка сзади (схема RB-2)	
Трехточечная подвеска	Тележка впереди (схема ТТ-1)	
	Тележка сзади (схема ТТ-2)	

**Примечание: Далее по тексту используются указанные в табл. 1 буквенные индексы схем подвесок.*

Стоит отметить, что для схем с параллелограммами (подвески ТТ-1 и ТТ-2) характеристики подвески не зависят от высоты точек крепления, поскольку виртуальная ось качания балансира у таких механизмов всегда находится на линии, соединяющей оси колес. Эта особенность может рассматриваться как одно из положительных свойств параллелограммных механизмов, поскольку свобода выбора

мест крепления расширяет компоновочные возможности подвески. Как правило, для обеспечения высокого клиренса точки крепления подвески на раме или корпусе контейнера марсохода должны находиться как можно выше.

Данную виртуальную ось качания балансира необходимо учитывать, однако, при анализе продольной устойчивости планетохода, так как в сторону колесных тележек продольная устойчивость снижается, поскольку виртуальная ось качания балансира тележки находится внутри колесной базы.

Параллелограммные механизмы обеспечивают меньшие продольные перемещения колес при вертикальных ходах подвески, что, в свою очередь, обуславливает меньшие энергетические потери, связанные с продольными паразитными перемещениями колес при движении машины по неровностям.

Кроме того, для трехточечной подвески имеется возможность выравнивания нормальных реакций колес простым продольным смещением центра масс корпуса, например, с помощью колесно-шагающих приводов, поскольку у тележки с параллелограммными механизмами всегда обеспечивается равенство нормальных реакций колес (рис. 4).

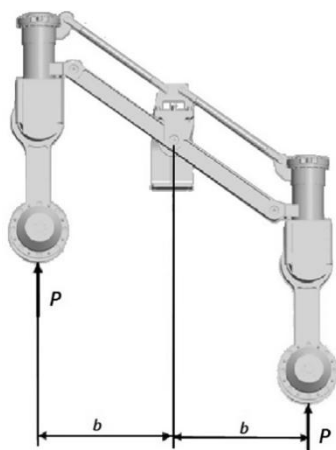


Рис. 4. Параллелограммный механизм подвески колес одной тележки:
 b – плечи балансира; P – нормальные реакции грунта

Положительным фактором такой подвески является также замыкание на корпус реактивных крутящих моментов. Не замкнутые на корпус реактивные моменты негативно влияют на работу подвески. Разработчики самоходного шасси Лунохода-1 столкнулись с этим явлением еще при проектировании шарнирно – рычажной независимой упругой подвески колес с продольным качанием рычагов. Первоначально каждое колесо подвешивалось в корпусе с помощью качающегося рычага – балансира. На оси качания размещался торсион, один конец которого был заделан в корпусе, а второй – был связан с балансиром. При движении торсионы подвесок нагружались не только крутящим моментом от нормальных реакций, но и реактивными моментами тяговых приводов, что было, конечно, недопустимым. Этот дефект был оперативно устранен путем применения четырехзвенных параллелограммных механизмов, которые замкнули реактивный момент каждого мотор-колеса на несущую конструкцию – корпус шасси.

Для сравнительного расчетного анализа движителей с указанными в табл. 1 схемами подвесок были приняты следующие геометрические параметры:

- ♦ радиус колеса $r_k = 0,15$ м;

- ◆ колесная база $L=1,1$ м;
- ◆ высота расположения центра тяжести $h=0,48$ м.

Кроме того, для подвески типа Rocker-Bogie была принята высота расположения оси поворота тележки $k_1=0,33$ м (см. табл. 1, схема RB-1).

Расчетные значения коэффициентов удельной загрузки кормовых мотор-колес при $\alpha=25^\circ$ и $f=0,12$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты удельной загрузки кормовых мотор-колес при условиях эксплуатации $f=0,12$, $\alpha=25^\circ$

Схема подвески		Коэффициент удельной загрузки кормовых колес $D_{Г3}$
Подвеска Rocker-Bogie	Схема RB-1	0,84
	Схема RB-2	1,03
Трехточечная подвеска	Схема ТТ-1	1,0
	Схема ТТ-2	0,77

Из табл. 2 видно, что по критерию $D_{Г3}$ движение на подъем является более оптимальным для подвески Rocker-Bogie в конфигурации с тележками впереди, а для трехточечной – в конфигурации с тележками сзади. При этом трехточечная подвеска выглядит все же несколько предпочтительней. Тем не менее, для сравнения, можно отметить, что при равенстве нормальных реакций на колесах для тех же условий эксплуатации коэффициент удельной загрузки составил бы $D_{Г1} = 0,53$.

Однако, для трехточечной подвески все три нормальные реакции могут быть выравнены путем смещения центра масс корпуса в направлении движения. Для реализации этого режима при оснащении шасси КШД используются механизмы шагания, поскольку независимо от смещения центра масс корпуса, колеса тележки, как было показано выше, всегда будут нагружены одинаковыми нормальными реакциями. Конечно, обеспечить выполнение оптимального алгоритма управления, при котором выполняется условие $P_{z1}=P_{z2}=P_{z3}=G\cos\alpha/n$, во всем диапазоне углов подъема очень сложно ввиду конструктивных ограничений длины шага механизмов.

В Но, как видно из рис. 5, даже при наличии простейшего, одно рычажного механизма шагания с небольшим шагом (100 мм), получается вполне заметное сближение коэффициентов удельной загрузки передних мотор-колес и мотор-колес боковых тележек, а для угла подъема 7° обеспечивается равенство нормальных реакций всех колес. Для подвесок типа Rocker-Bogie реализация такой функции в общем случае невозможна.

Балансирные подвески влияют также на эффективность движения шасси по сложному рельефу местности. В частности, подвеска Rocker-Bogie разрабатывалась, главным образом, с целью повышения эффективности преодоления одиночных препятствий, при проектировании шасси с колесами небольшого диаметра.

Для количественной оценки качества подвесок в этом случае может использоваться критерий, который характеризует тягово-сцепные свойства движителя при преодолении одиночного препятствия, а именно, величину минимально-необходимого для этого коэффициента сцепления. Чем меньше величина этого параметра, тем ниже требования к поверхности движения, а значит, тем эффективнее могут оцениваться свойства подвески при преодолении препятствия.

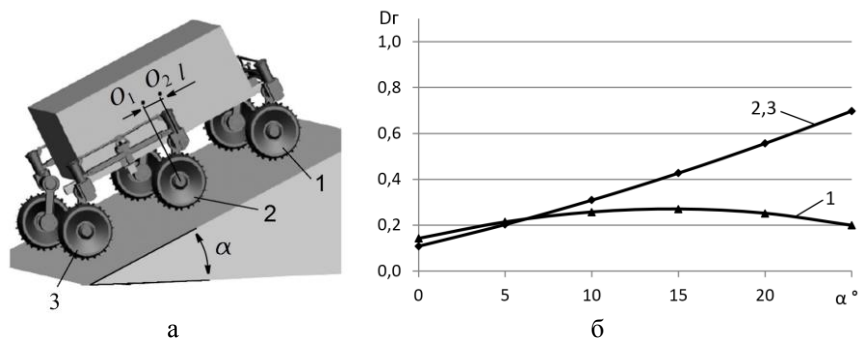


Рис. 5. Схема шасси с трехточечной подвеской механизмами шагания колес (а) и зависимость коэффициентов D_{r_i} удельной загрузки колес от угла α подъема при продольном смещении центра масс корпуса вперед на $l = 100$ мм с помощью механизмов шагания колес (б): 1, 2, 3 – переднее, среднее и кормовое колеса; O_1, O_2 – проекции центра масс ровера на вертикальную плоскость до и после перемещения на расстояние l

Расчетная схема для анализа минимально-необходимого для этого коэффициента сцепления показана на рис. 6.

Для упрощения физической картины взаимодействия движителя с поверхностью в данном случае пренебрегаем сопротивлением движению, т.е. считаем коэффициент сопротивления $f=0$.

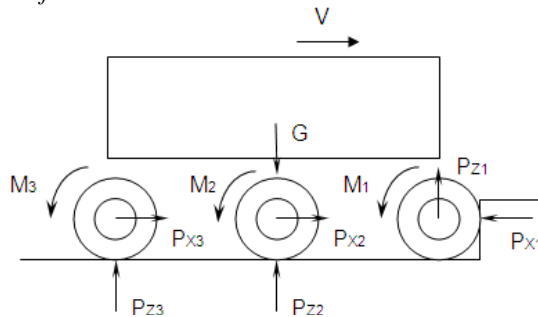


Рис. 6. Расчетная схема преодоления ступеньки

Если принять коэффициент сцепления φ всех колес с поверхностью движения одинаковым, то можем записать следующие выражения для сил тяги колес по сцеплению:

$$P_{x1} \varphi \geq P_{z1}, \quad P_{x2} \leq P_{z2} \varphi, \quad P_{x3} \leq P_{z3} \varphi \quad (14)$$

Условием въезда на ступеньку будет соотношение

$$\varphi^2 (P_{z2} + P_{z3}) \geq P_{z1} \quad (15)$$

Отсюда получаем неравенство

$$\varphi \geq \sqrt{\frac{P_{z1}}{P_{z2} + P_{z3}}}, \quad (16)$$

которое определяет рабочую область коэффициента сцепления при преодолении одиночного препятствия передним колесом.

При знаке равенства это выражение представляет собой минимально-необходимый или требуемый коэффициент сцепления для въезда на ступеньку.

Запишем уравнение суммы сил и реакций на вертикальную ось (см. рис. 3).

$$P_{Z1} + P_{Z2} + P_{Z3} = G \quad (17)$$

С учетом этого равенства получим условия

$$P_{Z1} \leq \frac{G\varphi^2}{1+\varphi^2} \quad \text{и} \quad P_{Z2} + P_{Z3} \geq \frac{G}{1+\varphi^2} \quad (18)$$

Аналогичные выражения получаются также при преодолении ступеньки средним и задним колесами. В этом случае индекс 1 меняется на индекс колеса, преодолевающего препятствие. Индексы 2 и 3 меняются на индексы колес, создающих необходимую для этого силу тяги.

Расчетный анализ по данному критерию производился для случая преодоления одиночного препятствия в форме выступа, высота которого составляет больше радиуса колеса. При этом рассматривался въезд по вертикальной поверхности выступа и переезд через него последовательно первым, вторым и третьим колесами. Для каждого случая рассчитывалась требуемая величина коэффициента сцепления. Результаты расчета представлены в таблице 3. Их можно интерпретировать следующим образом. Для обеих схем подвесок одиночное препятствие наиболее эффективно преодолевается в конфигурации с задним расположением тележек. Однако, при этом все же видно, что схема с трехточечной подвеской выглядит несколько предпочтительней.

Таблица 3

Результаты расчетного анализа необходимых коэффициентов сцепления при преодолении одиночного препятствия

Подвеска		Необходимый коэффициент сцепления φ для преодоления одиночного препятствия			φ для всей машины
		1-м колесом	2-м колесом	3-м колесом	
Rocker-Bogie	Схема RB-1	0,57	0,66	1,08	1,08
	Схема RB-2	0,77	0,61	1,03	1,03
Трехточечная подвеска	Схема ТТ-1	0,61	0,61	1,04	1,04
	Схема ТТ-2	0,53	0,84	0,84	0,84

**Примечание: Величина φ для машины в целом представляет собой наибольшее из трех полученных значений.*

В более общем случае для анализа преодоления одиночного препятствия имеет смысл учитывать возможное различие коэффициентов сцепления для поверхности движения и для препятствия. Например, поверхность может обеспечивать хорошее сцепление колеса с грунтом, а выступающее препятствие, камень, иметь довольно гладкую поверхность.

Рассмотрим задачу преодоления передним колесом выступа при разных коэффициентах сцепления. Обозначим φ - коэффициент сцепления колеса с поверхностью движения, φ_1 - коэффициент сцепления колеса с препятствием.

Тогда:

$$\varphi\varphi_1 \geq \frac{P_{Z1}}{P_{Z2}+P_{Z3}} \quad (19)$$

$$P_{Z1} \leq \frac{G\varphi\varphi_1}{1+\varphi\varphi_1} \quad \text{и} \quad P_{Z2} + P_{Z3} \geq \frac{G}{1+\varphi\varphi_1} \quad (20)$$

Решением этих неравенств являются рабочие области коэффициентов сцепления в системе координат $\varphi = f(\varphi_1)$. Нормальные реакции P_{Zi} находятся из уравнений статического равновесия в виде суммы моментов.

Выполненные по данной методике расчетные исследования показали, что рабочая область коэффициентов сцепления у подвески Rocker-Bogie меньше, чем у трехточечной и, кроме того, ограничена возможным отрывом среднего колеса от грунта.

Этот недостаток, а именно возможность произвольного, непредсказуемого поворота тележки относительно оси ее подвеса на бортовом балансира с отрывом среднего левого колеса, был зафиксирован, например, у марсохода «Спирит» 19 декабря 2009 года (Sol 2120) при попытке выехать передним ходом из песчаной ловушки в месте под названием «Троя». При этом марсоход оставался неподвижным, а крайние колеса левого борта все глубже зарывались в рыхлый грунт [37].

Заключение. Наиболее корректная сравнительная оценка главных компонентов ходовой части шасси планетоходов может быть проведена при правильном сочетании экспериментальных и расчетных методов. Эксперимент необходим, главным образом, при выборе конструкции рассматриваемых в статье металлических ходовых колес, конфигурация которых оказывает решающее влияние на опорную проходимость по деформируемым, слабо связным грунтам.

Известно, что для повышения проходимости необходимо увеличение диаметра наружного обода, но этот параметр, так же, как и ширина колеса ограничены условиями компоновки планетохода на перелетном модуле и возможностями системы энергопитания. Расчетные методы оценки параметров взаимодействия наружного обода колеса с грунтом, которые предложены в качестве критериев оптимизации, проигрывают результатам экспериментальных исследований полноразмерных макетов колес в грунтовых каналах.

Успешная эксплуатация на Луне советских и американских луноходов в прошлом веке, позволяет считать правильным выбор стальной проволочной сетки для организации наружного обода жесткого колеса Лунохода-1 и для упругой шины колеса Lunar Roving Vehicle. Геометрия сетки, шаг, рисунок и высота грунтозацепов жесткого колеса, идентичные параметры шевронов металлоупругого колеса были выбраны в процессе испытаний макетов колес на различных аналогах лунного грунта. В нашем веке с выбором конструктивных параметров обода жесткого колеса согласились и разработчики ходовой части лунохода Юйту.

Невысокие скорости движения современных автоматических планетоходов позволяют получить достаточно корректные сравнительные данные, необходимые для выбора схемы и геометрических параметров подвески, аналитическими методами. Еще в прошлом веке, для оценки опорной проходимости луноходов при движении на предельные подъемы, в качестве критериев оптимизации для упругих подвесок были предложены коэффициенты загрузки мотор-колес. Эти критерии используются и в настоящей статье при анализе двух различных схем неупругих балансирных подвесок современных шести колесных марсоходов и их ходовых макетов.

Численные расчеты выполнены при анализе движения с равномерной скоростью марсоходов с подвесками типа Rocker-Bogie и, макетов марсохода с так называемой трехточечной подвеской. Они показывают, что обе схемы очень близки по нагрузке, но второй вариант имеет некоторые преимущества. Ведь подвески типа Rocker-Bogie имеют межбортовые механизмы в виде полуосей, связанных дифференциалом или в виде качающегося относительно вертикальной оси коромысла, ограничивающие свободу компоновки контейнера и навесного оборудования.

При анализе преодоления одиночных препятствий типа ступеньки или камня в качестве критерия оценки качества схемы подвески в статье принят минимально необходимый коэффициент сцепления колес с грунтом. При этом рассмотрена и ситуация, при которой опорные поверхности движения, с которыми взаимодействуют различные колеса, имеют разные коэффициенты сцепления. Это, например, случай преодоления передним колесом одиночного камня, выступающего из песка. В этой ситуации возможен и был зафиксирован на трассе движения марсохода Spirit, отрыв среднего колеса, что исключено в трехточечной подвеске.

Преимущество последней оказывается еще более убедительным при оснащении колес механизмами шагания, позволяющими регулировать, в определенных пределах, конечно, положение центра масс на продольной оси [33]. Обе подвески, однако, должны быть проанализированы по критерию устойчивости от опрокидывания, что выходит за рамки настоящей статьи.

Методические положения статьи были использованы при анализе компонентов ходовой части самоходных шасси четырех колесных планетоходов в рамках проекта Минобрнауки № 14.576.21.0050, что позволило оптимизировать кинематические схемы приводов и механизмов опорно – движительного модуля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агейкин Я.С.* Вездеходные колесные и комбинированные движители. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. *Агейкин Я.С.* Исследование работы шин переменного давления на деформируемом грунте // Сборник «Проблемы повышения проходимости колесных машин». – М.: АН СССР, 1959. – С. 74-77.
3. *Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М.* Проходимость колесных машин по грунту. – М.: Автотранспорт, 1959. – 208 с.
4. *Бируля А.К.* Исследование взаимодействия колес с поверхностью качения как основа оценки проходимости // Сборник «Проблемы повышения проходимости колесных машин». – М.: АН СССР, 1959.
5. *Бочаров Н.Ф., Гусев В.И., Семенов В.М. и др.* Транспортные средства на высоко эластичных движителях. – М.: Машиностроение, 1974. – 208 с.
6. *Коротконошко Н.И.* Краткий анализ принципиальных схем движителей для бездорожья по результатам экспериментальных работ НАМИ // Труды НАМИ. – Вып. 19. – М.: НАМИ, 1960.
7. *Яковлев А.И.* Конструкция и расчет электромотор–колес. – М.: Машиностроение, 1970. – 240 с.
8. *Bekker M.G.* Introduction to Terrain-Vehicle System. The University of Michigan Press, Ann Arbor. 1969.
9. *Беккер М.Г.* Введение в теорию систем местность–машина. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
10. *Анисов К.С., Мастаков В.И., Иванов О.Г. и др.* Устройство и работа станции «Луна-17» и Лунохода -1 // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / ред. Виноградов А.П. – М.: Наука, 1971. – Т. 1. – С. 7-20.
11. *Леонович А.К., Иванов О.Г., Павлов П.С. и др.* Самоходное шасси Лунохода-1 как инструмент для исследования лунной поверхности // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / ред. Барсуков В.Л. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 25-42.
12. *Александров А.Л., Иванов О.Г., Бабков Ф.И. и др.* Исследование подвижности Лунохода-1 при дистанционном управлении // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / ред. Барсуков В.Л. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 43-47.
13. *Авотиньш Е.В., Бородачев Б.В., Васин Ю.И. и др.* Исследование работоспособности самоходного шасси на Луне // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / ред. Барсуков В.Л. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 47-66.
14. *Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Зезин Р.Б. и др.* Геолого – морфологические исследования лунной поверхности // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / ред. Барсуков В.Л. – М.: Наука. 1978. – Т. 2. – С. 102-135.
15. *Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И. Шварев В.В.* Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.

16. Авотин Е.В., Болховитинов И.С., Кемурджиан А.Л. и др. Динамика планетохода / под ред. Б.Н. Петрова, А.Л. Кемурджиана. – М.: Наука, 1979. – 438 с.
17. Alexander Keturjian. From the Moon Rover to the Mars Rover // The Planetary Report, CA, Pasadena. – 1990. – Vol. X, No. 4. – P. 4-11.
18. Маленков М.И. Создание «Лунохода-1» – выдающееся научно-техническое достижение XX века // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2011. – № 1. – С. 13-21.
19. Zhang YuHua¹, Xiao Jie², Zhang XiaoWei² и др. Design and implementation of Chang'E-3 rover location system // Science China PRESS. – 2014. – P. 483-491.
20. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Кажукало И.Ф. и др. Планетоходы / под ред. Кемурджиан А.Л. – М.: Машиностроение. 1982. – 319 с.
21. Кажукало И.Ф. Колесно-шагающий движитель, как средство повышения проходимости // Передвижение по грунтам Луны и планет / под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 141-185.
22. Кажукало И.Ф., Маленков М.И., Кемурджиан А.Л. Описание и некоторые результаты ходовых испытаний макетов планетоходов // Планетоходы. – 2-е изд. перераб. и доп. / под. Ред. Кемурджиан А.Л. – М.: Машиностроение, 1993. – С. 235-261.
23. Louis D. Friedman, Thomas Heinsheimer. Reasons to Be Proud Lessons of the Great Rover Adventure // The Planetary Report. CA, Pasadena, 1992. – Vol. XII, No. 6. – P. 16-18.
24. Gromov V.V. The Russian Death Valley Experience // The Planetary Report, CA, Pasadena, 1992. – Vol. XII, No. 6. – P. 14.
25. Луис Фридман. Солнечный парус – это технология будущего // Новости Космонавтики. – 2010. – № 09. – С. 70-72.
26. Brian D. Harrington and Chris Voorhees // The Challenges of Designing the Rocker-Bogie Suspension for the Mars Exploration Rover / Proc. of 37 Aerospace Mechanisms Symposium, Jenson Space Center, May 19-21, 2004.
27. Young A.H. Lunar and Planetary Rovers. – Springer, 2007. – P. 212-251.
28. MSL Curiosity Rover. – Режим доступа, <http://mars.jpl.nasa.gov/msl> свободный.
29. Mars Pathfinder Science Objectives. – Режим доступа: http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/science_obj.html, свободный.
30. Mars Exploration Rovers. – Режим доступа: <http://marsrover.nasa.gov/science/objectives.html>, свободный.
31. Kucherenko V., Bogatchev A., M. van Winnendael. Chassis Concepts for ExoMars Rover // In Proc. 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA), ESTEC, Noordwijk, the Netherlands. 2004.
32. Lee C.G-Y., Dalcolmo J., Klinkner S., et al. Design and manufacture of a full size breadboard ExoMars rover chassis // In Proc. 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA), ESTEC, Noordwijk, the Netherlands. 2006.
33. Маленков М.И., Волов В.А., Гусева Н.К., Лазарев Е.А. Анализ подвижности марсоходов для разработки систем передвижения и алгоритмов управления планетоходами нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 82-95.
34. Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 11. – P. 824-831.
35. Apostolopoulos D., Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion, Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.
36. Thomas Thüer. Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots. Metrics and application // Dissertation submitted to Eidgenössische Technische Hochschule Zürich for the degree of Doctor of Technical Sciences № 18160. Zurich, 2009. – 113 p.
37. Spirit Updates. Sols 2118-2124, December 17-24, 2009. – Режим доступа: http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/status_spiritAll_2009.html#sol2118, свободный.

REFERENCES

1. Ageykin Ya.S. Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli [Off-road wheeled and combined propulsion]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 184 p.
2. Ageykin Ya.S. Issledovanie raboty shin peremennogo davleniya na deformiruemom grunte [he research of variable tire pressure on deformable soil], *Sbornik «Problemy povysheniya prokhodimosti kolesnykh mashin»* [Proceedings "problems of increasing the permeability of wheeled vehicles"]. Moscow: AN SSSR, 1959, pp. 74-77.

3. Babkov V.F., Birulya A.K., Sidenko V.M. Prokhozimost' kolesnykh mashin po gruntu [The permeability of wheeled vehicles on the ground]. Moscow: Avtotransport, 1959, 208 p.
4. Birulya A.K. Issledovanie vzaimodeystviya koles s poverkhnost'yu kacheniya kak osnova otsenki prokhozimosti [Investigation of the interaction of the wheels with the rolling surface as the basis of an assessment of the patency of the], *Sbornik «Problemy povysheniya prokhozimosti kolesnykh mashin»* [Collection "problems of increasing the permeability of wheeled machines"]. Moscow: AN SSSR, 1959.
5. Bocharov N.F., Gusev V.I., Semenov V.M. i dr. Transportnye sredstva na vysoko elastichnykh dvizhiteleyakh [Vehicle for highly flexible propulsion]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 208 p.
6. Korotonoshko N.I. Kratkiy analiz printsipial'nykh skhem dvizhiteley dlya bezdorozh'ya po rezul'tatam eksperimental'nykh rabot NAMI [A brief analysis of the concepts of propulsion systems for off-road according to the results of experimental works WE], *Trudy NAMI* [Proceedings of US], Issue 19. Moscow: NAMI, 1960.
7. Yakovlev A.I. Konstruktsiya i raschet elektromotor–koles [Design and calculation of motor–wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 240 p.
8. Bekker M.G. Introduction to Terrain-Vehicle System. The University of Michigan Press, Ann Arbor. 1969.
9. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistem mestnost'–mashina [Introduction to the theory of systems of the area]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 520 p.
10. Anisov K.S., Mastakov V.I., Ivanov O.G. i dr. Ustroystvo i rabota stantsii «Luna-17» i Lunokhoda - 1 [The structure and operation of the station "Luna-17" and Lunokhod -1], *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1], Ed. Vinogradov A.P. Moscow: Nauka, 1971, Vol. 1, pp. 7-20.
11. Leonovich A.K., Ivanov O.G., Pavlov P.S. i dr. Samokhodnoe shassi Lunokhoda-1 kak instrument dlya issledovaniya lunnoy poverkhnosti [Self-propelled chassis Lunokhod-1 as a tool or instrument for studies of the lunar surface], *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1], Ed. Barsukov V.L. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, pp. 25-42.
12. Aleksandrov A.L., Ivanov O.G., Babkov F.I. i dr. Issledovanie podvizhnosti Lunokhoda-1 pri distantsionnom upravlenii [Motility study of Lunokhod-1, with remote control], *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1], Ed. Barsukov V.L. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, pp. 43-47.
13. Avotin'sh E.V., Borodachev B.V., Vasin Yu.I. i dr. Issledovanie rabotosposobnosti samokhodnogo shassi na Lune [The study of health self-propelled chassis on the moon] *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lou-nohad-1], Ed. Barsukov V.L. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, pp. 47-66.
14. Florenskiy K.P., Bazilevskiy A.T., Zezin R.B. i dr. Geologo-morfologicheskie issledovaniya lunnoy poverkhnosti [Geological-morphological research of the lunar surface], *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the moon Lunokhod-1], Ed. Barsukov V.L. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, pp. 102-135.
15. Kemurdzhian A.L., Gromov V.V., Cherkasov I.I. Shvarev V.V. Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Lunny [Automatic stations for studying of a superficial cover of the Moon]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 200 p.
16. Avotin E.V., Bolkhovitinov I.S., Kemurdzhian A.L. i dr. Dinamika planetokhoda [Dynamics of a planetokhod], Ed. by B.N. Petrova, A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Nauka, 1979, 438 p.
17. Alexander Kemurjian. From the Moon Rover to the Mars Rover, *The Planetary Report, CA, Pasadena*, 1990, Vol. X, No. 4, pp. 4-11.
18. Malenkov M.I. Sozdanie «Lunokhoda-1» – vydayushcheesya nauchno-tekhnicheskoe dostizhenie KhKh veka [Development of Lunokhod-1 is a scientific and technical breakthrough of XX Century], *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina* [Vestnik of Lavochkin Association], 2011, No. 1, pp. 13-21.
19. Zhang YuHua1, Xiao Jie2, Zhang XiaoWei2 u dp. Design and implementation of Chang'E-3 rover location system // Science China PRESS. – 2014. – P. 483-491.
20. Kemurdzhian A.L., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. i dr. Planetokhody [Planetokhody], Ed. by Kemurdzhian A.L. Moscow: Mashinostroenie. 1982, 319 p.

21. *Kazhukalo I.F.* Kolesno-shagayushchiy dvizhitel', kak sredstvo povysheniya prokhodimosti [Wheel - walking propulsion - means of increase of cross-country ability], *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [Movement on soil of the Moon and planets], Ed. by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1986, pp. 141-185.
22. *Kazhukalo I.F., Malenkov M.I., Kemurdzhian A.L.* Opisanie i nekotorye rezultaty khodovykh ispytaniy maketov planetokhodov [Description and some results of trial runs of models of planet rovers] *Planetokhody* [Planetokhody]. 2nd ed., Ed. by Red. Kemurdzhian A.L. Moscow: Mashinostroenie, 1993, pp. 235-261.
23. *Louis D. Friedman, Thomas Heinsheimer.* Reasons to Be Proud Lessons of the Great Rover Adventure, *The Planetary Report. CA, Pasadena*, 1992, Vol. XII, No. 6, pp. 16-18.
24. *Gromov V.V.* The Russian Death Valley Experience, *The Planetary Report, CA, Pasadena*, 1992, Vol. XII, No. 6, pp. 14.
25. *Luis Fridman.* Solnechnyy parus – eto tekhnologiya budushchego [Solar sail is in the future], *Novosti Kosmonavтики* [news of Cosmonautics], 2010, № 09, pp. 70-72.
26. *Brian D. Harrington and Chris Voorhees,* *The Ghallenges of Designing the Rocker-Bogie Suspension for the Mars Exploration Rover, Proc. of 37 Aerospace Mechanisms Symposium, Jnson Space Center, May 19-21, 2004.*
27. *Young A.H.* Lunar and Planetary Rovers. Springer, 2007, pp. 212-251.
28. MSL Curiosity Rover. Free access: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl>.
29. Mars Pathfinder Science Objectives. Free access: http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/science_obj.html.
30. Mars Exploration Rovers. Free access: <http://marsrover.nasa.gov/science/objectives.html>.
31. *Kucherenko V., Bogatchev A., M. van Winnendael.* Chassis Concepts for ExoMars Rover, *In Proc. 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA), ESTEC, Noordwijk, the Netherlands. 2004.*
32. *Lee C.G-Y., Dalcolmo J., Klinkner S., et al.* Design and manufacture of a full size breadboard ExoMars rover chassis, *In Proc. 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA), ESTEC, Noordwijk, the Netherlands. 2006.*
33. *Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A.* Analiz podvizhnosti marsokhodov dlya razrabotki sistem peredvizheniya i algoritmov upravleniya planetokhodami novogo pokoleniya [Evaluation Mars Rovers movability for the Purpuse of Development of Locomotion System and Algorithms of Control;of new Generation Planet Rovers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 82-95.
34. *Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A.* Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms, *Russian Engineering Research*, 2015, Vol. 35, No. 11, pp. 824-831.
35. *Apostoulopoulos D.,* Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion, *Ph.D. Thesis, Carnegie–Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.*
36. *Thomas Thüer.* Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots. Metrics and application, *Dissertation submitted to Eidgenössische Technische Hochschule Zürich for the degree of Doctor of Technical Sciences № 18160. Zurich*, 2009, 113 p.
37. Spirit Updates. Sols 2118-2124, December 17-24, 2009. Free access: http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/status_spiritAll_2009.html#sol2118.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Наумов

Маленков Михаил Иванович – Акционерное общество научно-технический Центр «РОКАД»; e-mail: m.i.malenkov@gmail.com; 193230, Санкт-Петербург, Искровский проспект, 21 кв. 153; тел.: 89219222977; гл. научный сотрудник; д.т.н.; профессор.

Волов Валерий Анатольевич – Общество с ограниченной ответственностью «АКТРОН»; e-mail: v.volov@online.de; Санкт-Петербург, Брестский бульвар, 11/36, кв. 189; ведущий научный сотрудник; к.т.н.

Malenkov Mikhail Ivanovich – STC “ROCAD” Co. Ltd.; e-mail: m.i.malenkov@gmail.com; 193230, St. Petersburg, Iskrovski prospect, 21-153; phone: +79219222977; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Volov Valeriy Aynjl'evich – “ACTRON” Co. Ltd.; e-mail: v.volov@online.de; St. Petersburg, Brestski boul, 11/36, 189; cand. of eng. sc.; leading researcher.