

УДК 623.437.3.093; 629.1.032.001; 629.36

**Р.Ю. Добрецов¹, Е.Г. Борисов², В.И. Кучеренко³,
А.Н. Богачев³, С.И. Матросов³**

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

³ЗАО «Ровер», Санкт-Петербург, Россия

СФЕРИЧЕСКИЙ РОБОТ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Объектом исследования является шасси сферического робота. Цель работы – предложить расчетные методики, позволяющие на этапе проектирования машины оценить параметры подвижности. Рассмотрены основные особенности шасси сферического робота, кратко описаны возможные области применения таких машин. Отмечены эксплуатационные и технические особенности, определяющие интерес к шасси со сферическим двигателем как к платформе для размещения средств экологического мониторинга. Кратко рассмотрен вопрос выбора типа привода для сферического робота и приведено описание технических решений, реализованных в конструкции опытного образца шасси. Предложена математическая модель взаимодействия сферического двигателя с деформируемым основанием, особенностью которой является аппроксимация нормальной нагрузки параболической зависимостью. Модель позволяет прогнозировать заглубление шасси сферического робота в деформируемое основание и служит основой для прогнозирования энергозатрат на движение, а также может быть использована при проектировочном тяговом расчете (выборе мощности приводов управления маятником, оценки длительности периода автономной работы шасси и др.). Приведены результаты расчетов для движения машины на песчаном грунте при различных значениях массы шасси и радиуса сферической оболочки. Проведена типизация препятствий и предложены методы расчетной оценки возможности преодоления препятствий основных типов. Сформулированы пути повышения устойчивости движения сферического робота. Определены перспективы встраивания сферического робота в состав мультягентной системы.

Ключевые слова: сферический робот, транспортное средство, двигатель, подвижность, устойчивость, управляемость, взаимодействие двигателя с грунтом.

**R.Iu. Dobretsov¹, E.G. Borisov², V.I. Kucherenko³,
A.N. Bogachev³, S.I. Matrosov³**

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

²The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Communication,
St. Petersburg, Russian Federation

³Rover Company Ltd, St. Petersburg, Russian Federation

SPHERICAL ROBOT AS A PLATFORM FOR THE PURPOSE OF ECOLOGICAL MONITORING

The object of study is the chassis of a spherical robot. Purpose – to offer computational techniques at the design stage of the machine to estimate the parameters of the mobility. The basic features of the chassis of a spherical robot, describes briefly the possible applications of these machines. Dedicated operational and technical characteristics that determine the interest in the chassis with a spherical

engine as a platform for allocation of funds for environmental monitoring. Briefly considered the question of choosing the type of actuator for the spherical robot and a description of the technical solutions implemented in the construction of the prototype chassis. A mathematical model of interaction of spherical propeller with a deformable base. A feature of the model is to approximate the normal load, a parabolic dependence. The model allows to predict the depth of the chassis of the robot in a spherical deformable base and serves as the basis for projecting energy consumption for the movement, and can also be used in the design of traction calculation (the choice of power drives control the pendulum, estimate the duration of period of Autonomous operation of the landing gear, etc.). Results of calculations for the movement of the machine on sandy soil for different values of the mass of the chassis and the radius of the spherical shell. Classified obstacles and proposed methods of estimating the possibility of overcoming the obstacles of the main types. Formulated ways to increase the stability of motion of the spherical robot. Affected the prospects of embedding the spherical robot in the composition multientry system.

Keywords: spherical robot, vehicle, propulsion, mobility, stability, controllability, interaction of the propeller with the ground.

Сферические роботы – автономные или дистанционно управляемые транспортно-технологические машины, формально объединенные конструктивным признаком – наличием в том или ином виде замкнутой оболочки, используемой в качестве опорной поверхности контактного движителя.

Преимущественно сферические роботы предназначены для сбора информации и, как правило, являются платформой для установки оборудования, используемого для бесконтактного обследования объектов и окружающей среды (видеокамеры, радары, лидары, датчики радиационного излучения, тепловые датчики и др.). В этом случае оболочка робота должна быть прозрачна для носителя информации, используемого установленной аппаратурой (например, оптически прозрачная оболочка в случае установки видеокамеры).

Сферические роботы могут быть заключены в частично или радикально трансформируемый сферический корпус, допускающий контактное взаимодействие оборудования, установленного на платформе, с объектами и окружающей средой. В этом случае сферические роботы могут использоваться, например, для забора проб.

Основными эксплуатационными особенностями сферических роботов являются:

- максимальная защита бортовой аппаратуры, расположенной внутри герметичного, ударопрочного корпуса, от внешнего воздействия (в том числе при столкновении с препятствием);
- форма и материал корпуса, обеспечивающие легкую очистку, дезинфекцию и дегазацию корпуса;
- возможность эксплуатации в сложных климатических условиях, при значительных изменениях температуры, влажности, давления;

- возможность быстрого набора скорости, изменение направления движения и способность начинать движение в любом направлении (омнимобильность), способность преодолевать препятствия;
- высокая экономичность и проходимость, в том числе на грунтах с низкой несущей способностью; в принципе, шасси может сохранять управляемость на плаву;
- сферическая форма, позволяющая осуществлять движение в плотно ограниченных пространствах.

Дальность связи с постом контроля определяется возможностями бортовой аппаратуры и мощностью бортового источника энергии. Увеличение дальности связи в общем случае ведет и к росту массы робота. При использовании мультиагентной системы мониторинга роботы могут выполнять функцию ретрансляции сигнала, тем самым увеличивается дальность связи при сохранении массы отдельных шасси.

Перечисленные особенности делают шасси сферического робота перспективной платформой для размещения оборудования, предназначенного для экологического мониторинга. Некоторый опыт использования подобных роботов в агротехническом комплексе накапливается за рубежом (например, робот ROSPHERE, разработанный в Мадридском политехническом университете [1]). Хорошие ходовые качества на снегу и слабых грунтах показывает сферический робот ROTUNDUS (Швеция) [2].

К настоящему времени в качестве механизма привода для сферических роботов опробованы различные устройства (гироскопический привод, маятниковый механизм, привод от колес омни-тележки, за счет деформации сферического корпуса и др.). С использованием материалов [3–6], а также результатов выполненного патентного поиска и на основе опыта конструирования шасси роботов и планетоходов, накопленного ЗАО «Ровер» (Санкт-Петербург) [7], был проведен сравнительный анализ приводов сферических роботов. Системы привода сопоставлялись по различным параметрам: обеспечение омнимобильности; эффективность при преодолении малых препятствий и уклонов (препятствия до 5–10 % от радиуса сферы, мм, уклоны до 5–10°) и выраженных препятствий; эффективность передачи тяги на движитель; точность отработки траектории; средняя скорость на траектории; надежность; экономичность; ресурс; ожидаемая себестоимость изготовления и др. Для мультисенсорной платформы, способной выполнять функции экологического мониторинга, был выбран маятниковый при-

вод с возможностью позиционирования маятника по трем независимым координатам. Сконструировано шасси массой 4 кг, несущее автономный источник энергии (аккумуляторная батарея). Мощность привода составила 22 Вт. Радиус сферы 0,2 м (рис. 1).

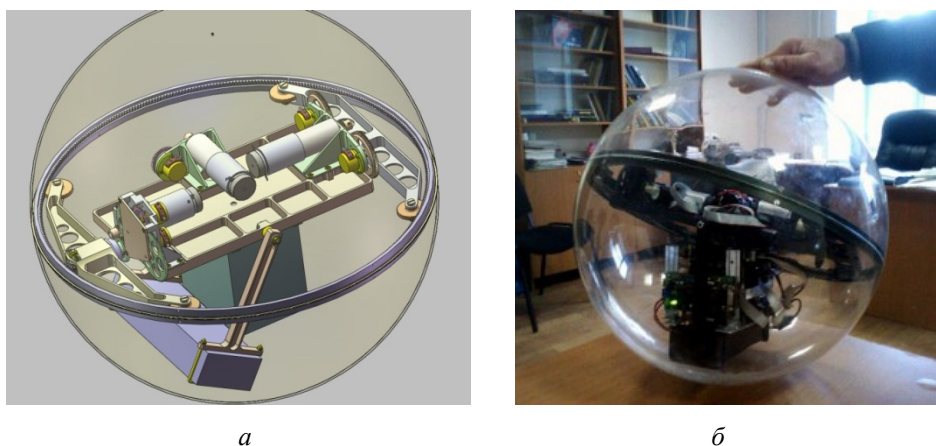


Рис. 1. Прототип сферического робота конструкции ЗАО «Ровер»: *а* – 3D-модель; *б* – один из полноразмерных макетов

Конструктивно прозрачный корпус прототипа сферического робота состоит из двух половин. Половины корпуса скрепляются механически, на данном этапе герметизация стыка корпуса не проводится.

Стыковка полусфер производится по металлическому кольцу, являющемуся одновременно направляющей для роликов центрального аппаратного блока.

Стыковка по кольцу позволяет обеспечить герметичность корпуса при сохранении принципиальной возможности его разборки (например, с целью заряда батареи).

Аккумуляторная батарея выполняет функцию груза маятникового механизма, для управления которым используются три независимых привода (шаговые электродвигатели с шестеренчатыми вальными редукторами): по «долготе», «широте» и «крену». Передаточные отношения редукторных блоков являются постоянными величинами.

Направление движения робота задается путем отклонения груза маятника от положения равновесия. Скорость движения и ускорение будут зависеть от значения углов отклонения маятника и параметров сопротивления движению шасси во внешней среде (сопротивление качению, аэродинамическая составляющая, внешние возмущения и др).

Важной особенностью движителя сферического робота является существенная зависимость площади контакта с опорным основанием от характеристик самого основания. Вместе с тем выполненные конструкции сферических роботов характеризуются очень низкими давлениями на грунт, исключающими нанесение существенных повреждений большинству связных грунтов [8]; происходит передача нормальных нагрузок, отличная от случаев колесного и гусеничного движителей. Наиболее близким аналогом оказывается цилиндроконическое колесо, примененное в конструкции планетохода [9] и предложенное в составе движителя рекогносцировочной колесно-шагающей машины [10].

На недеформируемом основании при качении сферического робота теоретически имеет место точка контакта (в первом приближении параметры контакта можно определить по формуле Беляева – Герца). В процессе заглупления сферы в деформируемое основание площадь контактной поверхности растет.

На рис. 2 показана расчетная схема, использованная при моделировании погружения сферического робота в деформируемый грунт.

Для определения глубины погружения движителя сферического робота в деформируемый грунт выберем закон распределения нагрузки по площади контактной поверхности. По опыту моделирования эпюр нормальных реакций под опорным катком гусеничной машины [11, 12] хорошие результаты дает рассмотрение «плоского» случая с представлением распределенной нагрузки в виде параболы с максимумом в геометрическом центре поверхности контакта (см. рис. 2).

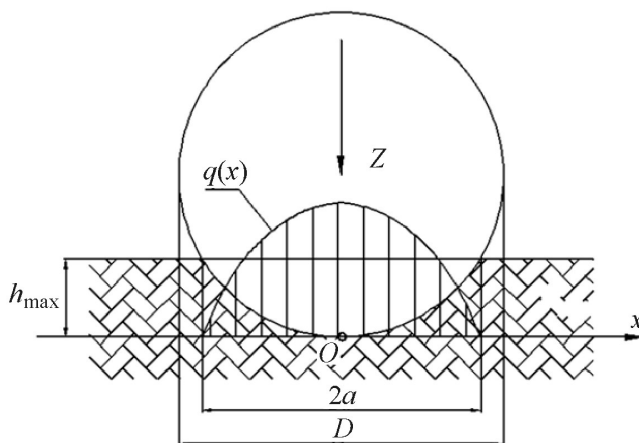


Рис. 2. Аппроксимация распределенной нагрузки параболой

Таким образом, параболический закон распределения нагрузки по длине контактного пятна дает зависимость $q(x) = k \cdot (a^2 - x^2)$, где $k = 0,75Z/a^3$ – коэффициент, выбираемый из условия

$$\int_{-a}^a q(x) dx = Z.$$

Здесь Z – вертикальная нагрузка на сферу (в простейшем случае $Z = mg$, где m – масса робота); a – радиус отпечатка на грунте.

Среднее давление на грунт можно определить как соотношение вертикальной нагрузки на сферу и площади шарового сегмента, погруженного в грунт. Напомним, что шаровым сегментом называется часть шара, отсекаемая плоскостью.

Обозначим: h – высота сегмента, r – радиус основания сегмента, h_{\max} – глубина погружения, D – диаметр сферы.

Площадь шарового сегмента (собственно отсеченной сферической поверхности)

$$S_{\text{сегм}} = \pi(h^2 + r^2).$$

Таким образом, площадь контактной поверхности (контактного пятна) в обозначениях, использованных на рис. 1 для сферы на деформируемом грунте, и среднее давление на грунт:

$$F_k = \pi(h^2 + 4a^2) \text{ и } q_{\text{ср}} = \frac{Z}{\pi(h_{\max}^2 + 4a^2)}.$$

Из геометрических построений можно получить связь между радиусом отпечатка и наибольшей глубиной погружения (рис. 3):

$$h_{\max} = 0,5 \cdot (D - \sqrt{D^2 - 4a^2}). \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет получить и применить при расчете среднего нормального давления зависимость

$$a = \sqrt{(D - h_{\max}) \cdot h_{\max}}. \quad (2)$$

Используя принятые в транспортном машиностроении представления о связи между нагрузкой и осадкой деформируемого грунта, запишем [13, 14]:

$$q(x) = (k_c + bk_\phi)[z(x)]^n.$$

Здесь $z(x)$ – деформация грунта при приложении вертикальной нагрузки $q(x)$; k_c, k_ϕ, n – эмпирические коэффициенты, характеризующие осадку грунта при приложении вертикальной нагрузки на штамп шириной b .

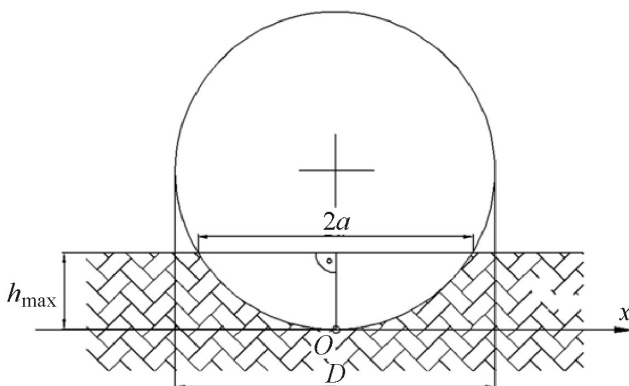


Рис. 3. К определению связи между радиусом отпечатка и максимальной глубиной погружения сферы

В случае сферы характерный размер штампа – диаметр, таким образом, $b = 2a$, следовательно,

$$h_{\max} = \sqrt[n]{\frac{q_{\max}}{(k_c + bk_\phi)}}.$$

Максимальное значение вертикальной нагрузки $q_{\max} = 0,75Z/a$.

Получаем

$$h_{\max} = \sqrt[n]{\frac{0,75Z/a}{(k_c + bk_\phi)}}. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет определить (при известных значениях параметров k_c, k_ϕ, n) значения a и h_{\max} .

Параметры песчаного грунта приняты по источникам [13, 14]:

$$k_c \approx 2,3 \text{ кг/см}^{1+n}; \quad k_\phi \approx 0,2 \text{ кг/см}^{2+n}; \quad n \approx 0,42. \quad (4)$$

Совместное решение (1) и (3) при подстановке (4) произведено численно. При оценке глубины погружения сферического робота массой 4 кг, с диаметром сферы 0,4 м в песок получены значения $a = 43$ мм и $h_{\max} = 5$ мм.

Результаты расчетов среднего нормального давления для различных значений радиуса сферы и массы машины представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости $q_{\text{ср}}(m, R)$ на песчаном грунте с параметрами

$$k_c \approx 2,3 \text{ кг/см}^{1+n}; k_\phi \approx 0,2 \text{ кг/см}^{2+n}; n \approx 0,42$$

$q_{\text{ср}}(m, R)$, кг/см ²		Масса шасси, кг			
		4	6	8	10
Радиус сферы, м	0,2	0,17	0,22	0,26	0,31
	0,4	0,12	0,16	0,19	0,23
	0,6	0,10	0,13	0,16	0,18

Разработанная модель может быть применена в составе методики оценки энергозатрат на движение шасси [15].

Уже существующий опыт эксплуатации сферических роботов [2, 3] показывает, что сферический движитель позволяет передвигаться по снежной целине, на сыпучих и связных грунтах с низкой несущей способностью, а также (для герметичных конструкций с положительной плавучестью) на воде.

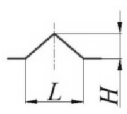
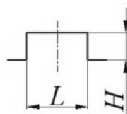
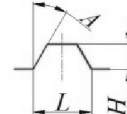
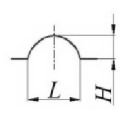
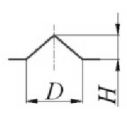
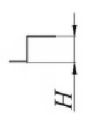
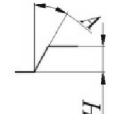
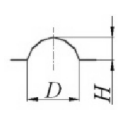
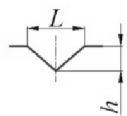
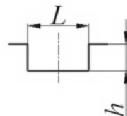
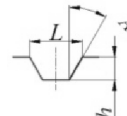
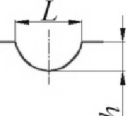
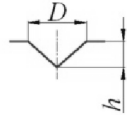
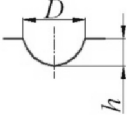
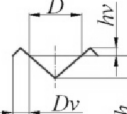
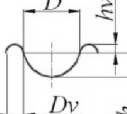
Вопрос обеспечения подвижности сферического робота связан с проблемой преодоления препятствий. Типизация препятствий (неровностей) приведена в табл. 2 [16].

Таким образом, ключевыми параметрами оказываются высота преодолеваемой стенки, ширина преодолеваемого углубления (рва) и угол подъема (спуска) поверхности движения.

В работе [17] подробно рассматривается модель процесса преодоления одиночного ступенчатого препятствия цилиндрическим деформируемым колесом. Существенным отличием движителя сферического робота является тот факт, что вся нормальная нагрузка, обусловленная в первую очередь весом шасси, передается на грунт сферической оболочкой через весьма ограниченное контактное пятно. Также робот может обладать запасом энергии в виде инерции вращающейся оболочки (возможно использовать принцип маховичного накопителя для увеличения этого запаса энергии); сферический робот чувствителен к воздействию поперечных сил и практически не обладает запасом статической поперечной устойчивости.

Таблица 2

Поперечные сечения неровностей

Вид неровностей	Форма неровностей			
	треугольные	прямоугольные	трапециевидные	скругленные
Камень, валик				
Холм, ступень				
Ров				
«Кратер» без валика		-	-	
«Кратер» с валиком		-	-	

Как видно из табл. 2, каждое препятствие может быть представлено в виде сочетания характерных элементов: комбинации порогов, углублений (каналов, ровов), наклонных поверхностей. Первичная оценка возможности преодоления препятствия может быть проведена на основе анализа проходимости машины на комбинации простых препятствий. Однако в общем случае нужно учитывать и другие условия внешней среды, не исчерпываемые особенностями рельефа.

Для оценки высоты преодолеваемого препятствия предполагаем, что вся запасенная энергия катящейся сферы расходуется на подъем машины на препятствие. Потери энергии, связанные с трением о препятствие, не учитываем. Предполагаем, что сцепной вес сферического робота равен весу машины, а сфера практически не деформируется при преодолении препятствия; эффект удара о препятствие не учитывается.

Кинетическая энергия шасси складывается из двух составляющих (рассматривается поступательное и вращательное движение):

$$E_k = 0,5m\dot{x}^2 + 0,5I\omega^2.$$

В этой зависимости m и I – масса и момент инерции катящегося тела; \dot{x} и ω – линейная и угловая скорости движения.

Момент инерции сферы

$$I_c = 2mr_c^2/3 \approx 0,67mr_c^2,$$

где $r_c = D/2$ – радиус сферы.

Угловая скорость связана с линейной соотношением

$$\omega = \dot{x}/r_c.$$

Получаем

$$E_k = 1,67m\dot{x}^2/2 = 0,835m\dot{x}^2.$$

Для выполненной конструкции при движении с заявленной максимальной скоростью 0,7 м/с получаем, что шасси обладает запасом кинетической энергии не менее 1,6 Дж. «Эквивалентная» высота преодолимого препятствия (без учета эффекта отскакивания сферы при соударении с порогом)

$$h^* = 0,835\dot{x}^2/g.$$

Таким образом, высота преодолимого препятствия составляет до 42 мм (около 10 % от диаметра сферы). Увеличить высоту можно путем повышения мощности привода (и, следовательно, скорости движения), особыми алгоритмами управления, обеспечивающими форсированный разгон перед препятствием, или за счет применения инерционного накопителя энергии.

В статической постановке задачи ширина преодолеваемого углубления ограничивается диаметром основания шарового сегмента (см. рис. 3), соответствующего максимальной высоте преодолеваемого порога. Для оценки ширины углубления можно использовать выражение (2) в виде

$$B_{\max} = \sqrt{(D - h^*) \cdot h^*}.$$

Оценочный расчет дает прохождение препятствия глубиной 42 мм и шириной 123 мм (около 30 % диаметра сферы).

Низкая устойчивость против действия боковых сил (гравитационного, аэродинамического и иного происхождения) является слабым местом сферических роботов. Несмотря на то, что робот не может «перевернуться» или «упасть на бок» и сохраняет контакт с опорным основанием при любых положениях корпуса, влияние боковых возмущений существенно искажает траекторию движения и затрудняет преодоление препятствий. На деформируемом грунте поперечная устойчивость сферического робота повышается за счет сопротивления перемещению, оказываемого стенками формируемой колеи.

Угол подъема ограничивается для сферического робота в первую очередь мощностью привода (за исключением случая подъема по обледенелой поверхности, когда коэффициент сцепления столь мал, что качение практически невозможно). Преодолевать подъемы целесообразно за счет инерции, осуществляя разгон перед препятствием. Преодоление подъема с углом естественного откоса сыпучего грунта представляется невозможным.

Мощность привода и условия сцепления с грунтом ограничивают также возможность управляемого спуска. Однако при отсутствии в конце трассы выбега препятствий, угрожающих ударом, возможен неуправляемый спуск. На грунтах с хорошими сцепными свойствами качение возможно при значении угла наклона поверхности практически до 30° .

Адаптация робота к выполнению конкретных задач (в первую очередь к параметрам преодолеваемых препятствий в предполагаемой среде функционирования), необходимость размещения более крупногабаритного оборудования, требование по увеличению длительности автономной работы обусловят необходимость изменения диаметра сферы, увеличения массы шасси и мощности приводов. Однако освоенные технологии проектирования и производства позволят вносить такие изменения без радикального изменения стоимости машины. Адаптация сферического робота к работе в составе мультиагентной системы потребует в основном внесения изменений в алгоритмы управления и мало затронет конструкцию шасси.

Проведенные проектно-конструкторские работы и выполненные расчеты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Сферический робот может быть использован в качестве платформы для размещения оборудования с целью ведения мониторинга экологической обстановки, выполнения агротехнических задач и т.д.

Шасси такого робота обладает достаточными подвижностью и автономностью, обеспечивает защиту бортового оборудования от воздействия окружающей среды, реализует малое давление на грунт и в принципе является плавающим.

2. За счет достаточно простых мероприятий шасси позволяет разместить оборудование, работа которого требует контакта с объектом наблюдения (например, устройства для забора проб из внешней среды). При этом сохраняется высокая защищенность бортового оборудования.

3. На основе единичных сферических роботов могут быть организованы мобильные сети динамического мониторинга, а отдельные роботы – объединены в мультиагентную систему.

Список литературы

1. Роботы и робототехника [Электронный ресурс]. – URL: http://www.prorobot.ru/09/ROSPHERE_shar.php (дата обращения: 25.09.2015).

2. Rotundus AB. – URL: <http://www.rotundus.se/> (дата обращения: 25.09.2015).

3. Chase R., Pandya A. A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots // *Robotics*. – 2012. – No. 1. – P. 3–23. DOI: 10.3390/robotics1010003

4. Modeling and Simulation of a Spherical Mobile Robot / Sang Shengju, Zhao Jichao, Wu Hao, Chen Shoujun, An Qi // *ComSIS*. – 2010. – Vol. 7, no. 1, special issue. – P. 51–62.

5. Kinetic Model for a Spherical Rolling Robot with Soft Shell in a Beeline Motion / Zhang Sheng, Fang Xiang, Zhou Shouqiang, Du Kai // *Journal of Multimedia*. – 2014. – Vol. 9, no. 2. – P. 223–229. DOI: 10.4304/jmm.9.2.223-229

6. Chunfeng Yue, Shuxiang Guo, Liwei Shi. Hydrodynamic Analysis of the Spherical Underwater Robot SUR-II // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2013. – Vol. 10, no. 247. – P. 1–12. DOI: 10.5772/56524

7. Moving Eye – interactive Telepresence over internet with a Ball Shaped mobile Robot Publication type / P. Harmo, A. Halme, H. Pitkänen, P. Virekoski, M. Halinen, J. Suomela // *IFAC Telematic Conference*. – 2001. – P. 1–6.

8. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.

9. Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю., Матросов С.И. Адаптивные шасси подвижных роботов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. – 2013. – № 3 (178). – С. 230–237.

10. Выбор прототипа шасси наземного робота-разведчика / Е.В. Авотин, Р.Ю. Добрецов, С.И. Матросов, В.Н. Петрига // Вестник Академии военных наук. – 2011. – № 2(35) – С. 102–106.

11. Бойков А.В., Добрецов Р.Ю., Мазур А.И. Физико-математическая модель процесса взаимодействия опорной ветви движителя транспортной гусеничной машины с недеформируемым основанием // Вестник молодых ученых. Сер.: Технические науки. – 1999. – № 1. – С. 14–25.

12. Добрецов Р.Ю. Особенности работы гусеничного движителя в области малых удельных сил тяги // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – № 6. – С. 25–31.

13. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.

14. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.

15. Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю. Метод расчета энергозатрат на движение колесной транспортной машины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. – 2012. – № 4 (159). – С. 168–172.

16. Динамика планетохода / Е.В. Авотин, И.С. Болховитинов, А.Л. Кемурджиан [и др.]. – М.: Наука, 1979. – 440 с.

17. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

References

1. Roboty i robototekhnika [Robots and Robotics], available at: http://www.prorobot.ru/09/ROSPHERE_shar.php (accessed 25 September 2015).

2. Rotundus A.B., available at: <http://www.rotundus.se/> (accessed 25 September 2015).

3. Chase R., Pandya A. A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots. *Robotics*, 2012, no. 1, pp. 3-23. DOI: 10.3390/robotics1010003

4. Sang Shengju, Zhao Jichao, Wu Hao, Chen Shoujun, An Qi. Modeling and Simulation of a Spherical Mobile Robot. *ComSIS*, 2010, vol. 7, no. 1, special issue, pp. 51-62.

5. Zhang Sheng, Fang Xiang, Zhou Shouqiang, Du Kai. Kinetic Model for a Spherical Rolling Robot with Soft Shell in a Beeline Motion. *Journal of Multimedia*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 223-229. DOI: 10.4304/jmm.9.2.223-229

6. Chunfeng Yue, Shuxiang Guo, Liwei Shi. Hydrodynamic Analysis of the Spherical Underwater Robot SUR-II. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, no. 247, pp. 1-12. DOI: 10.5772/56524.

7. Harmo P., Halme A., Pitkänen H., Virekoski P., Halinen M., Suomela J. Moving Eye – interactive Telepresence over internet with a Ball Shaped mobile Robot Publication type. *IFAC Telematic Conference*, 2001, pp. 1-6.

8. Kuliashov A.P., Kolotilin V.E. Ekologichnost' dvizhitelei transportno-tehnologicheskikh mashin [Environmentally friendly propulsion of transport and technological vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 288 p.

9. Avotin E.V., Dobretsov R.Iu., Matrossov S.I. Adaptivnye shassi podvizhnykh robotov [Adaptive chassis mobile robots]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya "Nauka i obrazovanie"*, 2013, no. 3, pp. 230-237.

10. Avotin E.V., Dobretsov R.Iu., Matrossov S.I., Petruga V.N. Vybora prototipa shassi nazemnogo robota-razvedchika [The choice of the prototype chassis ground robot scout]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, no. 2, pp. 102-106.

11. Boikov A.V., Dobretsov R.Iu., Mazur A.I. Fiziko-matematicheskaya model' protsessa vzaimodeistviia opornoj vetvi dvizhitelia transportnoi gusenichnoi mashiny s nedeformiruемым osnovaniem [Physico-mathematical model of the process of interaction of the support branches of the mover of the vehicle a tracked vehicle with a rigid base]. *Vestnik molodykh uchenykh. Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 1999, no. 1, pp. 14-25.

12. Dobretsov R.Iu. Osobennosti raboty gusenichnogo dvizhitelia v oblasti malykh udel'nykh sil tiagi [Features of work caterpillar drive in the region of low specific thrust forces]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennyye mashiny*, 2009, no. 6, pp. 25-31.

13. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' – mashina [Introduction to Terrain-Vehicle Systems]. Moscow: Mashinostroenie. 520 p.

14. Ageikin Ia.S. Prokhozimost' avtomobilei [The flow of cars]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 230 p.

15. Avotin E.V., Dobretsov R.Iu. Metod rashcheta energozatrat na dvizhenie kolesnoi transportnoi mashiny [The method of calculating energy consumption for the movement of wheeled transport vehicle]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya "Nauka i obrazovanie"*, 2012, no. 4, pp. 168-172.

16. Avotin E.V., Bolkhovitinov I.S. Kemurdzhian A.L. [et al.] Dinamika planetokhoda [Dynamics of a Rover]. Moscow: Nauka, 1979. 440 p.

17. Smirnov G.A. Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin [The theory of motion of wheeled vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 352 p.

Получено 2.10.2015

Об авторах

Добрецов Роман Юрьевич (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Двигатели, автомобили и гусеничные машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: dr-idpo@yandex.ru).

Борисов Евгений Геннадьевич (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Двигатели, автомобили и гусеничные машины» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1, e-mail: begspb1967@mail.ru).

Кучеренко Владимир Иванович (Санкт-Петербург, Россия) – заслуженный конструктор РФ, главный конструктор ЗАО «Ровер» (198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная (Горелово), 2, e-mail: vikrc@mail.ru).

Богачев Алексей Николаевич (Санкт-Петербург, Россия) – главный инженер ЗАО «Ровер» (198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная (Горелово), 2, e-mail: rcland@mail.ru).

Матросов Сергей Ильич (Санкт-Петербург, Россия) – почетный машиностроитель РФ, генеральный директор ЗАО «Ровер» (198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная (Горелово), 2, e-mail: rover@peterlink.ru).

About the authors

Roman Iu. Dobretsov (St.Petersburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Engines, Automobiles and Tracked Vehicles, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: dr-idpo@yandex.ru).

Eugenii G. Borisov (St.Petersburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor Department of Engines, Automobiles and Tracked Vehicles, St.Petersburg Telecommunication University (22/1, Bolshevikov, St.Petersburg, 193232, Russian Federation, e-mail: begspb1967@mail.ru).

Vladimir I. Kucherenko (St.Petersburg, Russian Federation) – Honorable Designer of Russia, RCL Chief Designer, Rover Company Ltd (2, Zarechnaya st., St.Petersburg, 198323, Russian Federation, e-mail: vikrcl@mail.ru).

Aleksei N. Bogatchev (St.Petersburg, Russian Federation) – RCL Chief Engineer, Rover Company Ltd (2, Zarechnaya st., St. Petersburg, 198323, Russian Federation, e-mail: rclanb@mail.ru).

Sergei I. Matrosov (St.Petersburg, Russian Federation) – Honorable Mashine Builder of Russia, Director general, Rover Company Ltd (2, Zarechnaya st., St.Petersburg, 198323, Russian Federation, e-mail: rover@peterlink.ru).