

УДК 629.113

Л.В. Барахтанов<sup>1</sup>, В.В. Беляков<sup>1</sup>, Д.А. Галкин<sup>2</sup>,  
А.С. Зайцев<sup>3</sup>, Д.В. Зезюлин<sup>1</sup>, В.С. Макаров<sup>1</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВОРОТА МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва<sup>2</sup>,  
ООО «Военно-инженерный центр»<sup>3</sup>

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований силового (бортового) способа поворота многоосной колесной машины на различных опорных поверхностях. Проанализировано влияние возможных вариантов конструкционной конфигурации ходовой части многоосной колесной машины на величину момента сопротивления повороту. В соответствии с проведенными экспериментальными исследованиями сделан ряд выводов о выборе рациональных параметров пневмоколесных движителей с точки зрения повышения эффективности использования исследуемых машин. Приводятся зависимости потребной мощности двигателя исследуемой машины от относительного радиуса поворота. Представленный экспериментальный материал будет использоваться для оценки адекватности математической модели криволинейного движения многоосной колесной машины по деформируемому опорному основанию.

*Ключевые слова:* силовой способ поворота, специальные многоосные транспортные средства, бездорожье, результаты экспериментальных исследований

Наблюдаемый в последнее время процесс усиленного развития специальных колесных машин вызван возросшими требованиями к подвижности сухопутных войск и значительным прогрессом в области их конструирования [1-3]. Наибольшее внимание уделяется вопросам повышения проходимости и маневренности [5-7]. В рамках данной статьи приводятся результаты экспериментальных исследований силового способа поворота многоосной колесной машины ГПИ-3901.

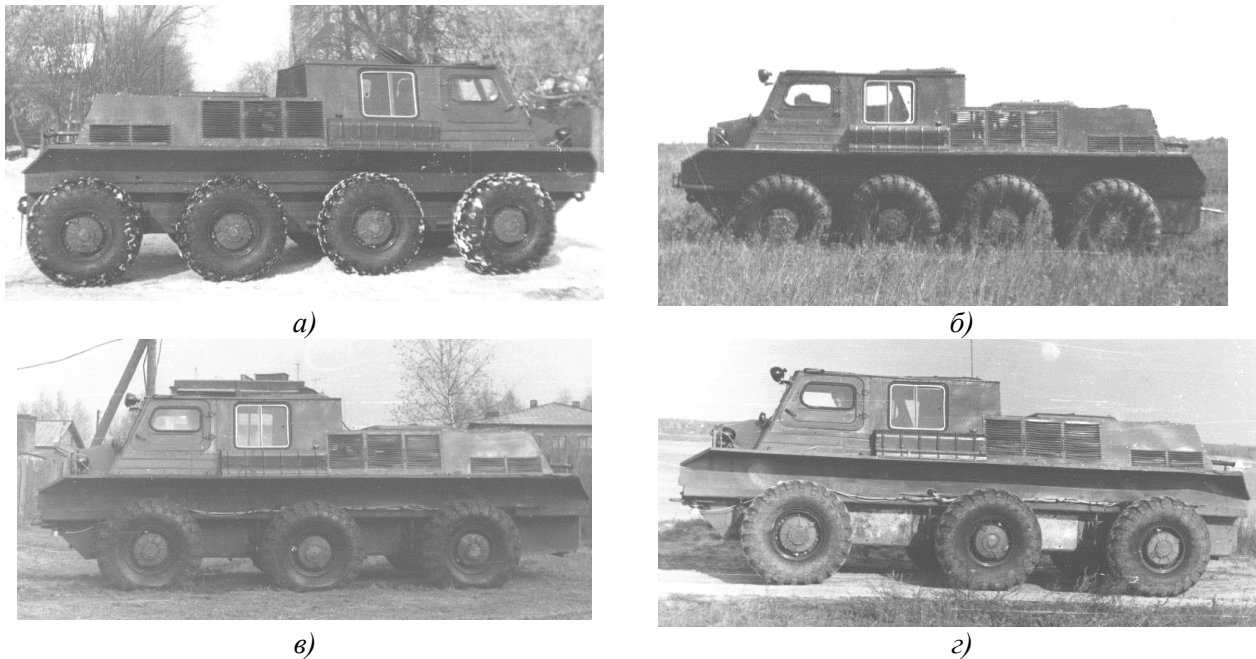
Данная машина была создана для исследований ОНИЛВМ НГТУ в рамках хозяйственных договоров с «ВНИИТРАСМАШ» (Санкт-Петербург) в период с 1982 г. по 1989 г. До 1983 г. работы велись под общим руководством научного руководителя лаборатории вездеходных машин С.В. Рукавишникова, а затем под руководством Л.В. Барахтанова. Экспериментальные исследования опорной проходимости машины ГПИ-3901 были проведены при участии сотрудников ОНИЛВМ Белякова В.В., Козлова В.С., Курнева В.И., Масленникова В.А. [8-10, 12].

Макет имеет регулируемую ходовую часть, позволяющую в широких пределах изменять как колесную формулу машины (4x4, 6x6, 8x8), так и отношение базы к колее ( $LB_M^{-1}$ ). Возможные значения этого отношения приведены в табл. 1. На рис. 1 представлены некоторые варианты изменения ходовой части макета ГПИ 3901.

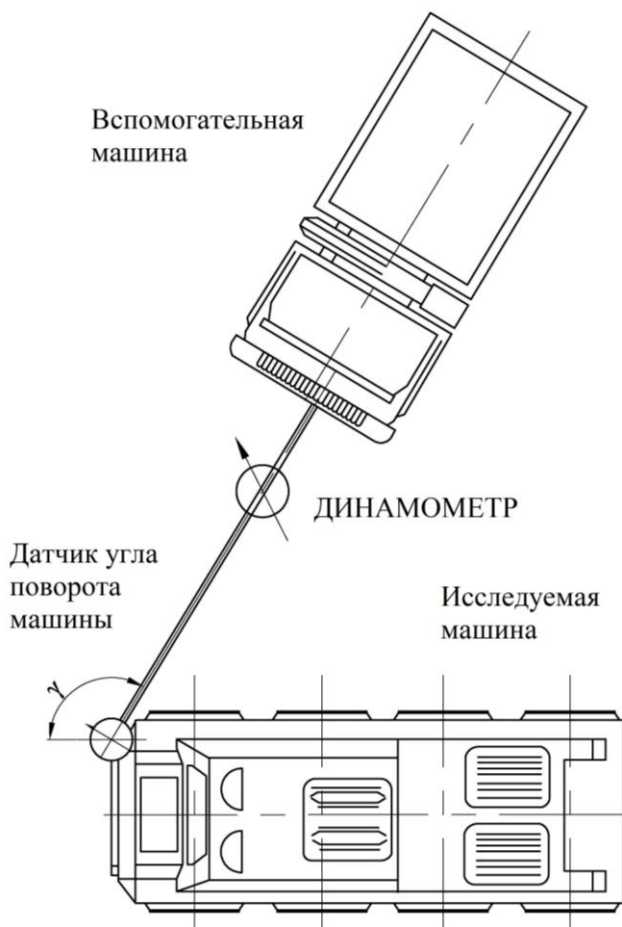
Таблица 1

Возможные значения колесной формулы и коэффициента базы ГПИ-3901

Колея $B_M$ , мм	Колесная формула									
	8x8		6x6						4x4	
	Отношение $LB_M^{-1}$ при базе $L$ , мм									
	4350	3800	4350	3965	3471	3000	2900	2543	4350	3800
2550	1,70	1,49	1,70	1,55	1,36	1,18	1,13	0,99	1,70	1,49
2710	1,60	1,40	1,60	1,46	1,28	1,11	1,07	0,94	1,60	1,40
2940	1,47	1,28	1,47	1,34	1,18	1,02	0,98	0,86	1,47	1,28



**Рис. 1. Некоторые из возможных вариантов ходовой части макета ГПИ-3901:**  
 а – 8х8,  $LB_M^{-1}=1,71$ ; б – 8х8,  $LB_M^{-1}=1,49$ ; в – 6х6,  $LB_M^{-1}=1,31$ ; г – 6х6,  $LB_M^{-1}=1,49$



**Рис. 2. Определение силы сопротивления боковому сдвигу и угол поворота исследуемой машины**

Колеса (или гусеницу) забегающего борта отключают от двигателя. После каждого разворота

Наиболее важным параметром, характеризующим взаимодействие двигателя машины с грунтом при повороте, является боковой сдвиг. Величина усилия бокового сдвига макета ГПИ-3901 и сравниваемой (сравнимой) гусеничной машины ГАЗ-71 производилась на асфальте, песке, дерне и снежной целине (табл. 2).

Рассмотрим основы методики исследовательских испытаний по определению усилия бокового сдвига. В исходном положении исследуемая машина и буксировщик расположены так, что трос с динамометром расположен под углом  $60^\circ$  к продольной оси исследуемой машины и параллелен продольной оси буксировщика (рис. 2). Запись усилий для динамометра производится при плавном (без рывков) развороте исследуемой машины (буксируемой вбок другой машиной) до положения, когда трос с динамометром станет под углом  $90^\circ$  к продольной оси исследуемой машины.

Во время разворота колеса отстающего борта исследуемой машины (борта, в сторону которого происходит поворот) полностью затормаживаются.

исследуемая машина и тягач переезжают на новый (без колеи) участок и становятся в исходном положении. При замерах усилия бокового сдвига исследуемой машины делается по 25-30 замеров. Расчет сдвигающего усилия производится по методу средних величин.

Анализ экспериментальных данных позволяет отметить следующее. На прочных и твердых грунтах момент сопротивления повороту колесной и гусеничной машины определяется силами трения опорной поверхности движителя о грунт, соотношением L/B, числом и расположением опорных катков или колес, а также величинами нагрузок на них. На деформируемых грунтах на величину момента сопротивления повороту колесной машины помимо указанных факторов большое влияние оказывает также боковое нагребание грунта движителем.

Таблица 2

**Величины коэффициентов бокового сдвига ( $\mu$ ) при движении макета ГПИ-3901 и машины ГАЗ-71 в различных условиях**

Колесная формула макета	L/B	Давление воздуха в шинах, МПа	Условия движения			
			Асфальт	Дерн	Песок	Снег
8x8	1,7	0,25	0,222	0,65	0,13	0,35
	1,5	0,25	0,135	0,42	0,41	0,25
		0,05	---	0,57	0,31	0,22
6x6	1,7	0,25	---	0,55	0,481	---
		0,05	---	0,66	0,41	---
	1,5	0,25	---	0,416	0,43	---
		0,05	---	0,462	0,35	---
	1,36	0,25	---	0,13	0,38	---
		0,05	---	0,15	0,29	---
Гусеничная машина	1,71	---	---	0,87	0,60	0,37



а)



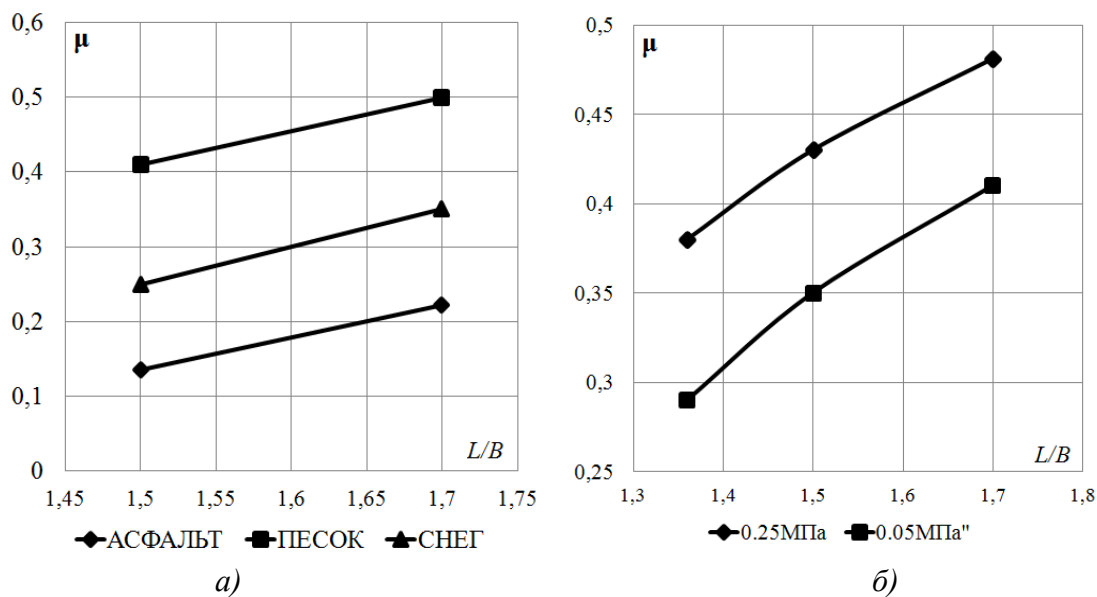
б)

**Рис. 3. Фрагменты испытаний ГПИ-3901 в условиях полигона:**  
а – исследования бокового сдвига; б – исследование маневровых свойств

Поворотливость колесной машины на деформируемых грунтах может быть улучшена за счет уменьшения коэффициента базы L/B. Исследования макета ГПИ-3901 на асфальте и песке показали, что независимо от колесной формулы уменьшение коэффициента базы с 1,7 до 1,5 ведет к снижению величины коэффициента сопротивления боковому сдвигу на 10-15%.

При сохранении постоянными массы машины и соотношения  $L/B$  изменение колесной формулы влияет на величину момента сопротивления повороту. Исследование макета с колесными формулами  $6 \times 6$  и  $8 \times 8$  показали, что при увеличении числа колес величина коэффициента сопротивления боковому сдвигу увеличивается  $\approx$  на 10-15%.

Снижение давления воздуха в шинах по разному влияет на момент сопротивления повороту. На деформируемых грунтах это ведет к уменьшению деформации грунта под колесами и нагребания его боковой частью колес. На твердых грунтах из-за возрастания сил сцепления колеса с полотном пути момент сопротивления повороту может несколько увеличиться. Исследования макета показали, что при снижении давления воздуха в шинах с 0,25 до 0,05 МПа величина коэффициента бокового сдвига на песке уменьшилась  $\approx$  на 16% (рис. 4), в то время как на асфальте она осталась практически постоянной.



**Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления боковому сдвигу машины от коэффициента базы:**  
 а – ГПИ-3901  $8 \times 8$ ,  $p_w=0,25$  МПа; б – ГПИ-3901  $8 \times 8$ , опорное основание – песок

Важнейшей задачей при разработке многоосных колесных машин высокой проходимости является снижение энергетических затрат, необходимых для движения по деформируемой опорной поверхности. Далее приводятся результаты экспериментальных исследований по определению потребной мощности двигателей ходового макета ГПИ-3901 в зависимости от радиуса поворота.

Во время исследований двигатели макета работали в режиме раздельного привода бортов и макет двигателя с небольшой скоростью по мерному участку с различными фиксированными радиусами поворота. При этом замерялись мощности на колесах отстающего и забегающего бортов машины, частоты вращения колес, а также скорость движения самого макета.

По результатам исследований составлены графики зависимости затрат мощности от радиуса поворота макета, примеры которых приведены на рис. 5-7. В результате анализа приведенных данных необходимо отметить, что на прочных и твердых грунтах высокие значения силы тяги по сцеплению и сравнительно низкие значения силы сопротивления движению колесной и гусеничной машины обеспечивают возможность бортового поворота их с любыми радиусами, включая и  $R=0,5B$ . Поворотливость колесной и гусеничной машин в этих условиях примерно одинакова.

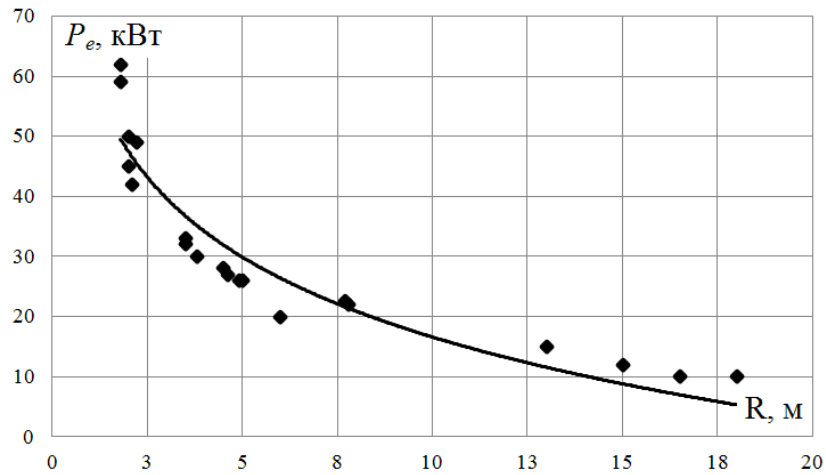


Рис. 5. Зависимость потребной мощности двигателя ходового макета (8x8; L/B=1,5;  $p_w=0,25$  МПа) от относительного радиуса поворота при движении на дерне

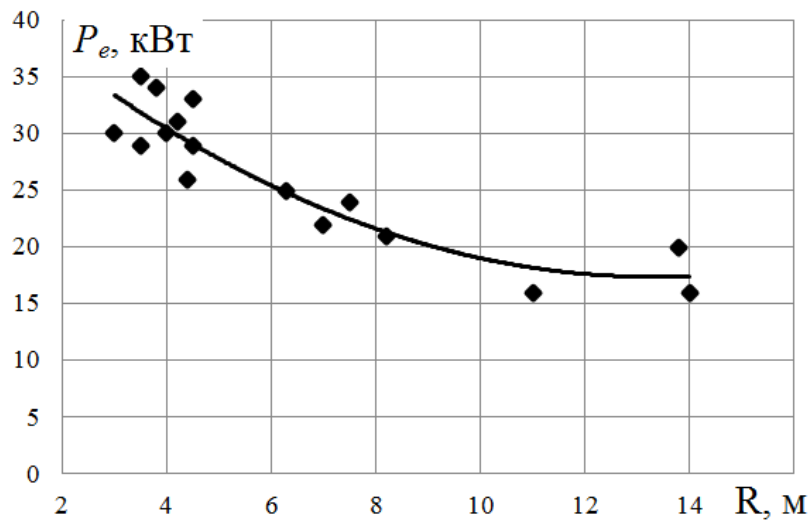


Рис. 6. Зависимость потребной мощности двигателя ходового макета (6x6; L/B=1,5;  $p_w=0,25$  МПа) от относительного радиуса поворота при движении на дерне

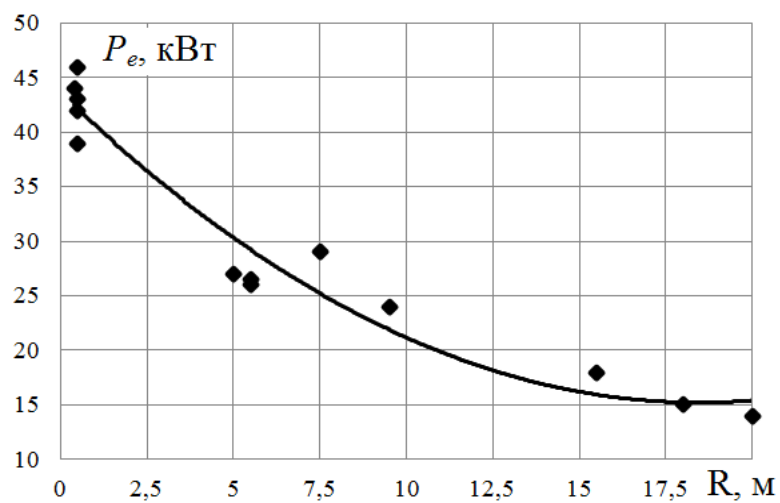


Рис. 7. Зависимость потребной мощности двигателя ходового макета (8x8; L/B=1,5;  $p_w=0,25$  МПа) от относительного радиуса поворота при движении по снегу

На деформируемых грунтах поворотливость гусеничной машины лучше поворотливости колесной. Причина этого в том, что запас силы тяги и поворачивающий момент колесной машины меньше, чем гусеничной. На деформируемых грунтах силовой поворот колесной машины сопровождается сильным буксованием колес забегающего с юзом колес отстающего борта. Буксование вызывает закапывание колес в грунт и увеличение момента сопротивления поворота за счет бокового нагребания грунта движителем. Величина буксования и юза тем больше, чем меньше коэффициент сцепления колес с грунтом и радиус поворота машины.

Снижение давления воздуха в шинах макета ведет к улучшению его поворотливости, что связано с повышением эластичности шин, их бокового увода и улучшения сцепления с грунтом. При этом уменьшается буксование и закапывание колес в грунт, угол и интенсивность поворота машины возрастают.

С увеличением скорости движения поворотливость колесной машины улучшается, так как при этом момент сопротивления преодолевается не только за счет сил, создаваемых движителем, но и силы инерции самой машины.

Исследования показали, что при переходе макета ( $8 \times 8$   $L/B=1,57$ ) от прямолинейного движения на второй передаче к повороту с  $R=B$  даже на снежной целине сразу достигался угол поворота на  $90-180^\circ$ , чего при статическом повороте никогда не получалось. На песке величина этого угла достигала  $60-90^\circ$ . Поворачиваемости колесной и гусеничной машины при этом сравниваются.

Затраты мощности на поворот резко возрастают с уменьшением радиуса поворота машины (рис. 5–7). Например, для поворота макета ( $8 \times 8$   $L/B=1,5$  и  $p_w=0,25$  МПа) на дерне с радиусом поворота  $R=0,5B$  необходима мощность  $2 \times 70$  кВт. При  $R=4B$ ,  $8B$  и  $20B$  значение этой мощности уменьшается соответственно в 2,6, 4 и 8 раз.

Таким образом, с использованием представленного экспериментального материала будет производиться оценка адекватности разрабатываемой в настоящее время математической модели криволинейного движения многоосной колесной машины по деформируемому опорному основанию, которая станет теоретической основой для выбора рациональных параметров шасси исследуемых транспортных средств, обеспечивающих максимальные показатели их энергетической эффективности [4, 11].

### Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. №3. С. 162–170.
2. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 156–166.
3. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №1 С. 143–151.
4. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности работы транспортной системы // В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Ю.И. Молев // Приволжский научный журнал. 2010. № 4. С 214–219.
5. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Беляков, В.С. Макаров / Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №7. С. 24–26.
6. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3; URL: [www.science-education.ru/103-6376](http://www.science-education.ru/103-6376) (дата обращения: 05.06.2012).
7. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.С. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. №1. С. 82–87.
8. Вездеходные транспортно-технологические машины / под редакцией В. В. Белякова, А. П. Куляшова. – Н. Новгород.: ТАЛАН, 2004. – 960 с.

9. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2010. Вып. 12 - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/164456.html>, свободный.
10. Гончаров К., Макаров В., Беляков В. Проходимость многоосных колесных машин по снегу. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 220 с.
11. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5; URL: [www.science-education.ru/105-6927](http://www.science-education.ru/105-6927) (дата обращения: 17.09.2012).
12. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. –161 с.

*Дата поступления  
в редакцию 16.10.2012*

**L.V. Barakhtanov<sup>1</sup>, V.V. Belyakov<sup>1</sup>, D.A. Galkin<sup>2</sup>,  
A.S. Zaytsev<sup>3</sup>, D.V. Zezyulin<sup>1</sup>, V.S. Makarov<sup>1</sup>**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ROTATION OF MULTI-AXIS WHEELED VEHICLES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Ltd. «Military Industrial Company», Moscow<sup>2</sup>,  
Ltd. «The military engineering centre»<sup>3</sup>

**Subject/topic/purpose:** Experimental investigations of the power (skid-steering) method of rotation of multi-axis wheeled vehicles.

**Methodology of work:** Assessing the impact of different variants of structural configuration of the chassis on the values of the required engine power and torque resistance of multi-axis wheeled vehicles.

**Results/application:** The results are important for the activity of research laboratories and automotive companies involved in the design of multi-axis wheeled vehicles. The experimental material will be used to assess the adequacy of mathematical model of curvilinear motion of the multi-wheeled vehicle on deformable grounds.

**Findings:** The number of recommendations about the choice of rational parameters of wheels in terms of efficient use of multi-axis wheeled vehicles was proposed.

*Key words:* skid-steering, special multi-axis wheeled vehicles, terrain, results of measurements.