

УДК 629. 336

А.В. Папунин, В.С. Макаров, В.В. Беляков

**МОДЕЛЬ ПРЕОДОЛЕНИЯ РАЗРУШАЕМОГО РВА  
МНОГООСНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНОЙ**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Рассматривается процесс движения многоосной машины через разрушаемый ров. Представлена математическая модель обрушения стенки рва в пространственной постановке при первом и последующих проходах колес машины. Приведены математические зависимости для расчета размера возникающего при этом уширения рва. Впервые приведена математическая модель обрушения стенок рва на неоднородном грунте, учитывающая влияние дерна на величину обрушения. Дается сравнение теоретических моделей и реального процесса обрушения стенок рва на песчаном грунте и грунте с дерном после проезда транспортного средства «Корсак». Разработана математическая модель динамики преодоления рва многоосной колесной машиной, учитывающая разрушение стенок рва. Приведена методика расчета профильной проходимости многоосных колесных машин при преодолении разрушаемого рва.

*Ключевые слова:* профильная проходимость, многоосная колесная машина, подвижность, разрушаемый ров.

Подвижность можно определить как 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, 2]. Одной из задач подвижности является поддержания проходимости. Можно выделить профильную и опорную проходимость, а также преодоление водных преград. Профильная проходимость характеризует возможность ТТМ преодолевать различные неровности пути без инженерного вмешательства [3,4]. Наиболее характерным и сложным случаем движения является преодоление ТТМ барьерных препятствий. В связи с этим они рассматриваются как один из основных случаев для оценки профильной проходимости. Оценочные показатели профильной проходимости автомобиля – дорожный просвет, передний и задний свесы, углы переднего и заднего свеса, продольный радиус проходимости, наибольший угол преодолеваемого подъема, наибольший угол преодолеваемого косогора. Также к ним можно отнести углы гибкости автопоезда, поперечный радиус проходимости, угол перекоса мостов, коэффициент совпадения следов передних и задних колес, ширина преодолеваемого в поперечном направлении рва, высота преодолеваемой вертикальной стенки (эскарпа), глубина преодолеваемого брода.

Проведенный анализ показал, что разрушаемость профильных препятствий сказывается на проходимости положительно во всех случаях, кроме преодоления рва. Были рассмотрены работы по исследованию профильной проходимости. В разное время изучением данных вопросов занимались многие исследователи: Я.С. Агейкин, А.С. Антонов, Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, Н.С. Вольская, А.И. Гришкевич, В.В. Гуськов, Г.В. Зимелев, В.А. Иларионов, В.Н. Кравец, В.В. Ларин, А.С. Литвинов, Г.И. Мамити, В.Н. Наумов, В.И. Песков, В.В. Селифонов, В.А. Скотников, Г.А. Смирнов, В.П. Тарасик, Я.Е. Фаробин, Е.А. Чудаков, M.G. Bekker, J. Wong и др.

Анализ данных исследований показал, что все математические модели рассматривают в основном только преодоление недеформируемых препятствий. Кроме того, не учитывается динамика преодоления рва, что является существенным недостатком данных зависимостей. В то же время эмпирически установлено, что чем больше скорость, тем больший ров машина может преодолеть. В связи с этим авторами была разработана математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной.

### Математическая модель взаимодействия колеса машины с разрушаемым рвом

На рис. 1 приведена схема преодоления машиной рва с учетом его разрушаемости.

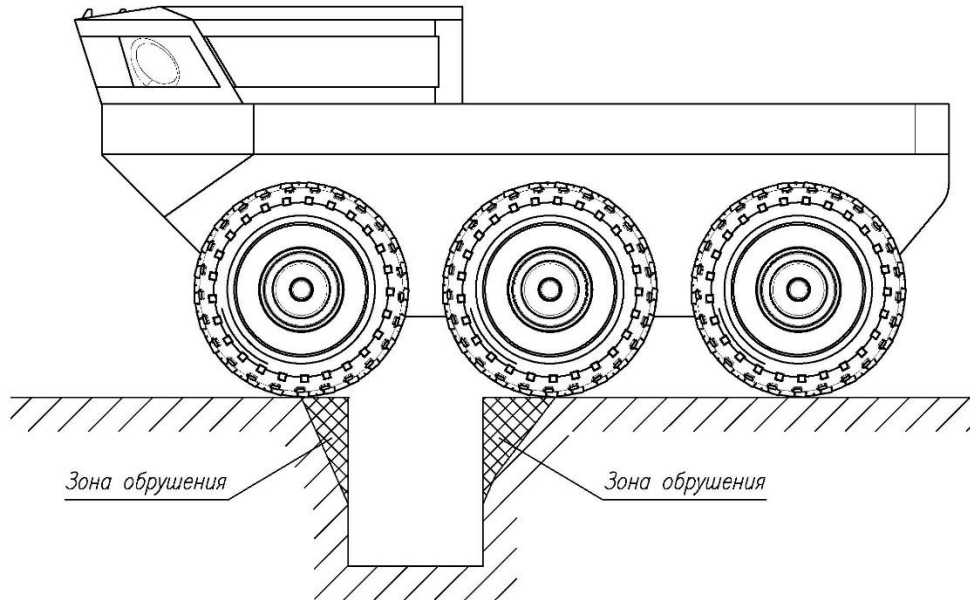


Рис. 1. Движение многоосной машине через ров

Ров становится шире, и происходит обрушение стенок по мере прохода колес многоосной машины.

### Математическая модель обрушения стенок рва на однородном грунте

На рис. 2. показана схема обрушения стенок рва в соответствии с работами [5, 6]. Слева изображен проход первого колеса. Ров имеет естественный уклон  $\gamma$ . Когда на краю рва оказывается колесо (сила  $G_K$ ), под действием этой силы будет происходить обрушение стенки по линии 1-2  $L_{X1}$ , ширина рва будет увеличиваться на величину 2-3  $L_{Y1}$ , а срез материала будет происходить в соответствии с углом внутреннего трения материала.

При проходе второго колеса будет наблюдаться картина в соответствии со схемой на рис. 2 (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.

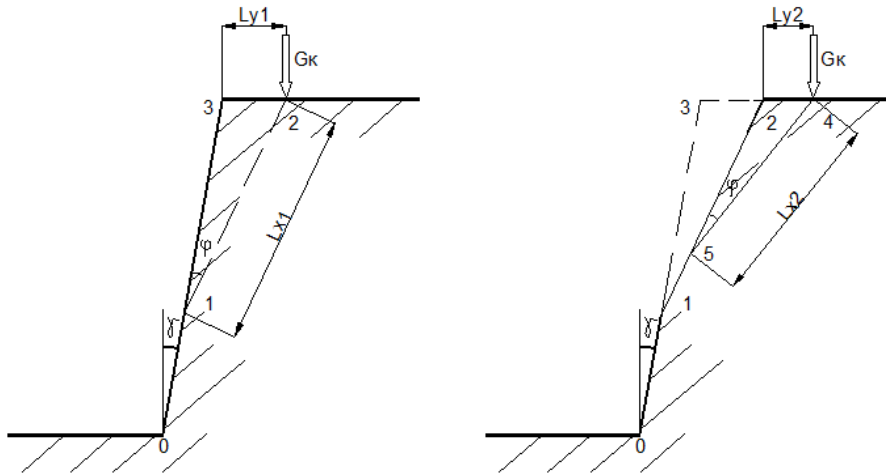


Рис. 2. Обрушение стенки рва при первом и втором проходах машины [5]

Также в работе [5] рассматривается сила сопротивления разрушению грунта за счет трения по поверхности 3 (рис. 3, а), и не учитываются зоны 1 и 2. На рис. 2.3 показан клин грунта подверженный разрушению. На рис. 3, а показана идеальная модель, а рис. 3, б – реальная, т.е. стенки 1 и 2 не параллельны, и ширина клина больше ширины колеса. Это отчетливо видно на рис. 4.

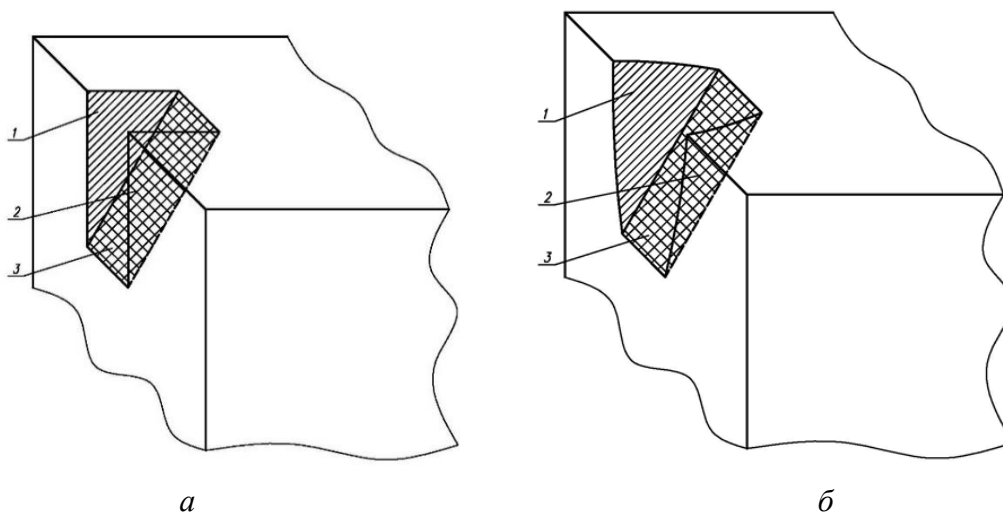


Рис. 3. Схема обрушения стенки рва  
а – идеальная, б – реальная



Рис. 4. Песчаный ров после проезда ТС «Корсаж»

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 [3, 4]:

$$F_{\text{тр}} = cA + F \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

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

Для участка 1, 2 примем, что

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

где  $A_{(1,2)}$  – площадь участка среза.

В соответствии со схемой на рис. 2:

$$A_{(1,2)} = \xi L_{Yi}^2 \frac{\cos(\gamma+(i-1)\varphi) \cos(\gamma+i\varphi)}{2 \sin \varphi}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий реальный процесс обрушения стенок рва ( $\xi = 1,1 - 1,4$ ).

Для участка 3 примем, что

$$F_{\text{тр}(3)} = cA_{(3)} + F \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где  $A_{(3)}$  – площадь участка среза.

В соответствии со схемой на рис. 2

$$A_{(3)} = B L_{Xi}, \quad (6)$$

$B$  – ширина колеи (колеса),  $L_{Xi} = L_{Yi} \frac{\cos(\gamma+(i-1)\varphi)}{\sin \varphi}$ , т.е.

$$A_{(3)} = B L_{Yi} \frac{\cos(\gamma+(i-1)\varphi)}{\sin \varphi}, \quad (7)$$

$$F = G_{Ki} \sin(\gamma + i\varphi). \quad (8)$$

Сила скольжения клина грунта будет равна

$$F_{\text{тр}} = G_{Ki} \cos(\gamma + i\varphi). \quad (9)$$

Таким образом, подставив значения в уравнение (1), получим

$$G_{Ki} \cos(\gamma + i\varphi) = c\xi L_{Yi}^2 \frac{\cos(\gamma + (i - 1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin \varphi} +$$

$$+ cB L_{Yi} \frac{\cos(\gamma+(i-1)\varphi)}{\sin \varphi} + G_{Ki} \sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg} \varphi.$$

$$a_p L_{Yi}^2 + b_p L_{Yi} + c_p = 0,$$

$$a_p = c\xi \frac{\cos(\gamma + (i - 1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin \varphi},$$

$$b_p = cB \frac{\cos(\gamma + (i - 1)\varphi)}{\sin \varphi},$$

$$c_p = G_{Ki} [\sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg} \varphi - \cos(\gamma + i\varphi)].$$

$$L_{Yi} = \frac{-b_p + \sqrt{b_p^2 - 4a_p c_p}}{2a_p} \quad (10)$$

Проведенные исследования показали, что характер обрушения однородного грунта соответствует теоретическим исследованиям. На рис. 4 показан фрагмент испытаний, проведенных на песчаном полотне пути в октябре 2017 года на специальном ТС «Корсак» [7] Как видно из рис. 4, на нем присутствуют обрушения стенок рва.

Однако, зависимость (10) справедлива только для специально подготовленных рвов вырытых однородном грунте типа песка, что маловероятно на практике. Общим случаем является ров на неоднородном грунте.

### Математическая модель обрушения стенок рва на неоднородном грунте

На рис. 5 показана схема участка рва, имеющего верхний слой дерна [8, 9]. На рис. 6 показан момент образования сдвига клина при преодолении рва на грунте с неоднородной структурой.

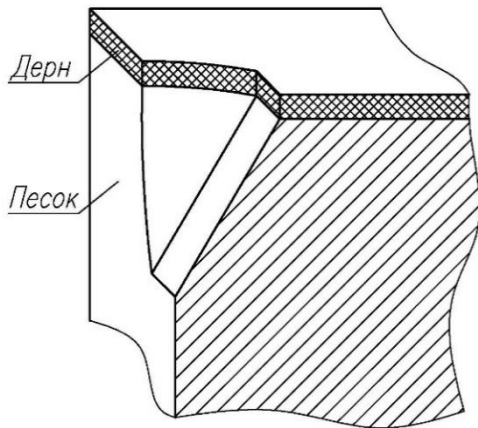


Рис. 5. Схема обрушения стенки рва на неоднородном грунте



Рис. 6. Ров на неоднородном грунте (песок с дерном) после проезда ТС «Корсак»

Для того чтобы учесть составляющую сопротивления от среза дерна в зависимость (1) необходимо ввести дополнительный член, учитывающий это.

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}(1,2)} + F_{\text{тр}(3)} + F_{\text{тр}(д)}, \quad (11)$$

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

$$F_{\text{тр}(д)} = c_d A(д), \quad (12)$$

где  $A(д)$  – площадь участка среза,  $c_d$  – связность дерна.

В соответствии со схемой на рис. 5,

$$A(д) = h_d (2\xi L_{Yi} + B), \quad (13)$$

где  $h_d$  – толщина дерна. Тогда зависимость (11) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} G_{ki} \cos(\gamma + i\varphi) &= c\xi L_{Yi}^2 \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin \varphi} + cB L_{Yi} \frac{\sin(\gamma + (i-1)\varphi)}{\sin \varphi} + \\ &+ G_{ki} \sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg} \varphi + c_d h_d (2\xi L_{Yi} + B) \\ G_{ki} \cos(\gamma + i\varphi) &= c\xi L_{Yi}^2 \frac{\cos(\gamma + (i-1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin \varphi} + \\ &+ cB L_{Yi} \frac{\cos(\gamma + (i-1)\varphi)}{\sin \varphi} + G_{ki} \sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg} \varphi + c_d h_d (2\xi L_{Yi} + B). \\ a_p L_{Yi}^2 + b_p L_{Yi} + c_p &= 0, \\ a_p &= c\xi \frac{\cos(\gamma + (i-1)\varphi) \cos(\gamma + i\varphi)}{\sin \varphi}, \quad b_p = cB \frac{\cos(\gamma + (i-1)\varphi)}{\sin \varphi} + 2c_d h_d \xi, \end{aligned}$$

$$c_p = G_{ki} [\sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg} \varphi - \cos(\gamma + i\varphi)] + c_d h_d B,$$

$$L_{\gamma i} = \frac{-b_p + \sqrt{b_p^2 - 4a_p c_p}}{2a_p} \quad (14)$$

Таким образом, зависимости (1-14) позволяют рассчитать величину уширения рва при проходе многоосной машины.

При определении суммарного увеличения ширины рва необходимо учитывать, что уширения после каждого прохода рассчитываются с учетом перераспределения нагрузок по движителям. При этом значения суммарного уширения для разных стенок рва (эскарпа и контрэскарпа) будут различными.

Аналитическая зависимость для расчета уширения рва для каждой стенки представлена ниже:

$$L_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n L_{\gamma i}, \quad (15)$$

где  $n$  – число осей.

Ширина разрушаемого рва после прохода машины будет в общем случае рассчитываться по зависимости:

$$b_{pp} = b_p + 2L_n, \quad (16)$$

где  $b_p$  – ширина рва до разрушения стенок.

Рассматриваемое увеличение ширины рва будет способствовать снижению проходимости шасси, в том числе его застреванию. Очевидно, что преодолению рва будет способствовать скорость движения шасси, поэтому необходимо рассматривать движение именно в динамике. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

### Математическая модель динамики преодоления рва многоосной колесной машиной

Схема преодоления критического значения ширины рва дана на рис. 7.

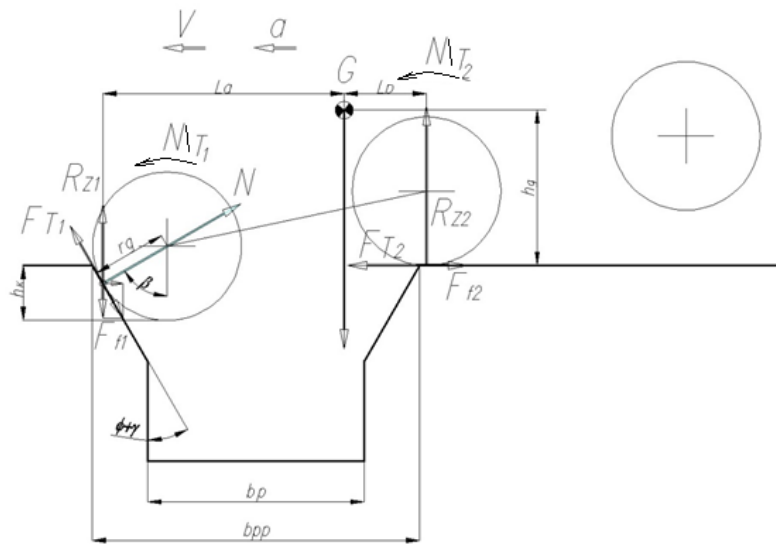


Рис. 7. Схема к расчету критического значения ширины разрушаемого рва

Рассмотрим схему на рис. 7 более подробно.

Расчет клевка машины вперед производится в соответствии с уравнением вращательного движения. В общем случае он будет определяться из выражения:

$$J\varepsilon = G_a l_b - F_w h_w - F_{кр} h_{кр} - m_a a h_g, \quad (17)$$

где  $J$  – момент инерции шасси,  $\varepsilon$  – вращательное ускорение,  $G_a$  – вес машины,  $l_b$  – плечо действия силы,  $l_b = l_2 \cos \alpha$ ,  $l_2$  – расстояние от центра масс до второй оси шасси,  $\alpha$  – угол клевка

машины,  $F_w$  – сила сопротивления воздуха,  $h_w$  – высота центра парусности,  $F_{кр}$  – сила сопротивления от крюковой нагрузки,  $h_{кр}$  – высота приложения крюковой нагрузки,  $m_a$  – масса машины,  $a$  – ускорение шасси,  $h_g$  – высота центра масс.

В случае установившегося движения с небольшой скоростью и принимая, что значения клевка машины невелики можно принять, что:

$$\varepsilon = \frac{G_a l_2}{J}. \quad (18)$$

Величину клевка можно определить в зависимости от ширины рва: она будет определяться в соответствие с уравнением движения.

$$\alpha = \alpha_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad (19)$$

где  $\alpha_0$  – начальный угол,  $\alpha_0 = 0$ ,  $\omega_0$  – начальная угловая скорость,  $\omega_0 = 0$ ,  $t$  – время движения через ров до контакта со стенкой,  $t = \frac{S}{V}$ ,  $S$  – ширина рва от разрушенного уступа, до контакта со стенкой.

Таким образом, величина клевка может быть рассчитана по зависимости:

$$h_k = (l_1 + l_2) \sin \alpha, \quad (20)$$

где  $l_1$  – расстояние от центра масс до 1-ой оси шасси.

Рассмотрим взаимосвязь параметров в соответствие со схемой на рис. 7.

$$G_a = R_{z1} + R_{z2}, \quad (21)$$

$$\frac{R_{z1}}{R_{z2}} = \frac{l_a}{l_b}, \quad (22)$$

$$l_a = l_1 \cos \alpha + r_d \sin \beta, \quad (23)$$

где  $r_d$  – динамический радиус колеса.

Угол  $\beta$  будет определяться исходя из зависимости:

$$\beta = \min[90 - (\varphi + \gamma); \arccos(1 - h_k r_d^{-1})], \quad (24)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта,  $\gamma$  – угол откоса стенки рва [3].

Для оценки возможности движения, рассмотрим уравнения движения шасси. Спроецируем силы на оси ОХ, ОУ и рассмотрим равенство моментов относительно точки контакта первого колеса со стенкой рва.

$$\begin{aligned} X: F_{T_1} \cos \beta - F_{f_1} \cos \beta - N \sin \beta + F_{T_2} - F_{f_2} - F_w - F_{кр} &= m \frac{dV}{dt} \\ Y: F_{T_1} \sin \beta - F_{f_1} \sin \beta + N \cos \beta + R_{z_2} - G_a &= m \frac{dV_y}{dt} \\ M: -G_a l_a + R_{z_2} (l_a + l_b) + (F_{T_2} - F_{f_2}) (h_k - (r_d - r_d \cos \beta)) + \\ + m a (h_g - (r_d - r_d \cos \beta)) - F_w (h_w - (r_d - r_d \cos \beta)) + M_T &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (25)$$

где  $F_{T_i}$  – реализуемая сила тяги на колесах  $i$ -ой оси,  $F_{f_i}$  – сила сопротивления качения на колесах  $i$ -ой оси, в расчетах можно принять  $F_{f_i} = f N_i$ ,  $N$  – нормальная реакция на колесо,  $f$  – сопротивление качения колеса по грунтовой поверхности; в рассматриваемых условиях в соответствии с [6]  $f = 0,02 - 0,05$ ,  $M_T$  – суммарный тяговый момент, подводимый к колесам шасси.

Максимальная ширина преодолеваемого рва будет, если сила тяги на колесах машины не менее силы сцепления. Таким образом, сила тяги может быть рассчитана по зависимости [3, 10]:

$$F_T = F_{T_{ш}} + F_{T_{г}}, \quad (26)$$

где  $F_{T_{ш}}$  – сила тяги по сцеплению от трения материала шины по грунту;  $F_{T_{г}}$  – сила тяги по сцеплению от внутреннего трения материала грунта.

$F_{T_{ш}}$  может быть рассчитана по упрощенной зависимости:

$$F_{T_{ш}} = \varphi_p N k_H, \quad (27)$$

где  $\varphi_p$  – коэффициент трения резины по грунту; в рассматриваемых условиях в соответствии с [3]  $\varphi_p = 0,5 - 0,8$ ,  $k_n$  – коэффициент насыщенности протектора, для шасси исследуемых в данной работе  $k_n = 0,4 - 0,6$ .

$$F_{T_i} = (cA + N_i \operatorname{tg} \varphi)(1 - k_n), \quad (28)$$

где  $c$  – коэффициент связности грунта и  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта,  $A$  – площадь контакта колеса с опорной поверхностью.

Таким образом, используя формулы (17-28), можно рассчитать максимальную преодолеваемую ширину разрушаемого рва машиной с колесной формулой бхб. С учетом предложенных математических зависимостей рассмотрим методику расчета профильной проходимости многоосных колесных машин при преодолении разрушаемого рва.

### Методика расчета профильной проходимости многоосных колесных машин при преодолении разрушаемого рва

Для начала задаются типом грунта и параметрами шасси. По зависимостям (24, 25) определяют  $\beta^{\max}$  – предельный угол скоса обрушаемой стенки рва, который может преодолеть шасси по условию сцепления.

Далее проверяется условие

$$(90 - \beta^{\max}) < (\varphi + \gamma). \quad (29)$$

Если оно выполняется, то  $h_k = L_x \cos(\gamma + \varphi)$ . Отсюда можно вычислить параметры предельной скорости и ширины рва используя зависимости (18-20). При этом целесообразно рассчитывать параметр  $\zeta$ .

$$\zeta = \left(\frac{S}{V}\right)^2 \quad (30)$$

$$\zeta = 2 \left(\frac{J}{G_a l_2}\right) \arcsin \left(\frac{L_{X1} \cos(\gamma + \varphi)}{(l_1 + l_2)}\right) \quad (31)$$

Зная параметр  $\zeta$ , можно рассчитать соотношение  $\frac{S}{V}$ . Таким образом, задаваясь скоростями определяем параметр ширины рва, зная который можно найти ширину разрушаемого рва, который может преодолеть шасси с колесной формулой бхб.

$$S = b_p + L_{Y_{кэ2}} - r_d \cos \beta, \quad (32)$$

где  $F_{Y_{кэ2}}$  – уширение от разрушение стенки рва (контрэскарпа) после прохода 2-го колеса.

В соответствии с [5] принимаем предельно допустимые значения

$$b_{p \max} = L \cos \alpha - L_{Y_{кэ2}} + r_d \cos \beta + K_D D, \quad (33)$$

где  $L$  – межосевое расстояние,  $K_D$  – эмпирический коэффициент формы шины, учитывающий контакт со стенкой (контрэскарпом) не разрушаемого рва. В соответствии с [5] для одной стенки  $K_D = 0,3$ ,  $D$  – диаметр шины.

В противном случае, если

$$(90 - \beta^{\max}) > (\varphi + \gamma), \quad (34)$$

то

$$h_k = r_d (1 - \cos \beta). \quad (35)$$

При этом:  $\zeta = 2 \left(\frac{J}{G_a l_2}\right) \arcsin \left(\frac{r_d (1 - \cos \beta)}{(l_1 + l_2)}\right)$  (2.42)

$$S = b_p + (L_{Y_{э1}} + L_{Y_{кэ2}}) - r_d \cos \beta \quad (36)$$

где  $F_{Y_{э1}}$  – уширение от разрушение стенки рва (эскарпа) после прохода 1-го колеса.

$$b_{p \max} = L \cos \alpha - (L_{Y_{э1}} + L_{Y_{кэ2}}) + r_d \cos \beta + K_D D, \quad (37)$$

Также, в соответствии с [4], минимальное исследуемое значение ширины рва можно принять:

$$b_{p \min} = 0,6 D \quad (38)$$

Таким образом, указанная методика позволяет рассчитать для заданных параметров шасси и грунта взаимозависимые параметры скорости и ширины преодолеваемого рва.



### Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Дано определение подвижности ТТМ.
2. Сделан вывод, что разрушаемость профильных препятствий сказывается положительно на проходимость во всех случаях, кроме преодоления рва.
3. Проведенный анализ исследований других авторов показал, что в основном все математические модели рассматривают только преодоление недеформируемых препятствий. Кроме того, в указанных моделях не рассматривается динамика преодоления рва, что также является недостатком данных зависимостей.
4. Разработана математическая модель преодоления рва многоосной машиной с колесной формулой 6х6, учитывающая особенности взаимодействия шасси с разрушаемыми стенками рва, а также динамику движения, и включающая:
  - математическую модель взаимодействия колеса машины с разрушаемым рвом и математическую модель обрушения стенок рва на однородном грунте, отличающуюся от ранее выполненных исследований пространственной постановкой задачи и учетом дополнительных сил, возникающих при этом;
  - математическую модель обрушения стенок рва на неоднородном грунте.
5. Разработана методика расчета профильной проходимости многоосных колесных машин при преодолении разрушаемого рва.

### Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-175.
2. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 72-77.
3. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Нижний Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
4. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. **Галкин, Д.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной / Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, В.С. Макаров [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6. – С. 40-42.
6. **Зайцев, А.С.** Математическая модель преодоления рва многоосной колесной машиной / А.С. Зайцев, Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – № 1-2 (42-43). – С. 39-40.
7. **Папунин, А.В.** Экспериментально-теоретические исследования преодоления рва многоосными колесными машинами / А.В. Папунин, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 155-162.
8. **Папунин, А.В.** Расчет ширины преодолеваемого рва многоосной колесной машиной / А.В. Папунин, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербургский горный университет, 12-13 апреля 2018 г.). – СПб, 2018. – С. 35.
9. **Papunin, A.V.** A dynamic model of unsupported pit traversal by a vehicle with 6x6 wheel arrangement / A.V. Papunin, V.V. Belyakov, V.S. // Makarov Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018
10. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание (Монография) / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2004. – 961 с.

Дата поступления  
в редакцию: 09.10.2018

**A.V. Papunin, V.S. Makarov, V.V. Belyakov**

**MODEL OF OVERCOMING A DESTRUCTIVE DITCH  
BY A MULTI-WHEELED VEHICLES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** This article discusses the need for calculating the maximum overcoming of the ditch of a multi-axle wheeled vehicle, taking into account the destructibility of profile obstacles and the movement dynamics of the vehicle.

**Design / methodology / approach:** Mathematical models of the overcrowded ditch are considered, taking into account the collapse of the ditch walls on a uniform and non-uniform soil. The calculation method is given.

**Findings:** The proposed method allows us to give a better assessment of the cross-country profile of multi-axle wheeled vehicles.

**Research limitations/implications:** This study was conducted for vehicles with 6x6 wheel formula.

**Originality/value:** New mathematical models describing the process of destruction of the walls of the moat in the spatial formulation and taking into account the heterogeneity of the soil are given. A new calculation method has been developed.

*Keywords:* profile passability, multi-wheeled vehicles, mobility, destroyed ditch