

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН С БАРЬЕРНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Папунин А.В., д.т.н. Беляков В.В.

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия  
nauka@nntu.ru

*В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования преодоления многоосными машинами разрушаемых барьерных препятствий. Обзор показал, что существующий расчетный аппарат базируется на допущении о недеформируемости барьерных препятствий, т.е. стенки препятствия имеют достаточную прочность. На местности такое встречается редко. Одним из наиболее сложных случаев движения по бездорожью является преодоление многоосной колесной машиной разрушаемого рва, так как стенки рва обрушаются по мере прохода колес машины, что ведет к его уширению. Были выделены недостатки существующего расчетного аппарата, и впоследствии он был уточнен и дополнен. Для верификации полученных результатов были проведены экспериментальные исследования. В качестве объекта исследований был выбран вездеход малого класса полной массой 700 кг. Испытания проводились на берегу реки Волга в окрестностях города Нижнего Новгорода. В качестве опорных оснований были выбраны песок (однородный грунт) и уплотненная грунтовая поверхность с наличием дернового слоя (неоднородный грунт). По вновь полученным зависимостям была определена теоретически возможная максимальная ширина преодолеваемого рва с учетом его разрушаемости. Также на выбранных опорных основаниях проведены исследования их физико-механических свойств, для этого использовались пенетрометр грунтовой ПГ-1 и исследовательский комплекс для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая Лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». В дальнейшем в работе были получены зависимости, характеризующие влияние различных конструктивных параметров транспортно-технологических машин на максимальную ширину преодолеваемого рва с учетом разрушаемости его стенок.*

**Ключевые слова:** многоосные колесные машины, разрушаемые барьерные препятствия, ров.

## Введение

В сложных условиях эксплуатации важным свойством транспортно-технологических машин (ТТМ) является подвижность. Подвижность – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее их способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1]. Перемещение людей и грузов как раз является причиной их создания.

Одной из главных задач процесса поддержания подвижности является поддержание проходимости, которая делится на опорную и профильную. Рассмотрим более детально вопросы

изучения профильной проходимости. Профильная проходимость характеризует возможность ТТМ преодолевать неровности пути, барьерные препятствия и вписываться в требуемую полосу движения, без инженерного вмешательства. На рис. 1 показана общая классификация критических характеристик машины по преодолению препятствий. На ней показаны возможные случаи потери профильной проходимости.

Одним из самых сложных случаев движения является преодоление ТТМ барьерных препятствий (см. рис. 2). Барьерные препятствия – это препятствия, профиль которых представляет собой короткие уклоны и пороги. Как правило, возможность их преодоления оценивают следующими параметрами: продольным и поперечным радиусами проходимости, высотой преодолеваемого эскарпа, шириной преодолеваемого рва.

### Критические характеристики параметров машины по преодолению препятствия.

1. Проектирование набой машины :  
определение необходимых характеристик.

2. Эксплуатация существующей машины:  
определение критических характеристик препятствия

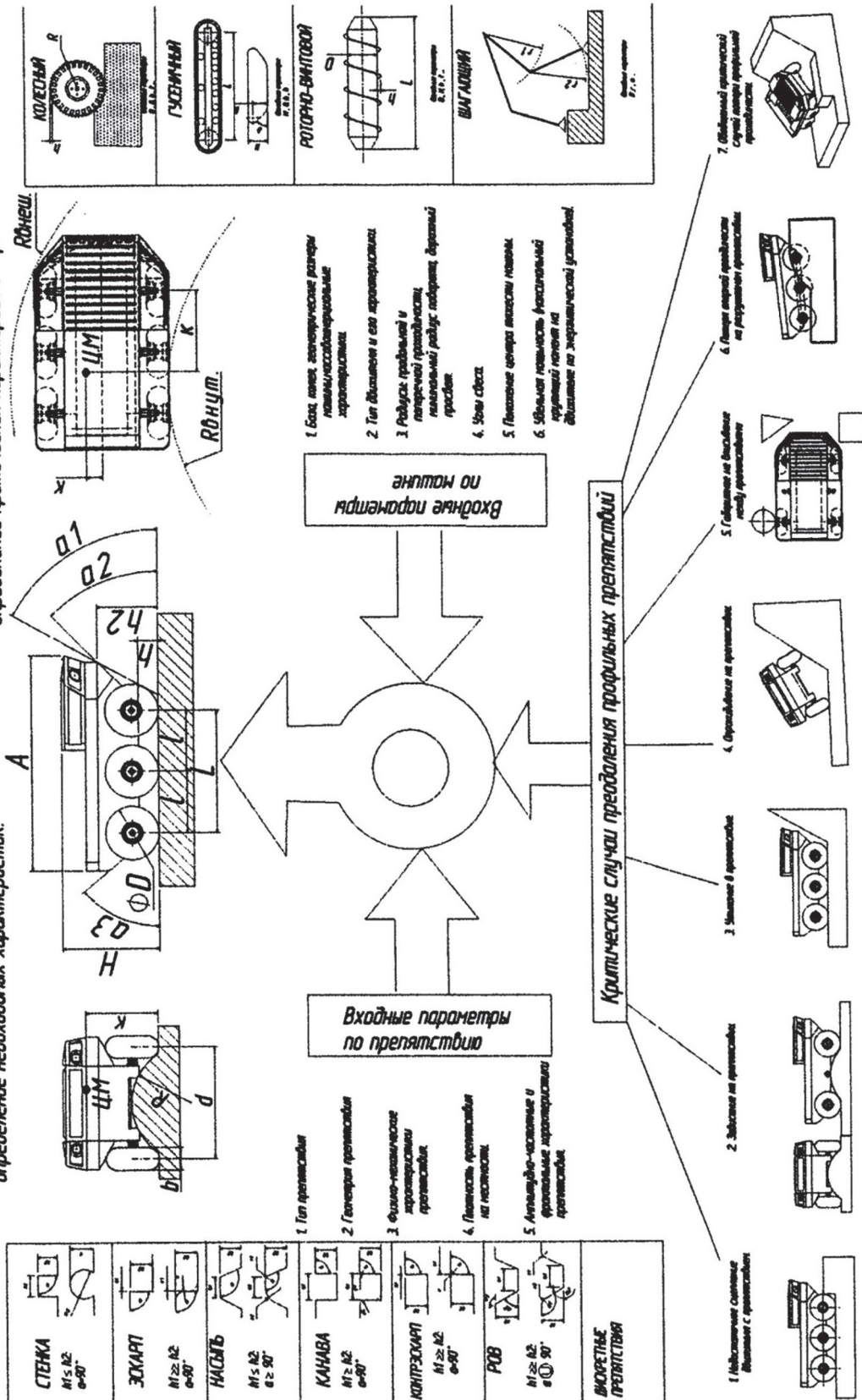


Рис. 1. Возможные случаи потери профильной проходимости



Рис. 2. Преодоление барьерных препятствий типа ров (слева) [2] и типа стенка (справа) [3]

В разное время изучением взаимодействия движителей колесных машин с барьерными препятствиями занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: Я.С. Агейкин, М.Г. Беккер, Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец.

Формула, представленная в работе [4], является наиболее удобной с точки зрения практического применения. Однако, как и остальные, данная формула основывается на допущении о недеформируемости препятствий. Другими словами, в процессе взаимодействия с движителем их размеры остаются неизменными. Однако в условиях местности препятствия являются деформируемыми как рвы, так и пороговые препятствия. В случае взаимодействия движителя ТТМ с эскарпом и насыпью их разрушение способствует их же преодолению, а в случае взаимодействия с разрушаемым рвом обрушение его стенок ведет к его же уширению и усложняет его преодоление.

Таким образом, в действительности параметры проходимости колесных машин, выбираемые при проектировании, являются завышенными. Поэтому подход к их разработке требует уточнения и пересмотра ряда положений. При этом можно выделить следующие направления исследования:

- выявление значимых параметров движителей многоосных колесных машин, влияющих на преодоления барьерных препятствий (в том числе разрушаемых);
- верифицирование существующих математических моделей взаимодействия движителей колесных машин с деформируемыми барьерными препятствиями;
- доработка расчетного аппарата параметров взаимодействия компонентов системы многоосная колесная машина – разрушаемое барьерное препятствие.

### **Цель исследования**

Целью исследования является совершенствование методов расчета взаимодействия движителей многоосных колесных машин с барьерными препятствиями.

### **Материалы, методы исследования и обсуждение результатов**

Научным коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева под руководством проф. В.В. Белякова в 2012 г. впервые была предложена математическая модель разрушаемого рва. Схема разрушения представлена на рис. 3. Данная модель учитывает такие параметры движителя, как диаметр и ширина колеса, межосевое расстояние, нагрузка на колесо, а со стороны грунтовой поверхности учитываются угол внутреннего трения и связность грунта.

Рассмотрим схему преодоления машиной рва с учетом его разрушаемости. Из рис. 3 видно, что ров становится шире. Происходит обрушение стенок по мере прохода колес многоосной машины.

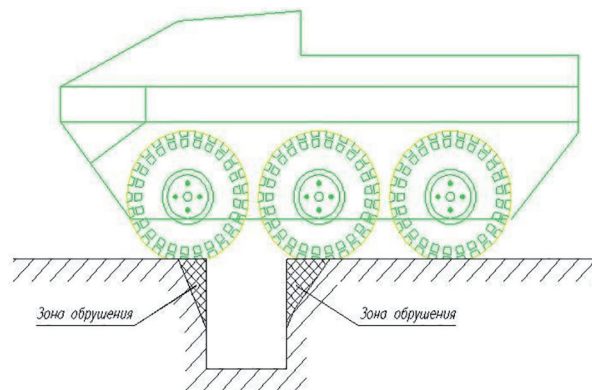


Рис. 3. Обрушение стенок рва при проходе многоосной машины

Схема обрушения стенок рва в соответствии с работой [5] показана на рис. 4. Слева показан проход первого колеса. Ров имеет естественный уклон  $\gamma$ . Когда на краю рва оказывается колесо (сила  $G_k$ ), то под действием этой силы будет происходить обрушение стенки по линии 1–2  $L_{x1}$ . И ширина рва будет увеличиваться на величину 2–3  $L_{y1}$ . Соответственно, срез материала будет происходить в соответствии с углом внутреннего трения материала. При проходе второго колеса будет наблюдаться картина в соответствии со схемой на рис. 4 (справа). Грунт также будет осыпаться по углу внутреннего трения материала, но уже по линии 4–5  $L_{x2}$ . Соответственно, колея увеличится на 2–4  $L_{y2}$  [5]. Для третьего и последующих колес уширение колеи будет происходить аналогичным образом.

До настоящего времени данная математическая модель разрушаемого рва не была подтверждена экспериментально.

В ходе дальнейшего анализа протекания процесса взаимодействия было выявлено, что данная модель в недостаточной мере отражает реальный характер. В связи с этим она была уточнена и дополнена, а именно в работе [5] рассматривается сила сопротивления разрушению грунта за счет трения по поверхности 3 (рис. 3 слева) и не учитываются зоны 1 и 2, указанные на рис. 5. На рис. 5 показан клин грунта, подверженный разрушению. Слева показана идеальная модель, а справа реальная, т.е. стенки 1 и 2 не параллельны и ширина клина больше ширины колеса. На рис. 6 это отчетливо видно.

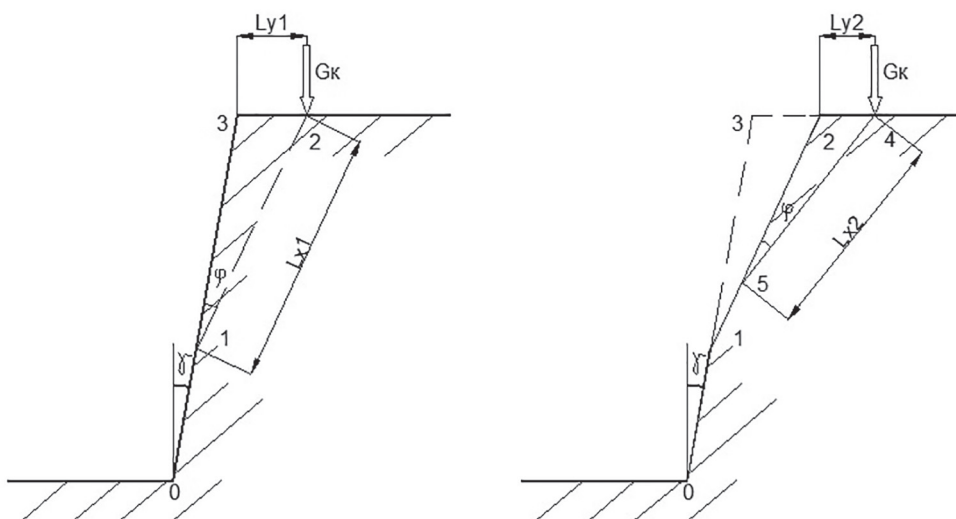


Рис. 4. Обрушение стенки рва при первом и втором проходах машины

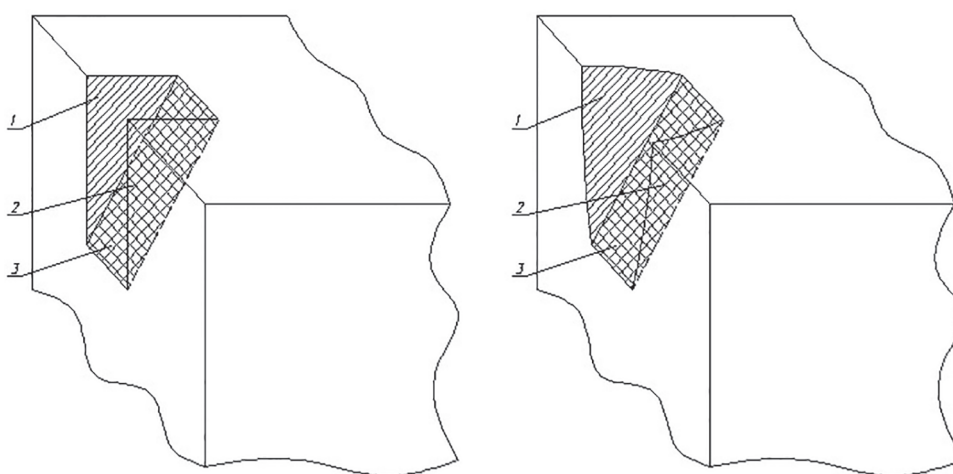


Рис. 5. Схема обрушения стенки рва



Рис. 6. Песчаный ров после проезда ТС

Сила трения в зоне скольжения клина грунта будет определяться из условия трения на этом участке в соответствии с зависимостью:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}(1,2)} + F_{\text{тр}(3)}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{тр}(1,2)}$  – трение на участках 1 и 2,  $F_{\text{тр}(3)}$  – трение на участке 3.

В общем случае трение клина грунта будет определяться из выражения [4, 6]:

$$F_{\text{тр}} = c \cdot A + F \cdot \text{tg}\varphi,$$

где  $c$  и  $\varphi$  – связность и угол внутреннего трения грунта;  $A$  – площадь сдвига (примем, что  $F$  – нагрузка, перпендикулярная площадке сдвига).

Уширение рва будет определяться выражением:

$$L_{\gamma i} = \frac{-cB + \sqrt{(cB)^2 - 4c\xi \cos(\gamma + i\varphi)c_p} \frac{G_{ki} [\sin(\gamma + i\varphi)\text{tg}\varphi - \cos(\gamma + i\varphi)] \sin\varphi}{\sin(\gamma + (i-1)\varphi)}}{2c\xi \cos(\gamma + i\varphi)}. \quad (2)$$

Предложенная зависимость справедлива только для специально подготовленных рвов, вырытых на однородном грунте типа песка. На практике это менее вероятно. Общим случаем является ров на неоднородном грунте. На рис. 7 показана схема участка рва, имеющего верхний слой дерна.

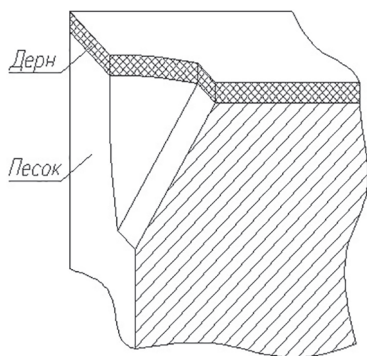


Рис. 7. Схема обрушения стенки рва на неоднородном грунте

Для того чтобы учесть составляющую сопротивления от среза дерна в зависимости (1), необходимо ввести дополнительный член, учитывая это:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}(1,2)} + F_{\text{тр}(3)} + F_{\text{тр}(д)},$$

где  $F_{\text{тр}(д)}$  – трение на участке с дерном.

Как показали экспериментальные исследования, при расчете трения дерна достаточно учитывать только первое слагаемое, а срез можно считать по вертикали, что обусловлено

структурой материала полотна пути. Поэтому  $F_{\text{тр}(д)} = c_d A_{(д)}$ , где  $A_{(д)}$  – площадь участка среза;  $c_d$  – связность дерна.

В соответствии со схемой на рис. 7,  $A_{(д)} = h_d (2\xi L_{\gamma i} + B)$ , где  $h_d$  – толщина дерна.

Итак, модель разрушаемого рва в пространственной постановке и с учетом неоднородности опорного основания, приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} G_{ki} \cos(\gamma + i\varphi) = & \\ = c\xi L_{\gamma i}^2 \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin\varphi} + & \\ + cBL_{\gamma i} \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi)}{\sin\varphi} + & \\ + G_{ki} \sin(\gamma + i\varphi) \text{tg}\varphi + c_d h_d (2\xi L_{\gamma i} + B), & \end{aligned}$$

а уширение рва будет определяться:

$$\begin{aligned} a_p L_{\gamma i}^2 + b_p L_{\gamma i} + c_p = 0; \\ a_p = c\xi \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin\varphi}; \\ b_p = cB \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi)}{\sin\varphi} + 2c_d h_d \xi; \\ c_p = G_{ki} [\sin(\gamma + i\varphi) \text{tg}\varphi - \cos(\gamma + i\varphi)] + c_d h_d B; \\ L_{\gamma i} = \frac{-b_p + \sqrt{b_p^2 - 4a_p c_p}}{2a_p}. \quad (3) \end{aligned}$$

Таким образом, зависимости (1)–(3) позволяют рассчитать величину уширения рва при проходе многоосной машины.

Для верификации полученных теоретических данных были проведены экспериментальные исследования преодоления рва многоосной колесной машиной полной массой 700 кг – вездехода малого класса «Корсак» (рис. 8) с колесной формулой 6Ч6 [7]. Место проведения испытаний – берег реки Волга в окрестностях города Нижнего Новгорода. Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в работах [8, 9].

При проведении экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- сбор данных о физико-механических свойствах грунта;
- получение данных по изменению геометрии препятствия при его преодолении;
- проверка адекватности математической модели взаимодействия движителя колесной многоосной машины с деформируемым барьерным препятствием типа ров.



Рис. 8. Общий вид вездехода малого класса «Корсак»

Технические характеристики объекта исследований представлены в табл. 1.

Для проведения экспериментальных исследований было подготовлено несколько препятствий типа «ров» различной ширины на однородном и неоднородном грунтах. Диапазон ширины рва составил от 0,3 до 1 м. Общий вид подготовленных препятствий представлен на рис. 9.

Таблица 1

Технические характеристики объекта исследований

Полная масса, кг	700
Колесная формула	6Ч6
Габаритные размеры, м	2520Ч1600Ч1900
Колея, м	1,35
Межосевое расстояние, м	0,75
Дорожный просвет, м	0,3
Энергетическая установка	Максимальная мощность – 33 кВт Максимальный крутящий момент – 44 Н·м
Тип трансмиссии	Механическая с цепным приводом
Передаточные числа коробки передач	$i_1 = 3,7; i_2 = 2,06; i_3 = 1,27; i_4 = 0,9; i_5 = 3,67$
Передаточное число главной передачи	$i_0 = 4,3$
Диаметр шины, м	0,6
Ширина шины, м	0,2



Рис. 9. Подготовленные препятствия типа «ров» на однородном (слева) и неоднородном (справа) грунтах

Для определения физико-механических характеристик грунтов использовалось следующее оборудование: пенетрометр грунтовой ПГ-1; исследовательский комплекс для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». Фрагменты замеров физико-механических характеристик грунта приведены на рис. 10.



Рис. 10. Фрагменты замеров физико-механических характеристик грунта

Полученные результаты измерений связности грунта и угла внутреннего трения в дальнейшем были использованы при проверке адекватности разработанных математических моделей. Усредненные параметры, принятые для расчетов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета

Параметры грунта	
Связность грунта $c$ , Па	5042
Угол внутреннего трения $\phi$ , град	28
Угол естественного уклона $\gamma$ , град	5

При проведении экспериментальных исследований была использована вновь разработанная методика измерений и схема измерения зон обрушения. Схема измерений изменения геометрии препятствия после взаимодействия

с двигателем включает в себя зоны возможной деформации грунта и представлена на рис. 11.

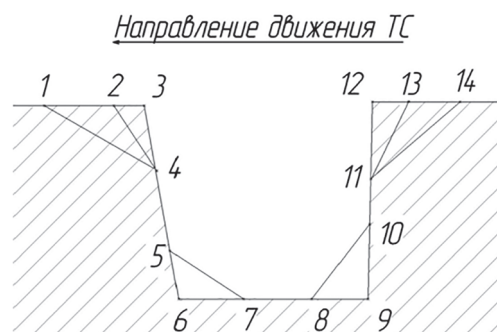


Рис. 11. Схема измерений изменения геометрии препятствия

В соответствии с разработанной методикой объект исследования, двигаясь с установленной минимально возможной скоростью движения на первой передаче, поочередно преодолевает рвы, увеличивающиеся по ширине. На рис. 12 представлены характерные фрагменты преодоления рва и застревания шасси.

Сбор данных о деформации препятствий (см. рис. 12) проводился путем измерения характерных участков в соответствии со схемой, показанной на рис. 11.

По результатам проведенных экспериментальных исследований подтверждена адекватность математической модели взаимодействия двигателя многоосной колесной машины с разрушаемым препятствием типа «ров» не только на однородных основаниях, что было описано в [8], но и на неоднородных. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований, а именно величины уширения рва на неоднородном грунте составило 12,6 %.

Результаты оценки адекватности позволили сделать вывод о работоспособности расчетного аппарата и, соответственно, возможности проведения дальнейшей расчетной оценки.

Рассмотрим примеры результатов расчетной оценки ширины преодолеваемого рва в зависимости от конструктивных параметров двигателя машин. Оценка производилась для нескольких диапазонов полных масс многоосных колесных машин. На рис. 14 и рис. 15 показаны результаты моделирования машин полной массой от 500 до 1000 кг, где представлены зависимости отношений ширины рва к диаметру колес от базы машины к диаметру колес и только от базы машины, а также отношение ширины рва от диаметра колеса машины.



*a*



*б*

Рис. 12. Фрагмент преодоления препятствия типа «ров» (*a*) и застревания (*б*)



Рис. 13. Сбор экспериментальных данных для однородных (слева) и неоднородных (справа) грунтов

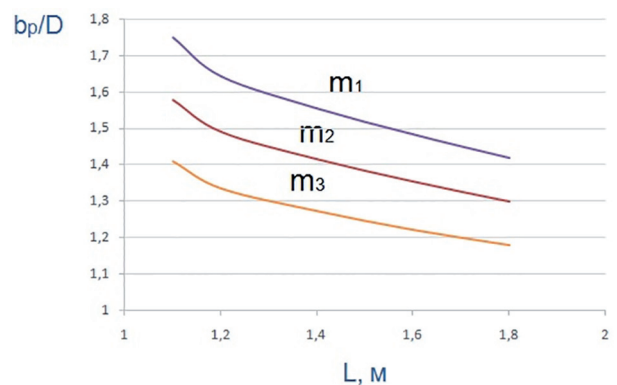
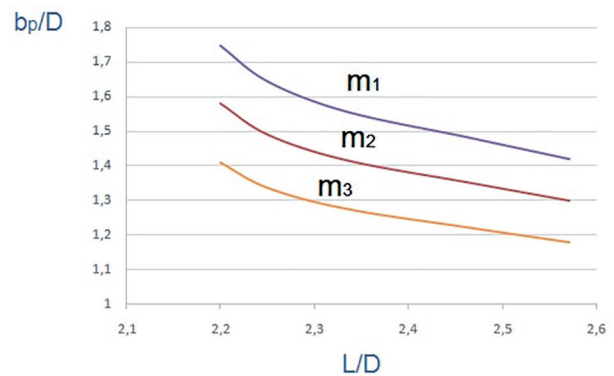


Рис. 14. Зависимости отношения ширины преодолеваемого рва к диаметру колеса от базы машины к диаметру колеса (слева) и от базы машины (справа) на однородном основании для машин полной массой  $m_1 = 500$  кг,  $m_2 = 700$  кг,  $m_3 = 1000$  кг



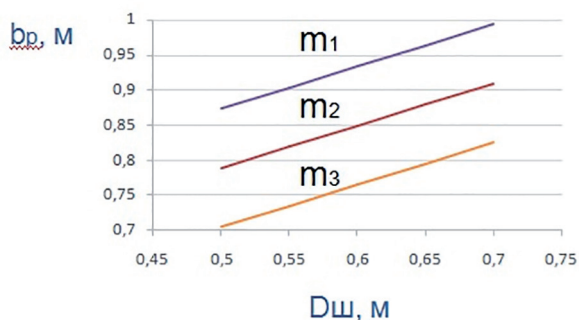


Рис. 15. Зависимость ширины преодолеваемого рва от диаметра колеса машины на однородном грунте для машин полной массой  $m_1 = 500$  кг,  $m_2 = 700$  кг,  $m_3 = 1000$  кг

Далее представлены результаты моделирования по неоднородному основанию. На рис. 16 и 17 представлены ранее описанные зависимости.

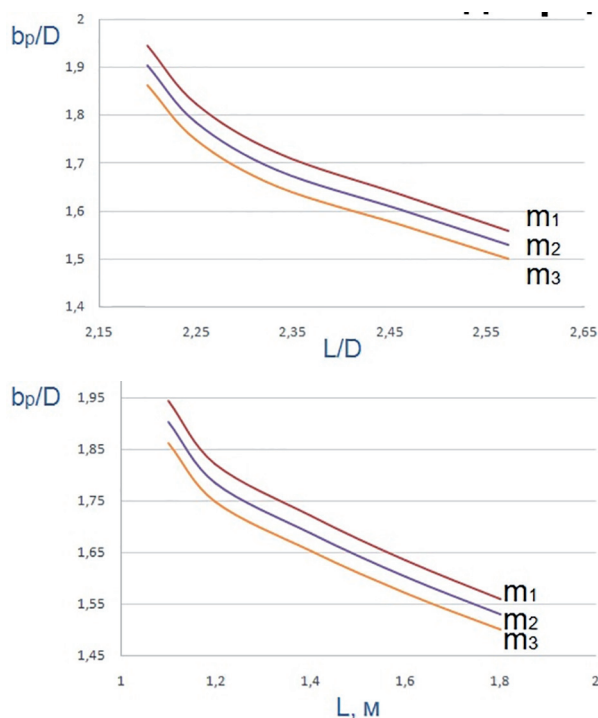


Рис. 16. Зависимости отношения ширины преодолеваемого рва к диаметру колеса от базы машины к диаметру колеса (слева) и от базы машины (справа) на неоднородном основании

Рассмотрим пример расчета оценки для другой весовой категории машин с полной массой от 5500 до 10500 кг (рис. 18 и 19).

Для более тяжелой категории машин, очевидно, что возможности по преодолению рвов изменяются более существенно в случае изменения полной массы машины и других параметров.

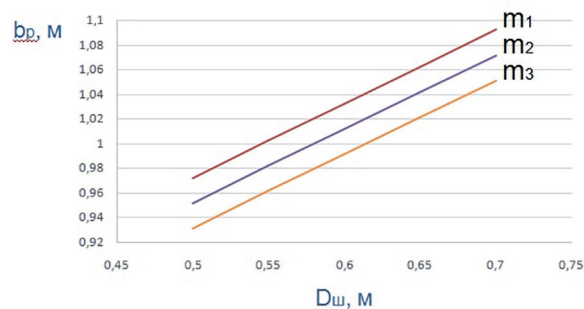


Рис. 17. Зависимость ширины преодолеваемого рва ТС от диаметра колеса машины на однородном грунте

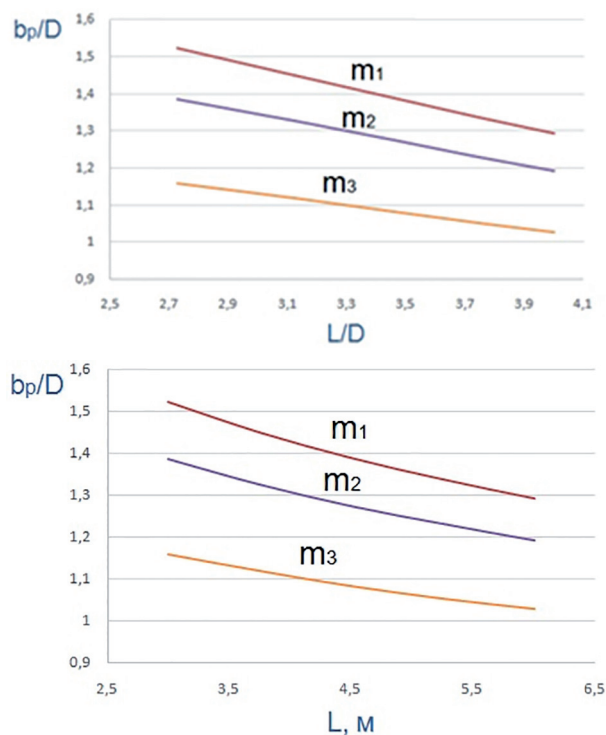


Рис. 18. Зависимости отношения ширины преодолеваемого рва к диаметру колеса от базы машины к диаметру колеса (слева) и от базы машины (справа) на однородном основании для машин полной массой  $m_1 = 5500$  кг,  $m_2 = 8000$  кг,  $m_3 = 10500$  кг

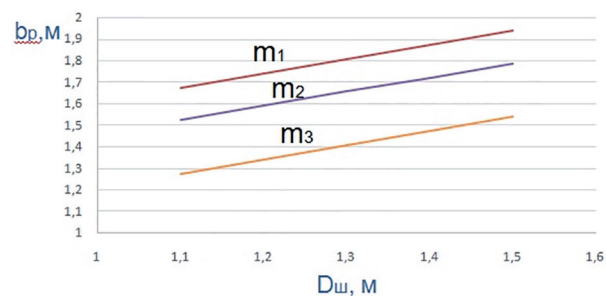


Рис. 19. Зависимость ширины преодолеваемого рва ТС от диаметра колеса машины на однородном грунте для машин полной массой  $m_1 = 5500$  кг,  $m_2 = 8000$  кг,  $m_3 = 10500$  кг

## Заключение

В рамках данного исследования получены следующие результаты и выводы. В качестве значимых параметров движителей многоосных колесных машин, влияющих на ширину преодолеваемого рва, определены диаметр и ширина колеса, колесная база и межосевые расстояния, полная масса и ее распределение по осям. Математическая модель взаимодействия движителя многоосной колесной машины с разрушаемым препятствием типа ров была уточнена и дополнена. Для подтверждения данной математической модели разработана методика экспериментальных исследований взаимодействия движителя многоосной колесной машины с разрушаемым барьерным препятствием типа «ров». В результате экспериментальные исследования подтвердили хорошую сходимость предложенных теоретических разработок и расчетов по математической модели. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований на гетерогенном грунте составило 12,6 %.

## Литература

1. Беляков В.В. и др. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3(100). С. 145–174.
2. <https://www.assets.rand.org/content/rand/blog/2013/10/war-robots-will-lesser-killing-not-increase-it/jcr:content/par/teaser.aspectfit.0x1200.jpg/1389668583180.jpg>
3. [https://pp.userapi.com/c638119/u314433622/video/x\\_e5f650bf.jpg](https://pp.userapi.com/c638119/u314433622/video/x_e5f650bf.jpg)
4. Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Кравец В.Н. Проходимость автомобиля. Н. Новгород: НГТУ, 1996. 200 с.
5. Галкин А.А. и др. Математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 6. С. 40–42.
6. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
7. Зезюлин Д.В. и др. Транспортное средство «КОРСАК» для обслуживания линейных объ-

ектов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4(106). С. 336–341.

8. Папунин А.В. и др. Экспериментально-теоретические исследования преодоления рва многоосными колесными машинами // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 4(119). С. 155–162.
9. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения / Под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2004. 961 с.

## References

1. Belyakov V.V. i dr. The concept of mobility of surface transport-technological machines. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2013. No 3(100), pp. 145–174 (in Russ.).
2. <https://www.assets.rand.org/content/rand/blog/2013/10/war-robots-will-lesser-killing-not-increase-it/jcr:content/par/teaser.aspectfit.0x1200.jpg/1389668583180.jpg>
3. [https://pp.userapi.com/c638119/u314433622/video/x\\_e5f650bf.jpg](https://pp.userapi.com/c638119/u314433622/video/x_e5f650bf.jpg)
4. Barakhtanov L.V., Belyakov V.V., Kravets V.N. *Prokhodimost' avtomobilya* [Floatation of vehicle]. N. Novgorod: NGTU Publ., 1996. 200 p.
5. Galkin A.A. i dr. Mathematical model of overcoming the destroyed moat by a multi-axial wheeled vehicle. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2012. No 6, pp. 40–42 (in Russ.).
6. Ageykin Ya.S. *Prokhodimost' avtomobiley* [Floatation of vehicle]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 232 p.
7. Zezyulin D.V. i dr. “KORSAK” vehicle for maintenance of linear objects. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2014. No 4(106), pp. 336–341 (in Russ.).
8. Papunin A.V. i dr. Experimental and theoretical studies of moat penetration by multi-axle wheeled vehicles. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2017. No 4(119), pp. 155–162 (in Russ.).
9. *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny. Osnovy teorii dvizheniya* [All-terrain transport-technological machines. Fundamentals of the theory of motion]. Pod obshch. red. V.V. Belyakova i A.P. Kulyashova. N. Novgorod: TALAM Publ., 2004. 961 p.

## IMPROVEMENT OF METHODS FOR CALCULATING THE INTERACTION OF PROPELLERS OF MULTI-AXLE WHEELED VEHICLES WITH BARRIER OBSTACLES

**A.V. Papunin, Dr.Eng. V.V. Belyakov**

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
nauka@nntu.ru

*The paper presents theoretical and experimental studies of overcoming by multi-axis machines of barrier destructible obstacles. The review showed that the existing calculation apparatus is based on the assumption that barrier obstacles are not deformable, i.e. the walls of the obstacle have sufficient strength. It happens rare on the ground. One of the most difficult cases of off-road traffic is the overcoming of the multi-axle wheeled vehicle of the destroyed moat, as the walls of the ditch collapse as the wheels of the machine pass, which leads to its broadening. Deficiencies of the existing settlement apparatus were identified, and subsequently it was refined and supplemented. To verify the results obtained, experimental studies were carried out. As a research object, a small class all-terrain vehicle with a gross mass of 700 kg was chosen. Tests were conducted on the bank of the Volga River in the vicinity of the city of Nizhny Novgorod. As support bases, sand (homogeneous soil) and a compacted ground surface with a sod layer (heterogeneous soil) were chosen. According to the newly obtained dependencies, the theoretically possible maximum width of the moat being overcome, given its destructibility, was determined. Also on the selected support bases, their physical and mechanical properties were studied, using the PG-1 ground penetrometer and the research complex for accelerated studies of the properties of cohesive and disconnected soils "Litvinov Field Laboratory PLL-9". In the future, dependencies characterizing the influence of various design parameters of transport-technological machines on the maximum width of the moat being overcome were obtained in the work, taking into account the destructibility of its walls.*

**Keywords:** multi-axle wheeled vehicles, collapsible barrier obstacles, moat.