

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПОЛОТНОМ ПУТИ В КОНЦЕПЦИИ ПОДВИЖНОСТИ

А.И. Марковнина✉, В.В. Беляков, В.С. Макаров,
У.Ш. Вахидов, А.А. Ключкин

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», 603155, Россия,
г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

makvl2010@gmail.com

Рассмотрена методика расчета параметра подвижности транспортно-технологических машин по трем составляющим: техническим характеристикам машины, условиям движения на территории, режиму движения. Представлены технические характеристики транспортного средства, необходимые для определения первой составляющей, проведено их сравнение с условиями движения на конкретной территории. Приведены технические оценки вездеходов. Сделан теоретический вывод о типе вездехода, который может преодолевать разнообразные препятствия на выбранном участке.

Ключевые слова: подвижность, проходимость, технические характеристики, транспортно-технологическая машина

Ссылка для цитирования: Марковнина А.И., Беляков В.В., Макаров В.С., Вахидов У.Ш., Ключкин А.А. Оценка взаимодействия транспортного средства с полотном пути в концепции подвижности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 162–171. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-162-171

Подвижность — это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее ее 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].

Проходимость — это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, в том числе по бездорожью, возможность преодолевать различные препятствия, которое относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности [3]. На основе параметров ТТМ и дорожных условий осуществляется построение карты подвижности.

Управление ТТМ сводится к решению следующих задач:

- 1) поддержание скорости движения;
- 2) поддержание ориентации и курсовой устойчивости;
- 3) поддержание подвижности;
- 4) устранение критических ситуаций;
- 5) обеспечение жизнеспособности и безопасности.

Для построения карты подвижности [4–10] конкретной ТТМ можно оперировать 1-й, 2-й и 4-й задачами. Поддержание скорости движения включает в себя управление энергетической, силовой установками и органами торможения. Поддержание ориентации и курсовой устойчивости состоит из уровней управляемости, устойчивости и маневренности. Задача устранения критических ситуаций многогранна, для ее решения ТТМ следует обеспечить системами помощи водителю и поддержания проходимости [11].

Цель работы

Цель работы — разработка методики расчета параметра подвижности, учитывающего одновременно технические характеристики ТТМ, особенности микрорельефа и физико-механические свойства материала полотна пути территории движения.

Методика расчета показателя подвижности

Максимальный показатель подвижности фиксируется при движении вездехода в условиях стабильного опорного основания. Его рассчитывают при отсутствии влияния внешних факторов, т. е. по анализу характеристик

транспортного средства, без учета влияния физико-механических свойств материала полотна пути. Данный уровень будет считаться эффективной подвижностью рассматриваемого транспортного средства. Все другие случаи движения происходят в условиях нестабильного опорного основания при неэффективном уровне подвижности, когда снижается скорость движения, возрастает расход топлива и наблюдаются другие негативные последствия. При частичной потере подвижности влияние внешних факторов на движение незначительно и скорость движения останется близкой к максимально возможной или снизится несущественно. При критической потере подвижности скорость ТТМ будет близка к минимальной, создавая большой риск полной потери подвижности, когда ТТМ полностью теряет возможность двигаться.

Для определения параметра подвижности следует проанализировать возможность или невозможность проезда машины по рассматриваемой местности, которые подразделяются на три варианта движения транспортного средства:

1) движение не затруднено (с сохранением эффективной подвижности или с неэффективной подвижностью) [12–14];

2) замедлено (с неэффективной подвижностью, частичной потерей подвижности);

3) невозможно (с полной потерей подвижности).

При незатрудненном движении ТТМ проедет по участку без маневрирования и на скорости, близкой к максимальной. В случае замедленного движения для ТТМ может возникнуть необходимость притормаживания, маневрирования или понижения передачи. При попытке движения в третьем случае ТТМ застрянет вследствие недостаточного сцепления с полотном пути или машине будет нанесен ущерб по причине сложного микрорельефа, что сделает дальнейшее движение невозможным [15, 16, 28–36].

Для оценки подвижности машины относительно условий местности (территории) используют карты подвижности. Разделив карту местности на небольшие участки и рассчитав показатель подвижности для каждого из них, составляют общую карту подвижности определенной ТТМ на данной территории. Такая карта позволяет определить наиболее короткий и максимально быстрый маршрут.

Составление карт подвижности ТТМ на основании характеристик грунта отличается высокой трудоемкостью, так как предусматривает ручной труд в большом объеме. Системный анализ различных показателей, биоклиматические

схемы и статистические различия между отдельными элементами поверхности необходимы при определении по карте границ участков без проведения дополнительного мониторинга местности. Наряду с картами целесообразно использовать фотографии поверхности с растительностью, а также описания грунтов и их характеристики. Важно подключать к работе почвенные и геологические карты, которые могут представлять собой исходный материал для определения оптимальных маршрутов.

После определения геологически однородных участков выделяют поверхности, не составляющие препятствия при движении ТТМ, т. е. плоские и твердые. Это позволяет определить строение (профиль) труднопроходимых участков и изучить физико-механические свойства мягких грунтов, не учитывая профиль.

Определение показателя подвижности относится к решению задачи многокритериальной оптимизации и позволяет получить безразмерную величину

$$P = \lambda_m \pm \lambda_t \pm \lambda_p, \quad (1)$$

где λ_m — техническая оценка машины;

λ_t — эксплуатационная оценка территории;

λ_p — оценка режима движения.

Знак «±» означает, что в частных случаях рельеф территории и режим движения могут оказывать благоприятное (+) или негативное (–) влияние на подвижность ТТМ. Например, при движении в гору ТТМ может не хватить мощности или сцепления с грунтом, хотя при движении на спуск требуется меньшая мощность для проезда и ТТМ может съехать с горы под воздействием силы тяжести. При этом рассматривается только такой склон, угол наклона которого не приведет к опрокидыванию или повреждению транспортного средства.

Обобщенные критерии технической оценки машины λ_m рассчитываются как функция полезности [17, 18] по методу многокритериальной оценки

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n w_i Q_i, \quad (2)$$

где n — количество учитываемых технических характеристик;

w_i — весовой коэффициент важности частного критерия (при этом $\sum w_i = 1$);

Q_i — оценка частного критерия.

Технические характеристики ТТМ разнообразны, имеют различные единицы измерения и значения, отличающиеся по градации. Сравнивать между собой длину вездехода и мощность двигателя без предварительной

подготовки невозможно, поэтому все значения критериев приводятся к безразмерным нормированным значениям [19].

Предварительно значения частных критериев с помощью положительных линейных преобразований приводятся к единому безразмерному виду — шкале $[\alpha, \beta]$, где $\alpha = 0$, $\beta = 1$.

Максимизируются следующие показатели машины: грузоподъемность, дорожный просвет, колесная база, передний свес, максимальная скорость. Остальные показатели минимизируются. Например, чем больше грузоподъемность и скорость, тем эффективнее работа ТТМ, чем больше передний свес, тем больший уклон может преодолеть ТТМ. В то же время чем меньше полная масса, тем меньше нагрузка на оси и давление на грунт, чем меньше габаритные размеры, тем больше вероятность проезда по узкому коридору между дискретными препятствиями или по их краю [20]. Для критериев, которые максимизируются (т. е. тем лучше, чем значение выше), преобразование имеет вид

$$Q_i = \frac{Q_i - Q_i^-}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha,$$

а для критериев, которые минимизируются (тем лучше, чем значение критерия ниже) — вид

$$Q_i = \frac{Q_i^+ - Q_i}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha,$$

при этом $R_i = Q_i^+ - Q_i^-$ — размах критерия Q_i , разница между максимальным и минимальным значениями.

После получения безразмерных величин применяется метод экспертных оценок — попарное сравнение критериев, по которому любые свойства любого объекта можно оценить по единой шкале [21]. В данной выборке нет деления критериев по группам, поскольку их мало. При большей выборке характеристик применяется деление критериев на группы: габаритные размеры, параметры двигателя, параметры движителя и др. В группах, в свою очередь, деление не требуется.

По итогу весовые оценки критериев выставляются для групп в целом и внутри каждой группы. Величина весов с таким делением становится меньше, но точность оценки, соответственно, и результатов расчетов, повышается.

Подставляя полученные данные в формулу (2), рассчитывается технический показатель транспортного средства, который отражает уровень эффективной подвижности.

Рассматривая параметр подвижности, как возможность ТТМ преодолевать препятствия при выполнении каких-либо задач (движения и маневрирования), нельзя рассматривать показатель, характеризующий рельеф территории, по которой движется ТТМ, как самостоятельный объект, в отрыве от характеристик ТТМ. Рельеф территории может иметь разную оценку по проходимости и подвижности для разных транспортных средств, в зависимости от геометрических и силовых характеристик.

При расчете комплексного показателя эксплуатационной оценки территории λ_t рассматриваются два вопроса: проедет ли транспортное средство по имеющимся сцепным свойствам (показателям опорной проходимости) и по габаритным (показателям профильной проходимости). По сцепным свойствам рассматриваются непосредственно сцепление с дорогой и вероятность пробуксовки. Геометрические показатели включают в себя следующие возможности ТТМ [22]:

- преодоление подъемов;
- преодоление спусков, движение вдоль склона (сопротивляемость перевороту);
- преодоление эскарпов, как при наезде на препятствие, так и при спуске с него;
- преодоление рвов, валов, как минимум не задевая препятствие элементами подвески;
- проезд дискретных препятствий — сбоку или между ними.

Рассмотрим методику расчета показателя территории движения. Для оценки предлагается использовать вероятностный подход.

Сначала охарактеризуем геометрические показатели. Оценка непроходимости территории представляет собой ответ на два вопроса: 1) с какой вероятностью ТТМ будет взаимодействовать с препятствием на данном участке; 2) с какой вероятностью препятствие сможет остановить ТТМ.

Вероятность взаимодействия ТТМ с препятствием определяется отношением площади препятствия к площади участка. Вероятность преодоления препятствия выражается отношением геометрического параметра препятствия к соответствующему параметру ТТМ. В итоговую формулу оценки подвижности ТТМ вносится значение, ухудшающее общую оценку автомобиля, а также числовая оценка микрорельефа участка, создающего сложности для движения, т. е. обуславливающего полную остановку ТТМ, что в результате будет означать полную потерю подвижности.

Окончательное значение покажет подвижность ТТМ на заданном участке территории в имеющихся условиях. Значение показателя

подвижности $\Pi > 0$ будет свидетельствовать о наличии у машины возможностей для проезда, $\Pi < 0$ — об остановке и невозможности преодолеть препятствие, т. е. о необходимости использования иного маршрута.

За эксплуатационную оценку территории λ_T можно принять оценку ее непроходимости выбранным вездеходом. Показатель λ_T можно рассчитать с помощью методов теории вероятностей и получить ответ на вопрос, с какой вероятностью вездеход остановится, перемещаясь по участку. В целом такой метод расчета применим для участка любой площади, однако чем больше будет участок, тем больше будет погрешность [23].

Устанавливается:

– событие A — вероятность остановки вездехода при проезде по препятствию или грунту с малой несущей способностью;

– событие B — вероятность попадания вездехода на препятствие или грунт с малой несущей способностью.

Предлагается два метода расчета показателя непроходимости участка территории конкретной машины.

Метод I. По теореме умножения вероятностей [24]. Вероятность произведения двух зависимых событий равна произведению вероятности одного из них и условной вероятности другого при условии, что первое событие произошло:

$$P(AB) = P(A)P(B/A) = P(B)P(A/B).$$

При этом

$$P(B) = P(\text{опоры}) + P(\text{препятствие}) - P(\text{опора} \cdot \text{препятствие})$$

где $P(\text{опоры})$ — вероятность остановки вездехода вследствие свойств материала полотна пути;

$P(\text{препятствие})$ — вероятность остановки вездехода при наезде на препятствие, геометрические особенности которого непреодолимы для выбранной техники.

Вероятности остановки из-за свойств материала полотна пути и при наезде на препятствие:

$$P(\text{опоры}) = \frac{S_{\text{оп}}}{S_{\text{уч}}};$$

$$P(\text{препятствия}) = \frac{S_{\text{преп}}}{S_{\text{уч}}},$$

где $S_{\text{оп}}$ — площадь фрагмента участка с низкой несущей способностью (площадь нестабильной опоры);

$S_{\text{преп}}$ — площадь препятствия на участке;

$S_{\text{уч}}$ — площадь участка территории.

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) = \\ &= P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) - P(A_1A_2) - \\ &\quad - P(A_1A_3) - P(A_1A_4) - P(A_2A_3) - \\ &\quad - P(A_2A_4) - P(A_3A_4) + P(A_1A_2A_3) + \\ &\quad + P(A_1A_2A_4) + P(A_2A_3A_4) + P(A_1A_3A_4) - \\ &\quad - P(A_1A_2A_3A_4), \end{aligned}$$

где $P(A_1)$, $P(A_2)$, $P(A_3)$, $P(A_4)$ — вероятность непреодоления препятствия по высоте, углу наклона, ширине препятствия, расстоянию между препятствиями (при объезде дискретных препятствий на участке).

Метод II. По формуле полной вероятности [25]. Если событие A может произойти только при условии появления одного из событий H_1 , H_2 , ..., H_n , называемых гипотезами, образующих полную группу событий, то вероятность события A равна сумме произведений вероятностей каждого из этих событий на условные вероятности события A

$$P(A) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) + \dots + P(H_n)P(A/H_n); \quad (3)$$

$$P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_n) = 1.$$

Для такого расчета в рассматриваемых условиях выдвигаются следующие гипотезы:

– H_1 — наезд на устойчивое твердое препятствие (влияет только геометрия);

– H_2 — езда по ровному участку с устойчивой твердой поверхностью (влияют только физико-механические свойства грунта);

– H_3 — наезд на хрупкое неустойчивое препятствие (влияют и геометрия, и физико-механические свойства грунта);

– H_4 — езда по ровному участку с неустойчивой нетвердой поверхностью (влияет только физико-механические свойства грунта).

Указанные гипотезы охватывают все возможные варианты движения. При этом гипотезы H_2 и H_4 можно объединить, поскольку они обозначают одно и то же — проезд по ровному участку, причем и в том, и в другом случае на движение влияют только физико-механические свойства поверхности движения, отличается только величина воздействия на возможность проезда. Соответственно, формула полной вероятности примет вид

$$P(A) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) + P(H_3)P(A/H_3),$$

где $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$ — вероятность проезда соответственно: по препятствию с хорошим грунтом, по ровному участку с любым грунтом, по препятствию с плохим грунтом;

$P(A/H_1)$ — вероятность остановки вездехода вследствие геометрических особенностей рельефа и ТТМ;

$P(A/H_2)$ — вероятность остановки вездехода из-за особенностей сцеплений шин с опорой;

$P(A/H_3)$ — вероятность остановки вездехода при совместном влиянии геометрических и сцепных особенностей рельефа и грунта.

Описанные вероятности рассчитываются по формулам:

$$H_n = \frac{S_{\text{ф.уч}}}{S_{\text{уч}}};$$

$$P(A/H_1) = P(A_1 + A_2 + A_3 + A_4);$$

$$P(A/H_2) = P(K) + P(C\sigma) - P(KC\sigma);$$

$$P(A/H_3) = P(A/H_1) + P(A/H_2) - P(A/H_1 \times A/H_2),$$

где $S_{\text{ф.уч}}$ — площадь рассматриваемого фрагмента участка (ровный или имеется препятствие);

$S_{\text{уч}}$ — площадь всего рассматриваемого участка;

$P(A_1)$, $P(A_2)$, $P(A_3)$, $P(A_4)$ — вероятность преодоления препятствия: по высоте, углу наклона, ширине препятствия, расстоянию между препятствиями (при объезде дискретных препятствий на участке);

$P(K)$ — вероятность машины завязнуть в грунте;

$P(C\sigma)$ — вероятность забуксовать из-за недостаточного коэффициента сцепления.

Последние две вероятности рассчитываются следующим образом:

$$P(K) = \frac{h_{\text{кол}}}{h_{\text{клир}}};$$

$$P(C\sigma) = \frac{\varphi_{\text{б}}}{\varphi_{\text{сц}}},$$

где $h_{\text{кол}}$ — высота колеи;

$h_{\text{клир}}$ — дорожный просвет машины;

$\varphi_{\text{б}}$ — коэффициент буксования;

$\varphi_{\text{сц}}$ — коэффициент сцепления.

Вероятности преодоления являются отношениями характеристик микрорельефа территории к геометрическим параметрам вездехода, а именно

$$P(A_1) = \frac{h_{\text{т}}}{h_{\text{ш}}},$$

где $h_{\text{т}}$ — высота препятствия на местности;

$h_{\text{ш}}$ — максимально возможная высота препятствия для преодоления вездеходом;

$$P(A_2) = \frac{\alpha_{\text{т}}}{\alpha_{\text{м}}},$$

где $\alpha_{\text{т}}$ — угол наклона препятствия;

$\alpha_{\text{м}}$ — максимально возможный преодолимый угол (угол съезда или въезда машины);

$$P(A_3) = \frac{b_{\text{т}}}{b_{\text{м}}},$$

где $b_{\text{т}}$ — ширина (длина) препятствия;

$b_{\text{м}}$ — максимальная ширина препятствия, которое возможно преодолеть на выбранной машине;

$$P(A_4) = \frac{l_{\text{м}}}{l_0},$$

где $l_{\text{м}}$ — ширина вездехода (габаритный коридор);

l_0 — расстояние между дискретными препятствиями.

Каждый из приведенных выше параметров описывает частный случай препятствия: $P(A_1)$ — прямые углы, эскарпы, высокие препятствия; $P(A_2)$ — холмы, бугры, овраги и прочие препятствия с плавно изменяющимся рельефом; $P(A_3)$ — рвы, дискретные препятствия, ямы; $P(A_4)$ — движение в случае, когда препятствие невозможно преодолеть путем прямого проезда и возникает необходимость маневрирования, например в лесу.

После получения оценки непроходимости территории и оценки уровня эффективной подвижности получаем значение, характеризующее возможность проезда вездехода по выбранному участку. Если значение > 0 — вездеход проедет, если < 0 — потеряет возможность дальнейшего продвижения.

Для того чтобы понять, насколько быстро вездеход сможет преодолеть участок, находится отношение значения подвижности к значению эффективной подвижности

$$P_v = \frac{\lambda_{\text{м}}}{\Pi},$$

где P_v — оценка подвижности по скорости;

$\lambda_{\text{м}}$ — техническая оценка машины;

Π — показатель подвижности ТТМ.

Если итоговое значение P_v составляет от 0,75 до 0,99, вездеход может преодолеть участок на скорости, близкой к максимально возможной; если от 0,3 до 0,75 — движение частично затруднено; от 0,15 до 0,3 — движение затруднено в значительной степени; от 0,01 до 0,15 — движение граничит с риском полной потери подвижности ТТМ.

Т а б л и ц а 1

Вероятность увидеть препятствие, $P_{\text{увид}}$ [26]Probability of seeing an obstacle, $P_{\text{увид}}$ [26]

Ограниченная видимость, %	Недостаточная видимость, %				
	1	25	50	75	99
1	1,00	0,75	0,50	0,25	0,01
25	0,75	0,56	0,38	0,19	0,01
50	0,50	0,38	0,25	0,13	0,01
75	0,25	0,19	0,13	0,06	0,01
99	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Третья составляющая формулы (1) оценки подвижности λ_p начинает влиять на показатель П в случае возникновения критической ситуации — потеря подвижности, повреждение техники. Расчет оценки режима движения теоретически можно выполнить по формуле полной вероятности (3) с полным описанием всех возможных случаев потери подвижности.

Расчет оценки режима движения можно сделать по формуле полезности аналогично формуле (2) с учетом того, что в наибольшей степени повлияет на выбор режима движения и сможет повысить параметр подвижности. При расчете оценки режима движения рассматриваются две составляющие: устройства повышения проходимости и рациональность водителя (выбор передачи, скорости, маршрута в зависимости от визуальной оценки препятствия — коэффициента адекватности оценки обстановки).

Формула принимает вид:

$$\lambda_p = w_{\text{устр}} Q_{\text{устр}} + w_{\text{в}} Q_{\text{в}};$$

$$w_{\text{устр}} + w_{\text{в}} = 1,$$

где $w_{\text{устр}}$ — весовой коэффициент влияния установленных на транспортное средство дополнительных устройств повышения проходимости;

$Q_{\text{устр}}$ — оценка влияния установленных на транспортное средство дополнительных устройств повышения проходимости;

$w_{\text{в}}$ — весовой коэффициент влияния выбора водителя;

$Q_{\text{в}}$ — оценка влияния выбора водителя.

Соотношение величин $w_{\text{устр}}$ и $w_{\text{в}}$ находится методом экспертных оценок.

Т а б л и ц а 2

Вероятность верно отреагировать на препятствие, $P_{\text{реакт}}$ [27]Probability of reacting correctly to the obstacle, $P_{\text{реакт}}$ [27]

Возраст, лет	Стаж, опытность, % от возраста			
	1	20	40	60
20	0,40	0,60	0,79	0,99
35	0,33	0,55	0,73	0,92
50	0,27	0,46	0,65	0,84
60 и более	0,20	0,39	0,58	0,77

Значение $Q_{\text{в}}$ зависит от психофизиологических параметров водителя, осуществляющего управление автомобилем. На стиль вождения и рациональность выбора пути будут влиять: возраст водителя, стаж вождения (в том числе и стаж вождения по труднопроходимой местности), состояние здоровья, соблюдение режима труда и отдыха, иные показатели, влияющие на физическое и психологическое здоровье. На возможность выбора пути и нужного режима движения влияет также видимость препятствий (табл. 1, 2).

В итоге вероятность рационально отреагировать на препятствие включает в себя вероятность увидеть препятствие и верно оценить обстановку

$$Q_{\text{в}} = P_{\text{увид}} P_{\text{реакт}}$$

где $P_{\text{увид}}$ — вероятность увидеть препятствие;
 $P_{\text{реакт}}$ — вероятность верно отреагировать на препятствие.

Выводы

Предложенный выше подход позволяет в кратчайшие сроки реализовать проверку работоспособности и отладку автоматизированных систем прокладки рациональных маршрутов следования в процессе лесозаготовительных работ. Дальнейшее развитие описанной выше концепции заключается в:

– масштабировании исследования на натуральных объектах для оценки работоспособности методик выбора кратчайшего маршрута при максимальной производительности;

– исследовании возможности применения методики расчета показателя подвижности на различных типах лесозаготовительных машин;

– оценке экологического воздействия лесозаготовительной машины на уплотнение грунта лесосеки.

Список литературы

- [1] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Дручинин Д.Ю. Определение динамических нагрузок в трансмиссии гусеничной лесозаготовительной машины при преодолении препятствий // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 1 (25). С. 185–196.
- [2] Беляков В.В., Беляев А.М., Бушуева М.Е., Вахидов У.Ш. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2013. № 3 (100). С. 145–175.
- [3] Автоматические и интеллектуальные системы транспортных средств. Автомобили и тракторы, многоцелевые колесные и гусеничные машины, наземные транспортно-технологические комплексы, мобильные роботы и планетоходы / под ред. В. Белякова, Л. Палковича. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2012. 475 с.
- [4] Hubacek M., Almasiova L., Brenova M., Bures M., Mertova E. Assessing quality of soil maps and possibilities of their use for computing vehicle mobility // 23rd Central European Conf. on Central Europe Area in View of Current Geography, Brno, 2016, pp. 99–110. <https://doi.org/10.5817/CZ.MUNI.P210-8314-2016>
- [5] McCullougha M., Jayakumar P., Dasch J., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development // J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [6] Bekker M. Theory of land locomotion. University of Michigan Press, 1960, 520 p.
- [7] Bradbury M., Dasch J., Gonzalez R., Hodges H., Jain A., Iagnemma K., Letherwood M.D., McCullough M., Priddy J., Wojtysiak B., Wong J.Y., Jayakumar P., Hoenlinger M. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) // Final Report by NATO Exploratory Team ET-148, 2016, 231 p.
- [8] Wong J., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J. Comparison of simulation models NRMM and NTPVM for assessing military tracked vehicle cross-country performance // J. of Terramechanics, 2018, v. 80, pp. 31–48.
- [9] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J.M., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development // J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [10] Rybansky M., Hofmann A., Hubáček M., Kovarik V., Talhofer V. The impact of terrain on cross-country mobility geographic factors and their characteristics // 18th Int. Conf. of the Int. Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014, Seoul, Korea, 2014, 6 p.
- [11] Костин И.М., Фасхиев Х.А. Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки. Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2001. 349 с.
- [12] Узлов В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 1 (103). С. 119–129.
- [13] Беляев А.М. Разработка методики расчета подвижности и эффективности шасси мобильных автономных комплексов для движения в береговой зоне: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, 2021. 164 с.
- [14] Зезюлин Д.В. Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, 2013. 218 с.
- [15] Вершинин А.В., Ерасов И.А., Левшунов Л.С., Янкович А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подпочной машины на энергоемкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования, 2014. № 6. С. 264.
- [16] Affleck R.T., Melloh R.A., Shoop S.A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain // J. of Terramechanics, 2009, v. 46, pp. 203–210.
- [17] Горелов В.А. Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 2012. 336 с.
- [18] Барахтанов Л.В., Ершов В.И., Куляшов А.П., Рукавишников С.В. Снегоходные машины. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. 191 с.
- [19] Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование, 2015. № 6. С. 267–287 DOI: 10.7463/0615.0780334
- [20] Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Университетская лавка, Логос, 2008. 392 с.
- [21] Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.
- [22] Папунин А.В. Методика расчета, выбора и оценка основных параметров движителя многоосной колесной машины при преодолении разрушаемых препятствий: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2019. 175 с.
- [23] Бухарин Н.А., Бронштейн Я.И., Буянов В.М., Веркевич О.И., Голяк В.К., Доброхотов Е.А., Чепурный В.Д. Проходимость автомобиля. М.: Воениздат, 1959. 310 с.
- [24] Трофимова Е.А., Кисляк Н.В., Гилев Д.В. Теория вероятностей и математическая статистика / под ред. Е.А. Трофимовой. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. 160 с.
- [25] Тюрин Ю.Н., Макаров А.А., Высоцкий И.Р., Яценко И.В. Теория вероятностей и статистика. М.: МЦНМО, АО «Московские учебники», 2004. 256 с.
- [26] Мишуринов В.М., Романов А.Н. Надежность водителя и безопасность движения. М.: Транспорт, 1990. 167 с.
- [27] Воронцова Ю., Ермолаев В.В. Психологические особенности внимания в неравновесных психических состояниях: типология профессиональных водителей // Человеческий капитал, 2021. № 9(153). С. 112–126.
- [28] Зимель Г.В. Теория автомобиля. М.: Воениздат, 1957. 455 с.
- [29] Мамити Г.И., Плиев С.Х. Проходимость колесной машины. Владикавказ: МАВР, 2013. 134 с.
- [30] Чудаков Е.А. Теория автомобиля. М.: МАШГИЗ, 1950. 344 с.
- [31] Платонов В.Ф., Леиашвили Г.Р. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины. М.: Машиностроение, 1986. 294 с.
- [32] Бочаров Н.Ф., Цитович И.С., Полунгян А.А., Семенов В.М., Цыбин В.С., Желлов Л.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости

- сти / под общ. ред. Н.Ф. Бочарова, И.С. Цитовича. М.: Машиностроение, 1983. 303 с.
- [33] Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Проконец В.С., Брюховецкий А.Н., Голубев М.И. Технико-экономическое обоснование элементов плана лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 3. С. 111–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-111-117
- [34] Платонов В.Ф. Полноприводные автомобили. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
- [35] Скородумов А.И. Учебник сержанта мотострелковых войск. М.: Воениздат, 2003. 308 с.
- [36] Математическая модель комплексной оценки подвижности машин высокой проходимости // SAE Prepr., s. a., № 740426, 24 p. URL: https://btvt.narod.ru/4/mat_proxod.htm (дата обращения 05.04.2024).

Сведения об авторах

Марковнина Алина Ивановна [✉] — ассистент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», a.markovnina@nntu.ru

Беляков Владимир Викторович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», belyakov@nntu.ru

Макаров Владимир Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», vladimir.makarov@nntu.ru

Вахидов Умар Шахидович — д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», vahidov@nntu.ru

Клюшкин Антон Алексеевич — магистр, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», aak-nntu@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024.

Одобрено после рецензирования 01.11.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

ESTIMATION OF INTERACTION BETWEEN VEHICLE AND ROAD BED IN CONCEPT OF MOVEMENT

A.I. Markovnina [✉], **V.V. Belyakov**, **V.S. Makarov**,
U.Sh. Vahidov, **A.A. Klyushkin**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin st., 603155, Nizhny Novgorod, Russia
makvl2010@gmail.com

The methodology of calculation of mobility parameter of transport-technological machines according to three components is considered, as technical characteristics of the machine, traffic conditions on the territory, traffic mode. The technical characteristics of the vehicle necessary for determination of the first component are presented, their comparison with conditions of movement on a specific territory is carried out. Technical evaluations of all-terrain vehicles are given. A theoretical conclusion is made about the type of all-terrain vehicle that can overcome a variety of obstacles in the selected area.

Keywords: mobility, cross-country ability, technical characteristics, transport-technological machine

Suggested citation: Markovnina A.I., Belyakov V.V., Makarov V.S., Vakhidov U.Sh., Klyushkin A.A. *Otsenka vzaimodeystviya transportnogo sredstva s polotnom puti v kontseptsii podvizhnosti* [Estimation of interaction between vehicle and road bed in concept of movement]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 162–171. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-162-171

References

- [1] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Druchinin D.Yu. *Opreделение dinamicheskikh nagruzok v transmssii gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny pri preodolenii prepyatstviy* [Determination of dynamic loads in the transmission of a tracked logging machine when overcoming obstacles]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering J.]*, 2017, v. 7, no. 1 (25), pp. 185–196.

- [2] Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E., Vakhidov U.Sh. *Kontsepsiya podvizhnosti nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [The concept of mobility of ground transport and technological machines]. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2013, no. 3 (100), pp. 145–175.
- [3] *Avtomaticheskoe i intellektual'nye sistemy transportnykh sredstv. Avtomobili i traktory, mnogotselevyye kolesnyye i gusenichnyye mashiny, nazemnyye transportno-tekhnologicheskyye komplekсы, mobil'nyye roboty i planetokhody* [Automatic and intelligent systems of vehicles. Automobiles and tractors, multi-purpose wheeled and tracked vehicles, ground transport and technological complexes, mobile robots and rovers]. Eds. V. Belyakov, L. Palkovich. Nizhny Novgorod: R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2012, 475 p.
- [4] Hubacek M., Almasiova L., Brenova M., Bures M., Mertova E. Assessing quality of soil maps and possibilities of their use for computing vehicle mobility. 23rd Central European Conf. on Central Europe Area in View of Current Geography, Brno, 2016, pp. 99–110. <https://doi.org/10.5817/CZ.MUNI.P210-8314-2016>
- [5] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development. J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [6] Bekker M. Theory of land locomotion. University of Michigan Press, 1960, 520 p.
- [7] Bradbury M., Dasch J., Gonzalez R., Hodges H., Jain A., Iagnemma K., Letherwood M.D., McCullough M., Priddy J., Wojtyasiak B., Wong J.Y., Jayakumar P., Hoenlinger M. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM). Final Report by NATO Exploratory Team ET-148, 2016, 231 p.
- [8] Wong J., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J. Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance. J. of Terramechanics, 2018, v. 80, pp. 31–48.
- [9] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J.M., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development. J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [10] Rybansky M., Hofmann A., Hubáček M., Kovarik V., Talhofer V. The impact of terrain on cross-country mobility geographic factors and their characteristics. 18th Int. Conf. of the Int. Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014, Seoul, Korea, 2014, 6 p.
- [11] Kostin I.M., Faskhiev Kh.A. *Obespechenie konkurentosposobnosti gruzovykh avtomobiley na etape razrabotki* [Ensuring the competitiveness of trucks at the development stage]. Naberezhnye Chelny: KamPI, 2001, 349 p.
- [12] Uzlov V.A., Shishkov G.I., Shcherbakov V.V. *Osnovnyye fizicheskiye parametry snezhnogo pokrova* [Main physical parameters of snow cover]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Proceedings of R.E. Alekseev NSTU], 2014, no. 1 (103), pp. 119–129.
- [13] Belyaev A.M. *Razrabotka metodiki rascheta podvizhnosti i effektivnosti shassi mobil'nykh avtonomnykh kompleksov dlya dvizheniya v beregovoy zone* [Development of a methodology for calculating the mobility and efficiency of the chassis of mobile autonomous complexes for movement in the coastal zone]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, 2021, 164 p.
- [14] Zezyulin D.V. *Razrabotka metodiki vybora konstruktsionnykh parametrov dvizhiteley, obespechivayushchikh effektivnost' dvizheniya kolesnykh mashin po snegu* [Development of a methodology for selecting the design parameters of propellers that ensure the efficiency of movement of wheeled vehicles on snow]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, 2013, 218 p.
- [15] Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Yankovich A.V. *Vliyaniye neravnomernosti skorosti rezaniya merzlogo grunta podkopochnoy mashiny na energoemkost' ego razrusheniya* [The influence of uneven cutting speed of frozen soil by a digging machine on the energy intensity of its destruction]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6, p. 264.
- [16] Affleck R.T., Melloh R.A., Shoop S.A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain. J. of Terramechanics, 2009, v. 46, pp. 203–210.
- [17] Gorelov V.A. *Nauchnyye metody povysheniya bezopasnosti i energoeffektivnosti dvizheniya mnogoosnykh kolesnykh transportnykh kompleksov* [Scientific methods for improving the safety and energy efficiency of multi-axle wheeled transport systems]. Dis. Dr. Sci. (Tech.). 05.05.03. Moscow, 2012, 336 p.
- [18] Barakhtanov L.V., Ershov V.I., Kulyashov A.P., Rukavishnikov S.V. *Snegokhodnyye mashiny* [Snowmobiles]. Gorky: Volga-Vyatka Book Publishing House, 1986, 191 p.
- [19] Postnikov V.M., Spiridonov S.B. *Metody vybora vesovykh koeffitsientov lokal'nykh kriteriev* [Methods for selecting weighting coefficients of local criteria]. Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2015, no. 6, pp. 267–287. DOI: 10.7463/0615.0780334
- [20] Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy* [Theory and Methods of Decision Making]. Moscow: University Shop, Logos, 2008, 392 p.
- [21] Wong J. *Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv* [Theory of Land Vehicles]. Moscow: Mechanical Engineering, 1982, 284 p.
- [22] Papunin A.V. *Metodika rascheta, vybora i otsenka osnovnykh parametrov dvizhitelya mnogoosnoy kolesnoy mashiny pri preodolenii razrushaemykh prepyatstviy* [Methodology for Calculating, Selecting, and Evaluating the Main Parameters of a Multi-Axle Wheeled Vehicle Propeller When Overcoming Destructible Obstacles]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2019, 175 p.
- [23] Bukharin N.A., Bronshteyn Ya.I., Buyanov V.M., Verkevich O.I., Golyak V.K., Dobrokhotoy E.A., Chepurnyy V.D. *Prokhodimost' avtomobilya* [Vehicle Cross-Country Performance]. Moscow: Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1959, 310 p.
- [24] Trofimova E.A., Kislyak N.V., Gilev D.V. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Ed. E.A. Trofimova. Yekaterinburg: UrFU Publishing House, 2018, 160 p.
- [25] Tyurin Yu.N., Makarov A.A., Vysotskiy I.R., Yashchenko I.V. *Teoriya veroyatnostey i statistika* [Probability Theory and Statistics]. Moscow: MCNO, JSC «Moscow Textbooks», 2004, 256 p.

- [26] Mishurin V.M., Romanov A.N. *Nadezhnost' voditelya i bezopasnost' dvizheniya* [Driver Reliability and Traffic Safety]. Moscow: Transport, 1990, 167 p.
- [27] Vorontsova Yu., Ermolaev V.V. *Psikhologicheskie osobennosti vnimaniya v neravnovesnykh psikhicheskikh sostoyaniyakh: tipologiya professional'nykh voditeley* [Psychological Features of Attention in Nonequilibrium Mental States: Typology of Professional Drivers]. *Chelovecheskiy kapital* [Human Capital], 2021, no. 9(153), pp. 112–126.
- [28] Zimelev G.V. *Teoriya avtomobilya* [Theory of the Automobile]. Moscow: Voenizdat, 1957, 455 p.
- [29] Mamiti G.I., Pliev S.Kh. *Prokhozimost' kolesnoy mashiny* [Cross-country ability of a wheeled vehicle]. Vladikavkaz: MAVR, 2013, 134 p.
- [30] Chudakov E.A. *Teoriya avtomobilya* [Theory of the Automobile]. Moscow: Mashgiz, 1950, 344 p.
- [31] Platonov V.F., Leishvili G.R. *Gusenichnye i kolesnye transportno-tyagovye mashiny* [Tracked and Wheeled Transport and Traction Machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 294 p.
- [32] Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zheglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhozimosti* [Design and calculation of wheeled vehicles with high cross-country ability]. Eds. N.F. Bocharov, I.S. Tsitovich. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 303 p.
- [33] Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Prokopets V.S., Bryukhovetskiy A.N., Golubev M.I. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovaniye elementov plana lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Feasibility study of logging road elements plan]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 111–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-111-117
- [34] Platonov V.F. *Polnoprivodnye avtomobili* [All-wheel drive vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 279 p.
- [35] Skorodumov A.I. *Uchebnik serzhanta motostrelkovykh voysk* [Textbook of a sergeant of motorized rifle troops]. Moscow: Voenizdat, 2003, 308 p.
- [36] *Matematicheskaya model' kompleksnoy otsenki podvizhnosti mashin vysokoy prokhozimosti* [Mathematical model of a comprehensive assessment of the mobility of cross-country vehicles]. SAE Prepr., s. a., No. 740426, 24 p. Available at: https://btvt.narod.ru/4/mat_proxod.htm (accessed 05.04.2024).

Authors' information

Markovna Alina Ivanovna ✉ — Assistant, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, a.markovna@nntu.ru

Belyakov Vladimir Viktorovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, belyakov@nntu.ru

Makarov Vladimir Sergeevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, makvl2010@gmail.com

Vakhidov Umar Shakhidovich — Dr. Sci. (Tech.), Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, vahidov@nntu.ru

Klyushkin Anton Alekseevich — student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, aak-nntu@yandex.ru

Received 12.03.2024.

Approved after review 01.11.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest