

УДК 629.03 + 539.3

## Транспортное средство высокой проходимости с эласто-винтовым двигателем

**К.Е. Бяков, Чан Ки Ан, Ф.Д. Сорокин, К.Ю. Машков**

*Для развития приполярных областей России с суровым климатом и почти полным отсутствием коммуникаций актуальной задачей является создание внедорожных транспортных средств высокой проходимости с достаточной мобильностью. В статье проанализировано несколько типов шасси высокой проходимости, апробированных в мировой практике конструирования двигателей, в том числе роторно-винтовых двигателей с жесткой оболочкой. Используя инновационные технологии в области эластомеханики, предложена конструкция воздухоопорного двигателя машины высокой проходимости на основе роторно-винтовой ходовой части с гибкой оболочкой, позволяющая регулировать эксплуатационные параметры шнеков в зависимости от режима движения. Разработана методика расчета и построения равновесных профилей сетчатых оболочек несимметричной укладкой нитей, позволяющая оценить работоспособность предложенной конструкции воздухоопорного двигателя. Результаты исследования доказывают возможность расширения эксплуатационных параметров эластичного роторно-винтового двигателя, что обеспечивает повышение тягово-динамических параметров движения машин по снегу, по переувлажненным и жидким грунтам.*

**Ключевые слова:** машина высокой проходимости, роторно-винтовой двигатель, сетчатая оболочка, несимметричная укладка нитей.

## All-terrain vehicles with elastic screw propellers

**K.E. Byakov, Chan Ki An, F.D. Sorokin, K.Yu. Mashkov**

*The development of Russian Polar Regions is hindered by a harsh climate and the almost total lack of routes of communication. Under these conditions, an urgent task is to create off-road all-terrain vehicles possessing a sufficient mobility. The paper analyzes several types of all-terrain chassis tested in the world practice of designing propellers including rotary-screw propellers with rigid covers. Using innovative technologies in elastomechanics, a construction of the air-supported propeller of an all-terrain vehicle is proposed. The construction comprises rotary-screw chassis with a flexible shell and makes it possible to control operating parameters of the screws depending on the motion regimes. A method of calculation and construction of equilibrium lattice shell profiles by unsymmetrical laying of yarns is proposed. The method makes it possible to assess the performance of the proposed air-supported propeller. The results of research demonstrate the possibility of using the elastic rotary-screw propeller for moving*



**БЯКОВ**  
Константин Евгеньевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
**BYAKOV**  
Konstantin Evgen'yevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**ЧАН Ки Ан**  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
**CHAN Ki An**  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**СОРОКИН**  
Федор Дмитриевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
**SOROKIN**  
Fedor Dmitriyevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**МАШКОВ**  
Константин Юрьевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
**MASHKOV**  
Konstantin Yur'yevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

*on the snow and hydromorphic and liquid soils with elevated dynamic and traction parameters.*

**Keywords:** all-terrain vehicle, rotary-screw propeller, lattice shell, unsymmetrical laying of yarns.

Наметившееся в последние годы глобальное потепление климата Земли обусловило благоприятные перспективы для экономического развития приполярных областей России, Северо-Тихоокеанского побережья США и Канады. В России арктический регион представляет собой огромную территорию более 9 млн км<sup>2</sup>, на которой находится половина объемов запасов газа, 90 % углеводов, 98 % алмазов, 90 % золота и другие полезные ископаемых.

Предполагаемые в ближайшее время вложения 2 трлн руб. в развитие северных территорий России увеличат вклад арктического региона в экономику страны более чем вдвое. К 2020 г. он составит 14% в общем объеме ВВП против сегодняшних 6% [1]. В этих условиях Североморской путь между Европой и странами Азиатско-Тихоокеанского региона приобретает глобальный статус евроазиатского транспортного коридора.

Не следует забывать, что Арктика — это государственная граница и активное освоение арктического шельфа неизбежно приведет к конфликту интересов между странами, предъявляющими свои права на его ресурсы. Не исключено, что противостояние выйдет за рамки дипломатического, поэтому в Концепции национальной безопасности и Военной доктрине Российской Федерации особое место уделяется противоборству сторон в Арктике [2, 3]. При этом основным сдерживающим фактором развития, наряду с суровым климатом и большой разбросанностью населенных пунктов, является почти полное отсутствие коммуникаций [4]. В этих условиях для обеспечения хозяйственной деятельности и решения оборонных задач особое внимание уделяется внедорожным транспортным средствам высокой проходимости и достаточной мобильности.

В настоящее время на шасси высокой проходимости применяется несколько типов апробированных в мировой практике конструкций двигателей — ленточные металлические или резино-металлические гусеничные двигатели с несложной конструкцией, обеспечивающей низкие давления машины на опорную поверхность. Однако известные конструкции металлических и резино-металлических гусениц не решают проблему проходимости транспортных средств на снежном покрове толщиной около 1 м и более, а также на некоторых типах болотных грунтов. Эти проблемы остаются пока трудно решаемыми и при использовании более совершенного объемного гусеничного двигателя — пневмогусеницы.

Наибольший интерес с точки зрения простоты конструкции представляют специальные колесные и планетарно-колесные двигатели.

Кроме отмеченных выше двигателей шасси высокой проходимости широкую известность получил роторно-винтовой двигатель, теория и практика конструирования которого широко представлена в литературе. Обладая относительно простой конструкцией, двигатель обеспечивает очень высокую проходимость транспортного средства на заснеженных и обледенелых поверхностях, заболоченных грунтах и воде [5, 6].

В настоящее время известны десятки образцов транспортных средств с роторно-винтовым двигателем, показавших хорошие эксплуатационные характеристики.

Экспериментальные и теоретические исследования параметров взаимодействия роторно-винтового двигателя с подстилающей [5, 7, 8] поверхностью показали значительное влияние конструктивных параметров, например: соотношение массы ротора и корпуса; угла наклона винтовых линий; высоты винтовых линий.

Особо следует отметить, что эксплуатация транспортных средств такой конфигурации происходит на различном грунте:

1) упругопластические — грунты, которые после снятия нагрузки частично восстанавли-

вают свою первоначальную форму (сильно гумусированные почвы, торфяники и т. п.);

2) мягкотекучие — грунты, которые после снятия нагрузки претерпевают деформацию, обусловленную некоторой текучестью массы (илы);

3) текучие — грунты, которые реагируют на снятие нагрузки подобно малоподвижной жидкости (водонасыщенные илы, обводненные пески, водонасыщенные торфяные массы и т. п.);

4) жидкие — грунты, которые ведут себя аналогично жидкостям (разжиженные илы и торфы, сапропель).

Физико-механические свойства грунтов очень разнообразны.

Совершенно иным по природе, но таким же труднопроходимым, как и слабые минерально-органические грунты, является снежный покров. По максимальной декадной толщине снежного покрова на территории России выделено пять зон [9]. В настоящее время передвижение по снежному покрову толщиной до 0,4 м не представляет проблемы для колесных и гусеничных машин. В арктической зоне, где снежный покров держится до 9 месяцев и превышает высоту 1 м, движение возможно только на специально сконструированных транспортных средствах.

В России накоплена значительная информация по физико-механическим свойствам снега [9]. Установлено, что под влиянием различных, в том числе, климатических факторов снежный покров приобретает весьма сложное слоистое строение. Плотность отдельных слоев глубокого снега  $\rho$  может изменяться от 10 до 300 кг/м<sup>3</sup>, а наста — в пределах 300...550 кг/м<sup>3</sup>.

Отмеченное выше многообразие свойств грунтов и конструктивных решений транспортных средств не позволяет реализовать преимущества роторно-винтового движителя на всех режимах движения на различных подстилающих поверхностях в силу ограничений, наложенных на конкретно спроектированное шасси (например, постоянная высота и угла наклона витков) (рис. 1). В настоящее время установлены и рекомендованы приемлемые углы наклона винтовых линий на разных грунтах для транспортных машин в диапазоне 26...38° и технологических — 18...25° [5].

Очевидно, что для реализации в полной мере тяговых преимуществ роторно-винтового движителя необходимо иметь адаптивную систему, позволяющую менять определенные конструктивные параметры в процессе движения в зависимости от текущих грунтовых условий и режимов движения.

Одним из таких решений является создание транспортного средства высокой проходимости с эласто-винтовым движителем (рис. 2), в котором высота и углы наклона бегущих винтовых линий формируются за счет деформации неподвижной оболочки.

Конструкция эласто-винтового движителя состоит из герметичной неподвижной полости  $I$  с избыточным давлением ( $\sim 0,5...1$  атм), обеспечивающим достаточную несущую способность ходового модуля реактора 2, формирующего бегущую волну необходимой высоты и угла уклона, и системы управления, оптимизирующую эти параметры в зависимости от грунтовых условий и режимов движения.



Рис. 1. Роторно-винтовые движители с различной высотой и углом наклона витков

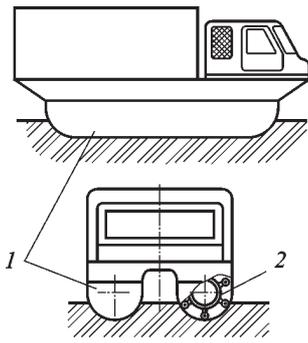


Рис. 2. Транспортное средство с эласто-винтовым движителем:

1 — неподвижная полость; 2 — реактор

Конструкция ходового модуля может быть полностью или частично эластичной. Ходовой модуль, в котором неподвижная полость наполовину выполнена из эластичного материала, представлен на рис. 3.

Конструкция модуля состоит из жесткого корпуса 1, обеспечивающего крепление к шасси транспортного средства, эластичной части 4, в которой формируется бегущая полуволна, реактора полуволны 2, механизма перекоса 3,

формирующего угол наклона бегущей волны в необходимых пределах, и механизма установки высоты волны 5.

Эластичную часть целесообразно выполнять в виде резинокордной оболочки с углами укладки нити  $\pm\beta$ . В начальной части форма оболочки близка к осесимметричной, а в средней части — к цилиндрической. Каркас оболочки может быть изготовлен из обрезиненных кордных слоев, накладываемых друг на друга крест-накрест на цилиндрической оправке. Окончательную сигарообразную форму оболочка получает при вулканизации. В теории сетчатых оболочек показано, что описанная технология изготовления обеспечивает образование так называемой шинной геометрии нитей [10, 11]:

$$\sin \beta / r = \chi = \text{const},$$

где  $r$  — текущий радиус;  $\beta$  — угол наклона нити к меридиану;  $\chi$  — константа геометрии нитей.

В случае армирования оболочки металлическим кордом, который практически нерастяжим, угол  $\theta$  наклона нормали к оси определяется из следующего соотношения:

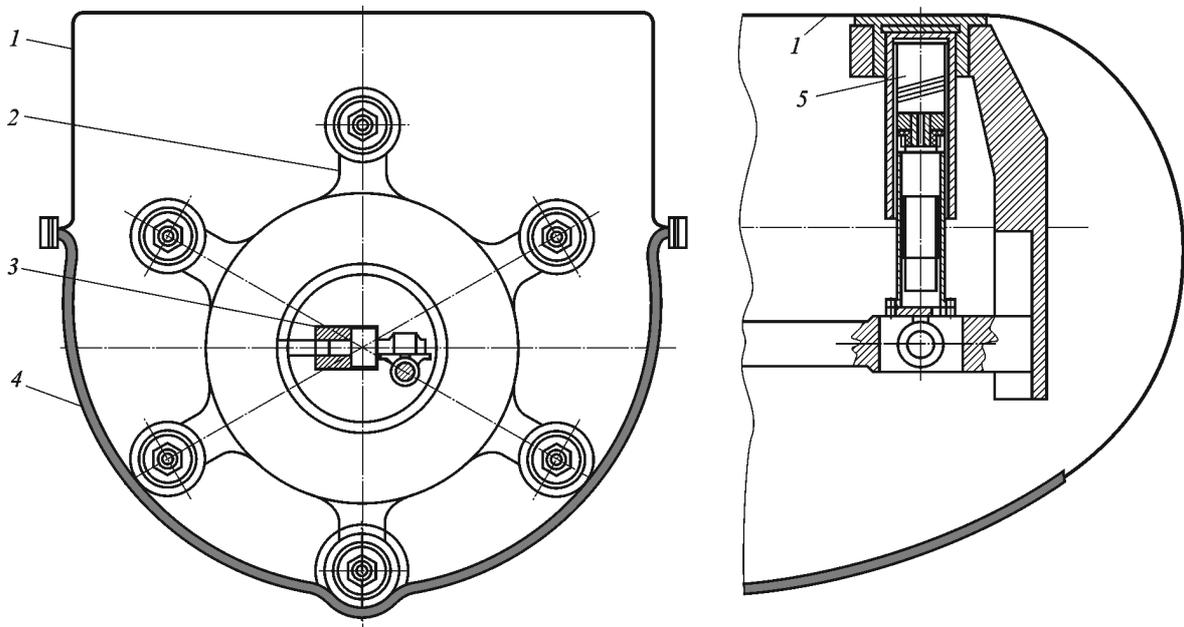


Рис. 3. Вариант конструкции ходового модуля:

1 — корпус; 2 — реактор полуволны; 3 — механизм перекоса; 4 — эластичная часть; 5 — механизм установки высоты ванны

$$\sin \theta = \frac{r^2}{r_1^2} \sqrt{\frac{1 - \chi^2 r^2}{1 - \chi^2 r_1^2}}$$

Здесь  $r_1$  — радиус оболочки в центральном сечении.

При выполнении численного эксперимента были приняты следующие исходные параметры: радиус цилиндрической оправки  $r_0 = 520$  мм; радиус днища  $r_2 = 180$  мм; исходный угол наклона нитей  $\beta_0 = 54,7^\circ$  (равновесный угол); длина меридиана  $l = 4\,300$  мм; константа геометрии нитей  $\chi = \sin \beta_0 / r_0$ .

Система дифференциальных уравнений для расчета профиля оболочки представлена в работе [11]. Для расчета задавались следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} r(0) &= r_1; \\ z(0) &= 0; \\ r(l) &= r_2. \end{aligned}$$

Краевая задача для указанной системы дифференциальных уравнений с данными параметрами и граничными условиями решалась методом «пристрелки», аналогично, описанному в работе [10], при этом варьировался радиус  $r_1$ . В связи с проявлением нелинейных краевых эффектов применялась арифметика высокой точности (50 десятичных знаков и более). В отличие от [10] укладка нитей принималась симметричной, хотя могут рассматриваться и варианты оболочки с несимметричной укладкой нитей.

В результате была рассчитана [11, 12] форма оболочки движителя (рис. 4) и углы укладки нитей (рис. 5).

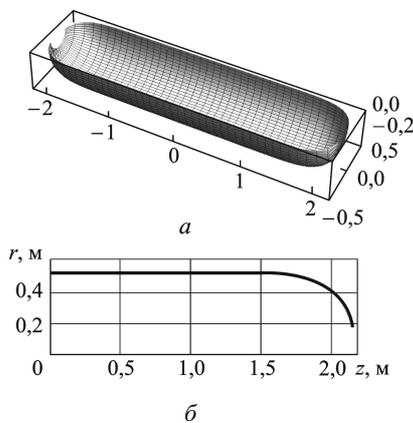


Рис. 4. Геометрия резинокордной оболочки движителя:

$a$  — общий вид;  $b$  — форма меридиана  $r(z)$

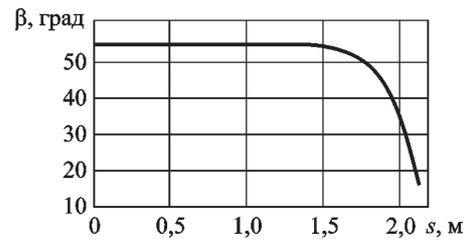


Рис. 5. Углы наклона нитей к меридиану оболочки

### Выводы

1. Предложена конструкция воздухоопорного движителя машины высокой проходимости на основе роторно-винтовой ходовой части с гибкой оболочкой.

2. Установлено, что эксплуатационные параметры эластичного роторно-винтового движителя для обеспечения передвижения машин по снегу, по переувлажненным и жидким грунтам возможно менять в широких пределах.

3. Разработана методика расчета и построения равновесных профилей сетчатых оболочек несимметричной укладкой нитей, позволяющая оценить работоспособность предложенной конструкции воздухоопорного движителя.

### Литература

- [1] URL: <http://www.rosbalt.ru/main/2013/10/18/1189486.html> (дата обращения 15 января 2014).
- [2] URL: [http://vpk.name/news/92338\\_tekst\\_vyistupleniya\\_dmitriya\\_rogozina\\_na\\_presskonferencii\\_v\\_rg.html](http://vpk.name/news/92338_tekst_vyistupleniya_dmitriya_rogozina_na_presskonferencii_v_rg.html) (дата обращения 15 января 2014).
- [3] Военная доктрина Российской Федерации. *Общероссийская еженедельная газета «Военно-промышленный курьер»*, 2010. № 6 (322).
- [4] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 391 с.
- [5] Беляков В.В., ред. *Вездеходные транспортно-технологические машины*. Н. Новгород, Изд-во ТАЛАН, 2004. 960 с.
- [6] Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Беляков В.В. *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 2, с. 155–161.
- [7] Беляков В.В., Молев Ю.И. Влияние подстилающего слоя поверхности движения на величину экскавационной осадки движителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 1, с. 72–78.
- [8] Беляков В.В., Беляев А.М., Бушуева М.Е., Вахидов У.Ш., Гончаров К.О., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Лелиовский К.Я., Макаров В.С., Папунин А.В., Тумасов А.В., Федоренко А.В. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин. *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 3, с. 145–175.
- [9] Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Гончаров К.О., Федоренко А.В., Беляков В.В. Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характери-

стик снежного покрова. *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 1, с. 150–158.

[10] Бадриев И.Б., Бандеров В.В., Задворнов О.А. О решении задачи равновесия мягкой сетчатой оболочки при наличии нагрузки, сосредоточенной в точке. *Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2013, № 3, с. 16–34.

[11] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численные методы в проектировании гибких упругих элементов*. Калуга, ГУП «Облиздат», 2001. 200 с.

[12] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численные методы в динамике и прочности машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 492 с.

## References

[1] *Na razvitie severnykh territorii Rossii khotiat napravit' 2 trln rublei* [On the development of the northern territories of Russia want to send 2 trillion rubles]. Available at: <http://www.rosbalt.ru/main/2013/10/18/1189486.html> (accessed 15 January 2014).

[2] *Tekst vystupleniia Dmitriia Rogozina na press-konferentsii v «RG»* [Speech by Dmitry Rogozin at a press conference in «RG»]. Available at: [http://vpk.name/news/92338\\_tekst\\_vystupleniya\\_dmitriya\\_rogozina\\_na\\_presskonferentsii\\_v\\_rg.html](http://vpk.name/news/92338_tekst_vystupleniya_dmitriya_rogozina_na_presskonferentsii_v_rg.html) (accessed 15 January 2014).

[3] Voennaia doktrina Rossiiskoi Federatsii [Military Doctrine of the Russian Federation]. *Obshcherossiiskaia ezhenedel'naia gazeta «Voенно-promyshlennii kur'er»* [All-Russian weekly «Military-Industrial Courier»]. 2010, no. 6 (322).

[4] Larin V.V. *Teoriia dvizheniia polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Theory of motion-wheel drive wheeled machines]. Moscow, Bauman Press, 2010. 391 p.

[5] *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny* [All-terrain transport and technological machines]. Ed. Beliaikov V.V., Kuliashov A.P. Nizhny Novgorod, TALAM publ., 2004. 960 p.

[6] Makarov V.S., Zeziulin D.V., Beliaev A.M., Papunin A.V., Beliaikov V.V. Formirovanie snezhnogo pokrova v zavisimosti ot landshafta mestnosti i otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin v techenie zimnego perioda [Formation of snow in relation to terrain landscape and evaluation mobility of transport and technological vehicle during

the winter period]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings NSTU named after R.E. Alekseeva], 2013, no. 2, pp. 155–161.

[7] Beliaikov V.V., Molev Iu.I. Vliianie podstilaishchego sloia poverkhnosti dvizheniia na velichinu ekskavatsionnoi osadki dvizhitelia [Influence of Underlying Moving Surface on Value of Excavation Mover Draught]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2007, no. 1, pp. 72–78.

[8] Beliaikov V.V., Beliaev A.M., Bushueva M.E., Vakhidov U.Sh., Goncharov K.O., Zeziulin D.V., Kolotilin V.E., Leliovskii K.Ia., Makarov V.S., Papunin A.V., Tumasov A.V., Fedorenko A.V. Kontsepsiia podvizhnosti nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [The conception of movability of ground transport and technological vehicles]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings NSTU named after R.E. Alekseeva]. 2013, no. 3, pp. 145–175.

[9] Makarov V.S., Zeziulin D.V., Goncharov K.O., Fedorenko A.V., Beliaikov V.V. Otsenka effektivnosti dvizheniia kolesnykh mashin na osnovanii statisticheskikh kharakteristik snezhnogo pokrova [Assessment of movement wheeled machines based on statistical characteristics of snow cover]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings NSTU named after R.E. Alekseeva]. 2013, no. 1, pp. 150–158.

[10] Badriev I.B., Banderov V.V., Zadornov O.A. O reshenii zadachi ravnovesiia miagkoi setchatoi obolochki pri nalichii nagruzki, sosredotochennoi v tochke [On the solving of equilibrium problem for the soft network shell with a load concentrated at the point]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU. Mechanics Bulletin]. 2013, no. 3, pp. 16–34.

[11] Gavriushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennye metody v proektirovanii gibkikh uprugikh elementov* [Computational methods in the design of flexible elastic elements]. Kaluga, GUP «Obлиздат» publ., 2001. 200 p.

[12] Gavriushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennye metody v dinamike i prochnosti mashin* [Numerical methods in dynamics and strength of machines]. Moscow, Bauman Press, 2012. 492 p.

Статья поступила в редакцию 30.01.2014

## Информация об авторах

**БЯКОВ Константин Евгеньевич** (Москва) — аспирант кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**ЧАН Ки Ан** (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**СОРОКИН Федор Дмитриевич** (Москва) — профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sorokin\_fd@mail.ru).

**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).

## Information about the authors

**BYAKOV Konstantin Evgen'evich** (Moscow) — Post-Graduate of «Multi-Purpose Caterpillar Vehicles and Mobile Robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

**CHAN Ki An** (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

**SOROKIN Fedor Dmitrievich** (Moscow) — Professor of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: sorokin\_fd@mail.ru).

**MASHKOV Konstantin Yur'evich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Multi-Purpose Caterpillar Vehicles and Mobile Robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).