

УДК 629.113

А.В. Папунин, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров,  
В.Е. Колотилин, Д.М. Порубов, В.И. Филатов, П.О Береснев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ РВА МНОГООСНЫМИ КОЛЕСНЫМИ МАШИНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Представлены экспериментальные и теоретические исследования многоосных машин по преодолению препятствий типа ров. Испытания были проведены на берегу р. Волга. В качестве опорных оснований были выбраны песок и уплотненная грунтовая поверхность. Была определена теоретическая максимальная ширина преодолеваемого рва на перечисленных опорных основаниях. На песчаном грунте максимальная ширина рва составила 0,84 м. На уплотненной грунтовой поверхности максимальная расчетная ширина преодолеваемого рва составила 1 м. Были проведены исследования физико-механических свойства грунтов с помощью пенетрометра грунтового ПГ-1 и исследовательского комплекса для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая Лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». Было рассмотрено влияние параметров транспортно-технологических машин на ширину преодолеваемого рва. Для этого были произведены расчеты транспортно-технологической машины «Корсак» на гомогенном опорном основании типа песчаный грунт.

*Ключевые слова:* ров, многоосные машины, исследование препятствий

Необходимость решения транспортно-технологических задач на всей территории нашей страны является одним из ключевых факторов для возможности ведения хозяйственной деятельности. При успешном их решении становится возможным проживание людей в самых суровых условиях: высокогорных районах и в районах крайнего севера. В свою очередь это позволяет решать две важнейшие задачи: функционирование основных секторов экономики и охрану государственной границы.

Большая часть задач по перевозке людей и грузов возложена на наземный транспорт. В сложных условиях эксплуатации важным свойством транспортно-технологических машин (ТТМ) является подвижность. Под подвижностью понимается интегральное эксплуатационное свойство ТТМ, определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е. возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2].

Ключевым критерием оценки подвижности является проходимость – эксплуатационное свойство автомобиля, определяющее возможность выполнения транспортных и других функций в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью и при преодолении различных препятствий [3]. Одним из основных препятствий, встречающихся при движении по пересеченной местности, являются рвы. В результате преодоления данного типа препятствия возможна полная потеря подвижности. Для исключения данного явления на начальных этапах проектирования ТТМ проводится расчет максимально возможной преодолеваемой ширины рва.

В настоящее время при проектировании многоосных ТТМ высокой проходимости предельную ширину преодолеваемого рва рассчитывают по формуле [4]:

$$b_p \leq 0,2l_0(n - 1), \quad (1)$$

где  $l_0$  – расстояние от оси передних колес до центра масс [м];  $n$  – число осей ТТМ.

Существенным недостатком данной формулы является не только то, что в ней не учитывается ряд технических параметров ТТМ, таких как масса, диаметр и ширина колесного

двигателя, но и то, что расчет ведется для не разрушаемого рва. Физико-механические свойства грунта существенно влияют на движение ТТМ. При преодолении рва в действительности происходит обрушение его стенок. Данный эффект приводит к уширению рва, существенно повышая вероятность потери подвижности ТТМ на местности. Для определения уширения рва и повышения подвижности ТТМ на этапе проектирования необходимо учитывать связность и угол внутреннего трения грунта. Решение данной проблемы было приведено научным коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева под руководством профессора Белякова В.В. Была предложена математическая модель разрушаемого рва, учитывающая вышеуказанные параметры [5].

$$L_{Y_i} = G_{K_i} [\cos(\gamma + i\varphi) - \sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg}\varphi] \times [\sin(\gamma + i\varphi) - \cos(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg}(\gamma + (i-1)\varphi)] [cB]^{-1}, \quad (2)$$

где  $G_{K_i}$  – вес, приходящийся на  $i$ -е колесо [Н];  $\gamma$  – угол естественного уклона стенки рва [°];  $i$  – число осей автомобиля;  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта [°];  $c$  – связность грунта [Па],  $B$  – ширина колеса [м].

Для многоосной машины с центром тяжести близким к середине ширина преодолеваемого рва зависит от расстояния между осями и диаметра шин. Основываясь на опытных данных по машинам рассматриваемого типа для не разрушаемого рва может быть найдена по эмпирической зависимости [5]:

$$b_p = L_{1-2(3-4)} + 0,6 D_{ш}, \quad (3)$$

$L_{1-2(3-4)}$  – расстояние между колесами первой и второй (третьей и четвертой) осей машины [м],  $D_{ш}$  – диаметр шин [м].

При преодолении разрушаемого рва его предельная ширина может быть выражена следующим выражением [5]:

$$b_{pp} = b_p - \left( \sum_i^{n-1} L1_{Y_i} + \sum_i^n L2_{Y_i} \right), \quad (4)$$

где  $L1_{Y_i}$  – расстояние, на которое обрушается первая стенка рва,  $L2_{Y_i}$  – расстояние, на которое обрушается вторая стенка рва.



Рис. 1. Общий вид вездехода малого класса «Корсак»

До настоящего времени данная математическая модель разрушаемого рва не была подтверждена экспериментом. Для подтверждения адекватности данной модели были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению максимально возможной ширины преодолеваемого рва транспортно-технологической машиной. В качестве объекта ис-

следований был выбран вездеход малого класса «Корсак» [6]. Данный вездеход (рис. 1) был спроектирован коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева в период с 2013 по 2014 годы. Технические характеристики объекта исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Технические характеристики объекта исследований

Полная масса, кг	700
Колесная формула	6x6
Габаритные размеры, м	2520x1600x1900
Колея, м	1,35
Межосевое расстояние, м	0,75
Дорожный просвет, м	0,3
Энергетическая установка	Максимальная мощность – 33кВт Максимальный крутящий момент – 44Нм
Тип трансмиссии	Механическая с цепным приводом
Передаточные числа КПП	$i_1=3,7, i_2= 2,06, i_3=1,27, i_4=0,9, i_5= 3,67$
Передаточное число главной передачи	$i_0 = 4,3$
Передаточное число цепного привода	$i_{ц}=2$
Диаметр шины, м	0,6
Ширина шины, м	0,2

Среди особенностей данного ТТМ стоит отметить близкое к равномерному распределение массы вездехода по осям, постоянный полный привод, бортовой способ поворота и симметричное расположение осей относительно центра масс.

В расчете принято допущение касательно глубины рва. При проходе через ров колеса ТТМ не касаются его дна. При проведении эксперимента угол естественного уклона рва должен составлять 0 градусов, т.е. быть перпендикулярен к опорной поверхности, однако на практике значения данного угла будут колебаться в определенных пределах. Ввиду данных особенностей в теоретических расчетах был принят допуск на угол естественного откоса в 5 градусов.

В качестве опорных оснований были выбраны песок и уплотненная грунтовая поверхность. Теоретический расчет проводился исходя из физико-механических параметров грунта, представленных в табл. 2.

Таблица 2

## Физико-механические параметры грунтов

Тип опорного основания	Параметр	Значение
Песчаный грунт	Связность грунта, с [Па]	5000
	Угол внутреннего трения, $\varphi$ [°]	28
Уплотненная грунтовая поверхность	Связность грунта, с [Па]	40000
	Угол внутреннего трения, $\varphi$ [°]	12

По результатам теоретических исследований максимально возможный преодолеваемый размер рва  $b_p$  на песчаном основании составляет 0,84 м. Исходя из данного значения, условием движения ТТМ через ров является:

$$b_{pp} \leq 0,84 \text{ м} \quad (5)$$

Для верификации полученных теоретических данных были проведены экспериментальные исследования преодолеваемого рва ТТМ на песчаном опорном основании.

Местом проведения испытаний был выбран песчаный берег р. Волга (рис. 2).



Рис. 2. Место проведения испытаний

При проведении данных исследований решались следующие задачи: сбор данных о физико-механических свойствах грунта; получение данных по изменению геометрии препятствия при его преодолении; подтверждение модели разрушения деформируемого препятствия.

Для определения физико-механических характеристик грунтов использовались следующие приборы: пенетрометр грунтовой ПГ-1; исследовательский комплекс для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая Лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». Фрагменты замеров характеристик грунта показаны на рис. 3.



Рис. 3. Фрагмент замеров физико-механических свойств грунта

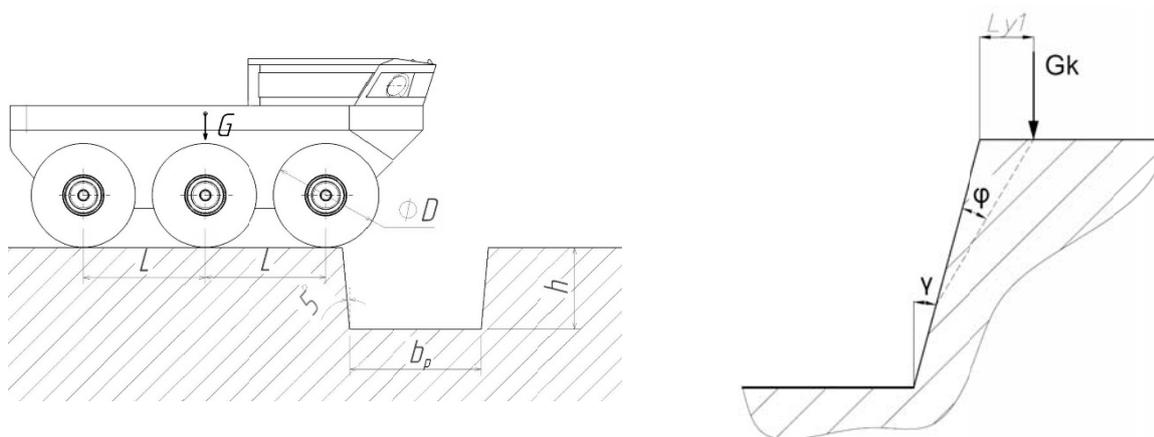


Рис. 4. Схема преодоления препятствия типа «ров»

Пенетрометр грунтовой ПГ-1 предназначен для ускоренного операционного контроля качества уплотнения, а также прочностных характеристик грунтов земляного полотна. Данный прибор использовался для проведения испытаний по измерению сопротивления пенетрации. Зная среднюю величину, можно определить графическим методом модуль упругости, угол внутреннего трения, удельное сцепление и коэффициент уплотнения грунта по прила-

гаемым к прибору номограммам. По результатам анализа экспериментальных данных характеристик грунта и теоретических данных, изложенных в трудах [4] был определен тип песчаного грунта и откорректированы исходные данные для расчетов.

Для проверки теоретического условия движения (5) было разработано несколько препятствий типа ров различной ширины. ТТМ «Корсак», двигаясь с установившейся скоростью движения на первой передаче, поочередно преодолевал рвы, увеличивающиеся по ширине. Схема преодоления препятствия представлена на рис. 4.

По результатам экспериментальных исследований, приведенных в табл. 3, ТТМ «Корсак» преодолела все рвы, шириной до 0,7 м, однако ров шириной 0,9 м преодолеть не удалось. Полученные данные подтверждают правильность теоретических исследований, проведенных на гомогенном (однородном) опорном основании типа песчаный грунт. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований на однородном грунте составило 17%. Фрагмент преодоления рва и застревания представлен на рис. 5.

Таблица 3

Результаты проведенных испытаний ТС «Корсак»

бр, м	Теоретический	Экспериментальный					
	0,84	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
		Успешно	Успешно	Успешно	Успешно	Успешно	Неуспешно

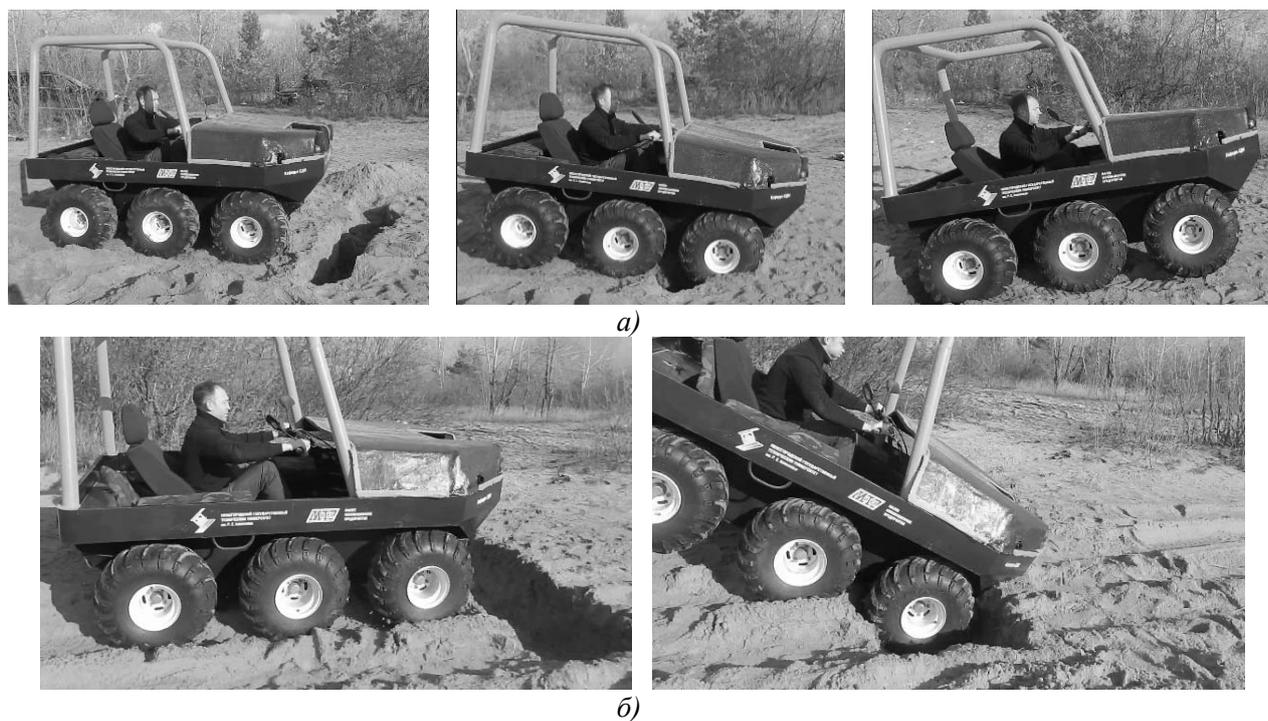


Рис. 5. Фрагмент преодоления препятствия типа «ров» (а) и застревания (б)

Рассмотрим работу данной модели на гетерогенном (неоднородном) грунте типа уплотненная грунтовая поверхность. Для выбранного типа местности также были проведены замеры физико-механических свойств грунта с помощью оборудования, описанного ранее. Порядок проведения эксперимента на гетерогенном опорном основании совпадает с вышеуказанным экспериментом на гомогенном грунте, отличие лишь в количестве преодолеваемых рвов.

В данном случае были разработаны три рва с начальной шириной 0,6 м с шагом в 0,2 м. При рассмотрении теоретической модели (2)–(4) было выявлено, что максимальный преодолеваемый ров равен 0,6 м. Для подтверждения рассмотренной теории был проведен эксперимент. На рисунке 6 представлено место проведения испытаний.

По результатам экспериментальных исследований, приведенных в табл. 4, ТТМ «Кор-

сак» преодолела ров 0,9 м, а ров шириной 1 м преодолеть не удалось. При проверке данной модели на гетерогенном грунтовом основании, Расхождение теоретических и экспериментальных исследований составило 40%.

Таблица 4

#### Результаты испытаний на гетерогенном грунте

бр, м	Теоретический	Экспериментальный		
	0,6	0,6	0,6	0,8
		Успешно	Успешно	Неуспешно



Рис. 6. Место проведения эксперимента

Для наглядного представления построим гистограмму сравнения теоретических и экспериментальных исследований для песчаного и уплотненного грунтов. Гистограмма сравнения теоретических и экспериментальных исследований представлена на рис. 7.

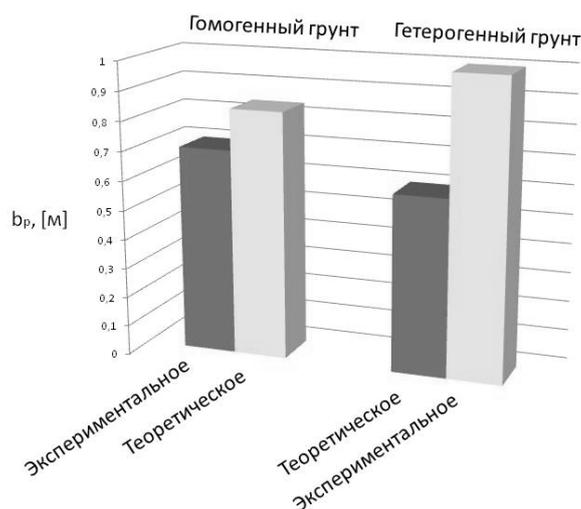


Рис. 7. Гистограмма сравнения теоретических и экспериментальных исследований

Рассмотрим влияние параметров ТТМ на ширину преодолеваемого рва. Основными параметрами ТТМ, существенно влияющими на преодоление рва, являются масса, ширина и диаметр колес, а также межосевое расстояние. Для оценки влияния изменения параметров были произведены расчеты ТТМ «Корсак» на гомогенном опорном основании типа песчаный грунт. Исходные данные для расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные для расчета

Параметры грунта		
Связность грунта, $c$	5000	Па
Угол внутреннего трения, $\varphi$	28	°
Угол естественного уклона, $\gamma$	5	°
Параметры транспортного средства малого класса		
Масса ТС, $m$	700	кг
Ширина колеса, $B$	0,3	м
Диаметр колеса, $D_k$	0,6	м
Межосевое расстояние, $L$	0,7	м

Проведем расчеты по формулам (2)–(4) при изменении параметров ТС по условиям (6) – (9). Результаты расчетов представлены в табл. 5.

$$500 \leq m \leq 900 \text{ кг} \tag{6}$$

$$0,2 \leq B \leq 0,4 \text{ м.} \tag{7}$$

$$0,5 \leq D_k \leq 0,7 \text{ м.} \tag{8}$$

$$0,5 \leq L \leq 0,9 \text{ м.} \tag{9}$$

Таблица 6

Результаты проведенных расчетов

	$m$ , кг	$B$ , м	$D$ , м	$L$ , м	$b_p$ , м
1	500	0,3	0,6	0,7	0,91
	600				0,88
	700				0,85
	800				0,82
	900				0,79
2	700	0,2	0,6	0,7	0,74
		0,25			0,81
		0,3			0,85
		0,35			0,88
		0,4			0,90
3	700	0,3	0,5	0,7	0,79
			0,55		0,82
			0,6		0,85
			0,65		0,88
			0,7		0,91
4	700	0,3	0,6	0,55	0,70
				0,6	0,75
				0,7	0,85
				0,8	0,95
				0,9	1,05

На основе данной таблицы возможно прогнозировать максимально возможную преодолеваемую ширину рва ТТМ при изменении одного из параметра, например, увеличения массы при загрузке технологическим оборудованием. Наибольшее влияние на изменение ширины преодолеваемого рва оказывают такие параметры, как межосевое расстояние и ширина колеса.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что модель разрушаемого рва является адекватной для гомогенных песчаных грунтов. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований на однородном грунте составило 17%.

Данный подход учитывался при разработке специального шасси робототехнического

комплекса [7] и многофункционального вездеходного транспортного средства [8], что позволило оптимизировать конструкцию данных ТТМ при расчете размеров преодолеваемых препятствий.

При проверке данной модели на гетерогенном грунтовом основании расхождение теоретических и экспериментальных исследований составило 40%. В связи с этим необходимо провести уточнение формул (2)–(4), и ввести дополнительные параметры влияния неоднородности грунта на размеры преодолеваемого препятствия.

#### Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–174.
2. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин. Автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 32 с.
3. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание: монография / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с
4. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
5. **Галкин, А.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной/ Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6. – С. 40-42.
6. **Зезюлин, Д.В.** Транспортное средство «КОРСАК» для обслуживания линейных объектов / Д.В. Зезюлин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 336-341.
7. **Kurkin, A.** Unmanned ground vehicles for coastal monitoring / A.Kurkin [et al.] // International Journal of Imaging and Robotics. – 2017. – V. 17. Issue 1. – P. 64-75.
8. **Береснев, П.О.** Оценка энергоэффективности вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией / П.О. Береснев [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – 2016. – № 1 (27). – С. 2-8.

*Дата поступления  
в редакцию 20.11.2017*

**A.V. Papunin, V.V. Belyakov, D.V. Zeziulin, V.S. Makarov,  
V.E. Kolotilin, D.M. Porubov, V.I. Filatov, P.O. Beresnev**

#### EXPERIMENTAL-THEORETICAL RESEARCHES OF MOVING ACROSS THE DITCH BY MULTI-WHEELED VEHICLES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** Conducting experimental and theoretical researches of multi-wheeled vehicles to detection the maximum width of the ditch.

**Design/methodology/approach:** The theoretical maximum width of the ditch was determined on sand and soil support bases. On the sandy surface, the maximum width of the ditch was 0.84 m. On the soil surface, the maximum width of the ditch was 1 m. Investigations of the physical and mechanical properties of soils were carried out by a ground penetrometer "GP-1" and a research complex for accelerated researches of soil properties "Field Litvinov's Laboratory - 9".

**Findings:** Formulas were experimentally confirmed when moving vehicle on the homogeneous ground, the deviation of calculations was 17%. The analysis of experimental and theoretical data of soil characteristics is carried out. An analysis was made of the effect of a change in one of the main parameters of the transport-technological vehicle "Korsak" to the width of the overcome ditch. For heterogeneous support bases of soil type, it is necessary to refine the formulas and add additional parameters of the effect of the heterogeneity of the soil on the dimensions of the overcome obstacle.

**Research limitations/implications:** This study is the starting point for further experimental-theoretical tests to overcome obstacles of the type ditch.

**Originality/value:** These dependencies make it possible to optimize the design of the developed transport-technological vehicles when calculating the width of ditch.

*Key words:* ditch, multi-wheeled vehicles, obstacles researching.