

УДК 629.13 (075.8)

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3\(23\).46-52](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3(23).46-52)**М. Г. ГРУБЕЛЬ,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4820-6935>(Національна академія сухопутних військ
ім. гетьмана П. Сагайдачного, м. Львів)**Л. В. КРАЙНИК,**

доктор технічних наук, професор

<https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>**М. Ф. БОДНАР,**

кандидат технічних наук, асистент

<https://orcid.org/0000-0003-3377-8209>(Національний університет "Львівська
політехніка", м. Львів)

Оцінка тягово-швидкісних характеристик військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям методами імітаційного моделювання

Проведено аналіз відомих досліджень і методик комп'ютерного моделювання руху та оцінки прохідності повноприводних автомобілів в умовах бездоріжжя. Відомі теоретичні дослідження базуються на отриманих емпіричних характеристиках різних типів опорної поверхні за різних ступенях насиченості ґрунту вологою – модуля деформації. У країнах НАТО аналогічні дослідження та оцінка прохідності БАТ базуються на оцінці несних властивостей опорної поверхні на основі емпіричного визначення т. зв. конусного індексу VCI (Vehicle Cone Index). Враховуючи методичні відмінності в оцінці прохідності радянською і західною науковими школами, акцентовано увагу на необхідності оцінки даного аспекту за допомогою комп'ютерного моделювання. Опрацьовано алгоритм оцінки прохідності – моделювання руху у середовищі імітаційного моделювання динамічних систем Simulink програмного комплексу MATLAB.

Ключові слова: бездоріжжя, прохідність, повноприводний автомобіль, імітаційне моделювання

Проведен анализ известных исследований и методик компьютерного моделирования движения и оценки проходимости полноприводных автомобилей в условиях бездорожья. Известные теоретические исследования базируются на полученных эмпирических характеристиках разных типов опорной поверхности при разных степенях насыщенности грунта влажностью – модуля деформации. В странах НАТО аналогические исследования и оценка проходимости БАТ базируются на оценке несущих свойств опорной поверхности на основе эмпирического определения конусного индекса VCI (Vehicle Cone Index). Учитывая методические различия в оценке проходимости советской и западной научных школ, акцентировано внимание на необходимости оценки данного аспекта при помощи компьютерного моделирования. Проработано алгоритм оценки проходимости – моделирования движения в среде имитационного моделирования динамических систем Simulink программного комплекса MATLAB.

Ключевые слова: бездорожье, проходимость, полноприводный автомобиль, имитационное моделирование

ВСТУП

Кардинальні зміни характеру сучасних воєн з переходом від класичних збройних протистоянь до гібридного, що особливо яскраво проявилось у війнах в Іраку, Афганістані, а також під час активних бойових зіткнень на Сході нашої держави, зумовили відповідні тенденції та кардинальні зміни у типажах військової автомобільної техніки (ВАТ). Перш за все значно зросли вимоги щодо покращення тягово-швидкісних властивостей як повноприводних військових автомобілів транспортного (тилового) забезпечення, так і бойових броньованих машин (ББМ). За таких умов методологія формування типуажу повинна враховувати також його динаміку руху та формування прохідності за умов бездоріжжя.

Враховуючи основне призначення автомобіля, під прохідністю слід розуміти не тільки забезпечення його рухомості, але й здатність виконувати корисну роботу у визначених конкретних умовах експлуатації з найбільшою ефективністю. Це означає, що у заданих умовах автомобіль повинен виконувати свої функції у найкоротший час і з найменшими затратами. Отже, прохідність автомобіля є комплексним показником, що характеризує рухомість і економічність.

Для збільшення прохідності у важких дорожніх умовах до конструкції автомобіля висуваються конкретні вимоги, метою яких є зменшення опору рухові або збільшення тягово-зчіпних якостей. Поряд із цим покращення прохідності автомобіля погіршує його економічні показники при використанні дорогами з твердим покриттям. Однак автомобілі, які застосовуються у збройних силах (ЗС) для виконання різних завдань, особливо у районах розміщення підрозділів у бойових порядках військ, обов'язково повинні мати високу прохідність. Це пояснюється тим, що виконання ними завдань здійснюється в основному дорогами зі слабкою несною здатністю та бездоріжжям. Враховуючи методичні відмінності в оцінці прохідності радянською і західною науковими школами, потрібно акцентувати увагу на необхідності оцінки даного аспекту за допомогою комп'ютерного моделювання, оскільки такий підхід дає можливість більш повно і точно оцінити параметри руху у складних умовах. Очевидна актуальність оновлення парку БАТ для ЗС України у сучасних умовах обумовлює необхідність відповідних науково-дослідних робіт у цій сфері, яким в Україні з часів СРСР не надавалось відповідного пріоритету і розвитку.

Базова наукова школа у цій сфері, за винятком давніх поодиноких вітчизняних досліджень [1, 2], і досі з часів СРСР (СНД) сконцентрована у Росії. Також можливо констатувати суттєву активізацію у цій сфері за останні 10-15 років [3-7], обумовлену особливою актуальністю проблеми прохідності БАТ за умов руху бездоріжжям (театру "гібридних воєн" – мережецентричних військових конфліктів) та тенденцій переходу сучасних армій на нове покоління БАТ з покращеними тактико-технічними характеристиками.

Метою статті є формування алгоритму моделювання руху автомобіля за умов бездоріжжя з урахуванням сучасних досліджень, що практично стане основою для подальшого розвитку методології формування прохідності БАТ.

Моделювання – розрахунок параметрів руху повноприводних автомобілів опорними поверхнями, що

деформуються (бездоріжжя), суттєво відрізняються від класичного розрахунку параметрів руху автомобільними дорогами з твердим покриттям і обумовлює принаймні двомірну динамічну еквівалентну систему, у т.ч. з врахуванням не тільки деформації шин, але і деформації опорної поверхні (зрізу ґрунту і додатковий опір рухові, а також і вплив коливань) зміни вертикальних навантажень на шину під впливом коливань автомобіля під час руху макро- і мікронерівностями бездоріжжя. Слід зазначити, що у Росії (СНД) теоретичні дослідження і практичне проектування ВАТ базуються на отриманих емпіричних характеристиках різних типів опорної поверхні (суглинок, пісок, чорнозем і т.д.) при різних ступенях насиченості ґрунту вологою – модуля деформації (несучої здатності масиву ґрунту – опорної поверхні) [1-7]. У країнах НАТО аналогічні дослідження та оцінка прохідності ВАТ базуються на оцінці несучих властивостей опорної поверхні на основі емпіричного визначення т. зв. конусного індексу VCI, введенного інженерним корпусом армії США ще у період Другої світової війни [8-10]. Враховуючи нещодавню появу досліджень щодо взаємного переходу значень модуля деформації E та конусного індексу переходу VCI [11, 12] і наявність достатньої емпіричної бази щодо характеристик ґрунтів, в Україні власне з приведення до значень модуля [13] моделювання руху ВАТ опрацьовано на базі варіації значення E з відповідним приведенням на базі кореляційних залежностей до відповідних значень VCI, як стандартизованого показника в арміях НАТО [14, 15]. У розвиток спрощеної моделі [16] та вітчизняних досліджень [17] на базі відомих сучасних досліджень [18, 19] опрацьовано, враховуючи сучасний розвиток програмного комп'ютерного забезпечення під Simulink програмного забезпечення MATLAB динамічну еквівалентну модель автомобіля типу 4x4 (рис. 1).

Остання передбачає чотири основні складові підпрограми:

моделювання – розрахунок взаємодії шини та опорної поверхні з розрахунком деформації шини і деформації ґрунту – оцінки опору рухові “WHEEL”;

моделювання – розрахунок поздовжньо-вертикальних коливань автомобіля під впливом макро- і мікропрофілю опорної поверхні – визначенням відповідних коливань величини вертикальних навантажень у контакті шини з опорною поверхнею і відповідного впливу на зчеплення та пробуксовування шини “TERRA”;

моделювання – розрахунок режимів роботи силового приводу – від двомірного інтерполювання режиму

роботи двигуна, фіксації – вибору відповідної передачі у трансмісії до врахування впливу диференціалів у трансмісії на формування тягового зусилля у контакті шини з опорною поверхнею “ENGINE”;

моделювання – розрахунок тягово-швидкісних характеристик і витрати палива руху автомобіля у цілому з обмеженням потенційної максимальної швидкості із умов граничних віброприскорень “VEHICLE”.

При цьому у базовий алгоритм моделювання закладено:

розрахунок додаткового опору рухові і відповідно додаткових затрат енергії та деформації (зрізу ґрунту) опорної поверхні на підставі наявних емпіричних характеристик ґрунтів (піщаних поверхонь) в Україні [2,17] та відповідно використання модуля деформації ґрунту E , а не транспортного показника прохідності VCI (англ. – Vehicle cone index), прийнятого у західній науковій школі [11, 12];

переборення штучних перешкод рухові (канав, ескарпів, порогових перешкод) є окремим етапом розвитку базової моделі і тут не розглядаються;

алгоритм вибору режиму роботи двигуна і передачі у механічній коробці передач задається оператором, у т.ч. метод перебору можливих варіантів. У моделі не розглядаються варіанти з гідрооб'ємною чи гідромеханічною трансмісією, що є предметом окремих досліджень.

В основу розрахунку взаємодії шини з опорною поверхнею покладено наявність плоскої та криволінійної поверхонь контакту [4].

Деформація шини

$$q = \pi \times h \frac{(P_w + P_0)}{2B} \times \left[\frac{B}{H} + \frac{3H}{2B} \right] \times \left(1 - \frac{h}{B} \right), \quad (1)$$

де q – тиск у плоскій зоні контакту, h – деформація шини; P_w – внутрішній тиск у шині; P_0 – тиск у контакті при $P_w = 0$; B – ширина профілю шини; H – висота профілю шини.

Деформація ґрунту (з врахуванням швидкості руху і фільтраційної реакції ґрунту)

$$q_r = q_{cr} \times \frac{1}{1 + \frac{\varphi_0 V_a}{\varphi_0 L}}, \quad (2)$$

де L – довжина поверхні контакту, V_a – швидкість автомобіля, φ_0 – кут внутрішнього тертя у ґрунті, q_{cr} – статична деформація при $V_a = 0$ і співвідношення q та E .

Максимальна питома сила опору зрізу (зсуву) ґрунту

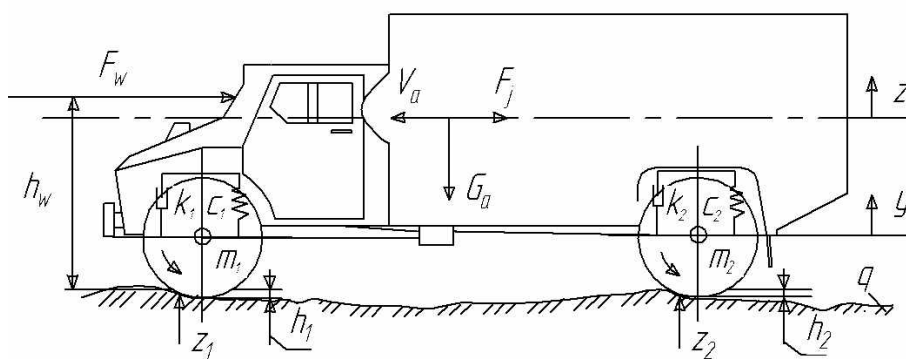


Рис. 1. Динамічна еквівалентна схема двовісних автомобілів при русі опорною поверхнею, що деформується

$$\tau_{max} = q_r \times \tan \varphi_0 + C_0, \tag{3}$$

де C_0 – внутрішнє зчеплення у ґрунті.
Узагальнені статистичні дані відповідних параметрів опорних поверхонь бездоріжжя, що характерні для України, представлено у табл. 1 на базі узагальнення даних [3, 4, 11, 12] і проведеного авторами перерахунку значень E у еквівалентні показники прохідності конусному індексу CI (англ. – Cone index).

Опускаючи отримані відповідно відомі [3, 4] залежності з формування колії і площі контакту шини з опорною поверхнею з врахуванням плоскої та кривої площин, однак без т. зв. бульдозерного чи ескаляційного ефектів при частковому пробуксовуванні колеса коефіцієнт опору коченню шини можна визначити, як

$$f_w = 1,75 P_1 \psi_1 h^2 \times (B^2 + 1,5 H^2) \left(\frac{B - 0,3 h}{P_z H B^2} \right), \tag{4}$$

де ψ_1 – коефіцієнт гістерезисних втрат у шині, P_1 – відношення тиску від жорсткості шини до сумарного тиску у контактї шини з опорною поверхнею; P_z – вертикальне навантаження на колесо.

Аналогічно визначаємо коефіцієнт опору ґрунту – опору утворення колії [4]

$$f_r = q_1 h_i 0,5 \xi \times \frac{B + B_k}{F_z}, \tag{5}$$

де ξ – коефіцієнт нерівномірності тиску у криволінійній площині контакту шини з опорною поверхнею, h_i – глибина колії, B_k – ширина колії, B – ширина протектора, F_z – площа плями контакту.

Втрати енергії (додатковий опір рухові) через пробуксовування колеса при перевищенні тягового зусилля сили зчеплення шини оцінюються на базі коефіцієнта буксування

Таблиця 1

Статистичні значення параметрів ґрунтових поверхонь, що за результатами аналізу характеризують деформацію та зчїпні властивості

№ з/п	Параметри, види і стани опорних поверхонь	E , МПа	H_z , см	φ_0 , град	C_0 , МПа	CI , МПа
1	2	3	4	5	6	7
1.	Зв'язні ґрунти					
	Глина:					
	тверда	>50,0	∞	18 – 22	0,05 – 0,1	>7,14
	м'яка пластична	10 - 50	∞	11 – 18	0,02 – 0,05	1,43-7,14
	текуча пластична	9,0 - 10,0	20 - 60	7 – 11	0,01 – 0,02	1,29-1,43
	текуча	0,5 - 3,0	5 - 25	3 – 7	0,003 – 0,01	0,07-0,43
	Суглинок:					
	твердий	>35,0	∞	21 – 25	0,03 – 0,06	>9
	м'який пластичний	8,0 - 35,0	∞	16 – 21	0,015 – 0,03	1 - 9
	текучий пластичний	3,0 - 8,0	20 - 70	12 – 16	0,008 – 0,015	0,4 - 1
	текучий	0,5 - 3,0	5 - 20	8 – 12	0,004 – 0,008	0,3 – 0,4
	Легкий суглинок:					
	твердий	>25,0	∞	24 – 28	0,02 – 0,05	>5,67
	м'який пластичний	7,0 – 25,0	∞	19 – 24	0,01 – 0,02	0,9 – 5,67
	текучий пластичний	2,0 – 7,0	20 - 80	16 – 19	0,005 – 0,01	0,4 – 0,9
	текучий	0,5 – 2,0	5 - 20	12 – 16	<0,005	0,3 – 0,4
2.	Незв'язні ґрунти					
	Пісок:					
	Для глибини колії 0,1 – 0,2 м.					
	неущільнений	2,0 – 5,0	-	30 – 38	<0,002	0,013 – 0,03
3.	ущільнений	10,0	-	36 – 43	0,002 – 0,008	0,74-1,2
	Заболочені ґрунти					
	Торф'яні:					
	неущільнені	0,2 - 0,5	-	$\tan \varphi_0$	0,01 – 0,02	0,18-0,44
	осушені, або ущільнені	0,5 - 1,0	-	0,1–0,2	>0,02	0,44-0,88
	Сапропелеві, намулові (ілісті) неущільнені	0,1 - 0,2	-	0,2–0,4	<0,01	0,09-0,18
4.	Снігові покриття					
	Сніг:					
	ρ , кг/м ³			$\tan \varphi_0$		
	свіжий	150–200	0,2 – 1,0	-	0,0001–0,001	0,01
	осівший	200–300	0,5 – 2,0	-	0,001 – 0,01	0,025-0,03
	фірн	240–350	2,0 – 4,0	-	0,008 – 0,015	0,04

$$S_{\sigma} = \frac{0,5}{\left\{ E_1 L \left[\frac{P_z}{(P_1 + P_z f_z) q} - \left(\frac{1}{q \tan\left(\frac{U_0}{57,3}\right) + C} \right) \right] \right\}}, \quad (6)$$

де $E_1 = (22,5 \frac{C}{10^6} + 0,1 \times 10^6)$

E_1 – модуль зсуву ґрунту, P_1 – поздовжня сила, що діє на колесо (тягова сила); L – довжина поверхні (плями) контакту, U_0 – передатне число головної передачі.

Враховуючи методичні відмінності в оцінці прохідності російською (радянською) [1-7] і західною [8-10] науковими школами щодо врахування зрізу ґрунту висутпами протектора шини, утворення т. зв. бульдозерної зони контакту на базі емпіричних залежностей, що фактично не враховують рисунок, а не тільки висоту виступів протектора шини та появу комп'ютеризованих методик розрахунку взаємодії шини з ґрунтом/піском на базі більш точного методу скінчених елементів (МСЕ) [18, 19], на даному етапі допускаємо можливість оцінки даного аспекту в окремій підпрограмі.

Природньо, що стосовно двовісного автомобіля 4x4 з умов збігу передньої і задньої осей умови взаємодії шин другої осі з опорною поверхнею є відмінними, і розрахунок сил у контакті шин передньої і задньої осей виконується роздільно з врахуванням ефекту попереднього ущільнення поверхні для коліс задньої осі згідно з відомими емпіричними залежностями [3, 4, 8, 9].

Реальне бездоріжжя не є рівною поверхнею, що деформується. Відповідно неминуче коливання підресорених мас під дією вертикальних навантажень реакцій z_1 і z_2 (рис. 1). Також очевидні відповідні зміни, як деформацій ґрунту і шини, так і глибини колії внаслідок відповідних коливань підресорених і непідресорених мас автомобіля та профілю поверхні як випадкової функції $g(t)$.

Для двовірної моделі (рис. 1) прийняті залежності взаємозв'язку переміщень з підресореної маси автомобіля та висоти нерівностей опорної поверхні [20].

$$\frac{z}{q} = \sqrt{\frac{(C_{\Pi} C_{\text{ш}} - K_a K_{\text{ш}} V_a^2) + (K_a C_{\text{ш}} + K_{\text{ш}} C_{\Pi})^2 V^2}{\Delta}}, \quad (7)$$

де

$$\Delta = [MmV^2 - (MC_{\Pi} + mC_{\Pi} + MC_{\text{ш}} + K_a K_{\text{ш}}) V_a^2 + C_{\Pi} C_{\text{ш}}]^2 + [V(K_a C_{\text{ш}} + K_{\text{ш}} C_{\Pi}) - (MK_a + MK_{\text{ш}} + mK_a) V_a^3]^2, \quad (8)$$

де M , m – відповідно підресорена і непідресорені маси автомобіля, C_{Π} , $C_{\text{ш}}$ – жорсткі підвіски і шини (радіальна) K_a , $K_{\text{ш}}$ – коефіцієнти демпфування підвіски, амортизатора та ресор за наявності та шин.

З врахуванням деформації опорної поверхні (ґрунту, піску) у (7), (8) враховуються приведені жорсткість і демпфуючі характеристики $C_{\Pi\Pi}$ і $K_{\Pi\Pi}$

$$C_{\Pi\Pi} = \frac{C_{\text{ш}} \times C_{\Gamma}}{C_{\text{ш}} + C_{\Gamma}}; K_{\Pi\Pi} = \frac{F_z h_k (1 - \rho) \xi_1 + F_z h_k \frac{\psi_1 P_1 \xi_2}{P + P_1}}{4V_a (h_{\text{ш}} + \rho h_k)^2}, \quad (9)$$

де F_z – вертикальне навантаження на колесо, h_k – висота (глибина) колії; ρ – частка пружної деформації ґрунту;

ξ_1 , ξ_2 – емпіричні коефіцієнти врахування кривизни характеристик деформування ґрунту і шин.

Відповідно динамічна складова вертикального навантаження на шину наближено визначається масою навантаження на вісь і прискоренням вертикального переміщення колеса, додатного чи від'ємного залежно від напрямку переміщення/ходу підвіски.

Завданням моделювання руху – оцінки прохідності автомобіля за умов бездоріжжя практично є визначення і максимально можливої швидкості руху, що задається відповідно підібраними режимами роботи двигуна та трансмісії (вибору відповідних передач і навантажувального і швидкісного режимів роботи двигуна – з умов обмеженої сили зчеплення шин з опорною поверхнею, а це далеко не завжди робота двигуна з максимальною паливоподачею). Окрім цього, на технічно можливу максимальну швидкість руху у конкретних умовах покладається обмеження з умов допустимого рівня віброколивних навантажень на водія і екіпаж, насамперед у вагомій для умов бездоріжжя низькочастотному спектрі коливань кузова автомобіля (сидіння водія) у зоні 1 – 32 Гц. Згідно з рекомендаціями [21] величини середньоквадратичних прискорень (на сидіння водія) з врахуванням коефіцієнтів значимості частот (табл. 2) не повинні перевищувати 0,25g, як межа стійкого збереження працездатності та гранично допустимими короткочасовими до 2 годин за добу перевантаженнями до 0,4g. Для одиночних ударних навантажень – не більше 3g. Двовірне моделювання дозволяє паралельно розрахунок руху автомобіля заданим профілем опорної поверхні $q(t)$ здійснювати і оцінку-розрахунок вертикальних віброприскорень на сидінні водія (з врахуванням пружно-демпфуючих характеристик $C_{\text{с}}$ та $K_{\text{с}}$ самого сидіння під дією навантаження еталонного водія масою 75 кг, прийнятого у нормативній базі галузі) – але у даному випадку з приведенням до еквівалентного центру мас $h_{\text{с}}$, що однак суттєво понижує реальний рівень віброприскорень на водія, розміщеного у передній частині автомобіля.

Таблиця 2

Значимість спектру частот коливань у формуванні вібронавантаження на водія, екіпаж

Частоти октав, Гц	1-2	2-4	4-8	8-16	16-32
Коефіцієнт вагомості а	0,60	0,85	1,0	0,71	0,35

де середньо квадратичне прискорення на тіло водія

$$\left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n z_i^2 a_i^2}. \quad (10)$$

Суттєво складнішим з умов комп'ютерного моделювання руху є вибір навантажувальних і швидкісних режимів роботи силового приводу, що забезпечує максимальну (з умов зчеплення шин і вібронавантаження водія екіпажу) швидкість руху. Задання характеристики двигуна у вигляді двовірного масиву з наступним інтерполяванням робочого режиму [16] дозволяє визначити відповідні тягові і паливно-швидкісні параметри роботи двигуна (при заданій передачі в трансмісії). Однак

визначення відповідної передачі в трансмісії (включно і роздавальну коробку) на заданому етапі дослідження віднесено до компетенції оператора-дослідника (природно з можливого перебору декількох варіантів для проходження конкретної ділянки бездоріжжя з відомими характеристиками (табл. 1)).

ВИСНОВКИ

Опрацьований алгоритм моделювання руху за умов бездоріжжя практично є основою для подальшого розвитку методологічних засад формування прохідності колісної ВАТ щодо:

врахування неоднорідності характеристик опорної поверхні по правому і лівому бортах машини і відповідного формування 3D-моделі, включно з врахуванням роботи і характеристик міжколісних диференціалів;

можливості долання одиноких, у т. ч. штучних, значних перешкод – оцінка прохідності гранично можливих їхніх геометричних характеристик (висоти вертикальної порогової перешкоди, ескарпу, глибини і ширини рову і т.д.);

можливості здійснення маневрування та оцінки критичних радіусів повороту, в т.ч. при русі косогороми та ухилами;

можливості долання водних перешкод (річок-розливів, струмків у весняно-осінній період та оцінки граничних характеристик різних типів дна водойм, що практично не вивчені).

Також, опрацьовані методологічні засади дозволяють оцінити прохідність зразка ВАТ, як на етапах проектування, розробки та виготовлення, так і під час експлуатації у конкретних чи типових умовах руху.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Безбородова Г. Б. Исследование проходимости автомобилей: дис. ... д-ра технических наук. Киев: КАДИ, 1969. 483 с.
2. Кошарный Н. Ф. Техничко-экономические свойства автомобилей высокой проходимости. Киев: Вища школа, 1981. 208 с.
3. Ларин В. В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра технических наук. М.: МГТУ, 2007. 432 с.
4. Вольская Н. С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ... д-ра технических наук. М.: МГТУ, 2008. 432 с.
5. Горелов В. А., Котиев Г. О. Моделирование прямолинейного движения полноприводной колесной машины по связным грунтам. Сб. тр. НАМИ, 2009, №2 (41). С. 25-39.
6. Усиков В. Ю. Разработка математической модели движения автомобиля многоцелевого назначения по деформированному грунту с учетом вариации воздействия на колеса внешних факторов. Омский научный вестн., Омск, 2015, №3 (143). С. 197-202.
7. Вольская Н. С., Левенков Я. Ю., Чичекин И. В., Захаров Н. Ю. Новые методы расчета проходимости колесных машин на стадии проектирования. М.: Инженерный вестн., 2016, №12. С. 16-21.

8. Wong, Y. J. Theory of ground vehicle. Mc-GrawHill Booh Comp., London – NewYork, 1993. 423 p.
9. Wong, Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth – Hannemann, 2010, London. 482 p.
10. Taghavifar, Hamid, Mardani, Aref (2017). Off-road Vehicle Dynamics. Analysis, Modelling and Optimization. Режим доступа: <https://www.springer.com/br/book/9783319425191>.
11. Хитров Е. Г., Григорьев Г. В., Дмитриева И. Н., Ильюшенко Д. А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта. Системы. Методы. Технологии. СПб, 2014. №4(24). С. 127-131.
12. Хитров Е. Г., Хахина А. М., Лухминский В. А., Казаков Д. П. (2017). Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов. *Resources and technology* No. 14(4) pp. 1-16. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svyazi-konusnogo-indekasa-i-modulya-deformatsii-razlichnyh-tipov-gruntov>.
13. Ребров О. Ю. Аналіз відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини агроекономічним вимогам ймовірнісним методом з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України. Вісн. НТУ “ХПІ”, 2017. №14(1236). С. 58-64.
14. Larminie, J. C. (1988). Gelaendegaengigkkeit von Militaerfahrzeugen. Wehrrevue, No 4. S. 78-91.
15. Lutz, J. (2003). Mobility of Ground Vehicles: US military view a overview primer and reference source guide. Quest Systems Inc. 101 p.
16. Крайник Л. В., Грубель М. Г. Багатофакторна оцінка та нормування паливної економічності вантажних автомобілів: монографія, Львів: АСВ, 2010. 117 с.
17. Міщенко Я. С., Купріненко О. М. Експериментальні дослідження процесу взаємодії рушіїв броньованих машин з ґрунтовими поверхнями, що деформуються. Військово-технічний зб. Львів: НАСВ, 2016. № 14. С. 26 – 31.
18. Shoop, S., Kestler, K. and Haehned, R. (2006). Finite element modelling of tires on snow. *Science and Technology*. Vol. 34. No. 1. Pp. 2-37.
19. Вольская Н. С., Жилейкин М. М., Захаров А. Ю. Математическая модель прямолинейного движения эластичного колеса по неровному деформируемому опорному основанию. Изв. высших учебных заведений. М.: Машиностроение, 2017. № 10(691). С. 25-33.
20. Вольская Н. С. Оценка проходимости колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2007. 215 с.
21. Агейкин Я. С., Вольская Н. С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2003. 124 с.

REFERENCES

1. Bezborodova, H. B. (1969), “*Issledovanie prokhodimosti avtomobilei*” [Automobiles passability research]. Doctor’s thesis. K., 483 p. [in Russian].
2. Kosharnyj, N. F. (1981), “*Tekhniko-ekonomicheskie svoystva avtomobilej vysokoj prokhodimosti*” [Technical and economic properties of vehicles with high passability], Vyshcha shkola, K., 208 p.

3. Larin, V. V. (2007), “*Metody prognozirovaniya i povysheniya opornoj prokhodimosti mnogoosnykh kolesnykh mashin na mestnosti*” [Methods of reference passability forecasting and increasing for multi-axle wheeled vehicles on the ground]. Doctor’s thesis. M., 432 p. [in Russian].
4. Volskaya, N. S. (2008), “*Razrabotka metodov rascheta oporno-tyagovykh kharakteristik kolesnykh mashin po zadannym dorozhno-gruntovym usloviyam v rajonakh ekspluatatsii*” [Support-traction characteristics calculation methods development for wheeled vehicles based on given road and ground conditions in exploitation areas]. Doctor’s thesis. M., 432 p.
5. Gorelov, V. A. and Kotiev, G. O. (2009), “Modelirovanie pryamolineynogo dvizheniya polnoprivodnoj kolesnoj mashiny po svyaznym gruntam” [All-wheel drive wheeled vehicle rectilinear motion simulation over cohesive soils], *Proc. of NAMI*, No. 241, P. 25-39.
6. Usikov, V. Yu. (2002), “Razrabotka matematicheskoy modeli dvizheniya avtomobilya mnogotsелеvogo naznacheniya po deformirovannomu gruntu s uchetom variacii vozdejstviya na kolesa vneshnikh faktorov” [Movement of a multipurpose vehicle on a deformed soil mathematical model development, considering the external factors impact variations on the wheels], *Omsk Scientific Bull.*, No. 3 (143), pp. 197-202.
7. Volskaya, N. S., Levenkov, Ya. Yu., Chichekin, I. V. and Zakharov, N. Yu. (2016), “Novye metody rascheta prokhodimosti kolesnykh mashin na stadii proektirovaniya” [New methods of wheeled vehicles passability calculations at the design stage], *Eng. Bull.*, No. 12, P. 16-21.
8. Wong, Y. J. Theory of ground vehicle. Mc-GrawHill Booh Comp., London – New York, 1993. 423 p.
9. Wong, Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second ed. Butterworth – Hannemann, 2010, London. 482 p.
10. Taghavifar, Hamid, Mardani, Aref. (2017). Off-road Vehicle Dynamics. Analysis, Modelling and Optimization. Available at: <https://www.springer.com/br/book/9783319425191>.
11. Khitrov, E. G., Grigorev, G. V., Dmitrieva, I. N. and Ilyushenko, D. A. (2014), “Raschet konusnogo indeksa po velichine modulya deformacii lesnogo pochvogrunta” [Calculation of the cone index by the magnitude of the modulus of deformation of the forest soil], *Systems. Methods Technologies*, No. 4(24). Pp. 127-131.
12. Khitrov, E. G., Khakhina, A. M., Lukhminskij, V. A. and Kazakov, D. P. (2017), “Issledovanie svyazi konusnogo indeksa i modulya deformacii razlichnykh tipov gruntov” [The relationship of the conical index and various soil types deformation modulus research], *Resources and technology* No. 14(4). Pp. 1-16, available at: www.cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svyazi-konusnogo-indeksa-i-modulya-deformatsii-razlichnyh-tipov-gruntov (accessed 12 July 2017).
13. Rebrov, O. Iu. (2017), “Analiz vidpovidnosti maksimalnogo tysku na grunt traktornoj shyny ahroekonomichnym vymoham imovirnisnym metodom z urakhuvanniam hrunto-klimatichnykh umov Ukrainy” [Analysis of the conformity of maximum pressure on the soil of the tractors tire to the agro-economic requirements by the probabilistic considering the soil-climatic conditions of Ukraine], *Bull. of the NTU “KhPI”*, No. 14(1236). Pp. 58-64.
14. Larminie, J. C. (1988). Gelaendegaengigkcit von Militaerfahrzeugen. Wehrrevue, No 4. S. 78-91.
15. Lutz, J. (2003). Mobility of Ground Vehicles: US military view a overview primer and reference source guide. Quest Systems Inc. 101 p.
16. Krainyk, L. V. and Hrubel, M. H. (2010), “Bahatofaktorna otsinka ta normuvannia palyvnoi ekonomichnosti vantazhnykh avtomobiliv” [Multifactor assessment and normalization of lorries fuel efficiency], *ASB. Lviv*, 117 p.
17. Mishchenko, Ya. S. and Kuprinenko, O. M. (2016), “Eksperymentalni doslidzhennia protsesu vzaiemodii rushiiv broniuvanykh mashyn z gruntovymy poverhniamy, shcho deformuiutsia” [Experimental research of the mutual engagement of armored vehicles process on the deformed earthed surface], *Military-technical coll.*, No. 14. Pp. 26-31.
18. Shoop, S., Kestler, K. and Haehned, R. (2006). Finite element modelling of tires on snow. Science and Technology. Vol. 34. No. 1. Pp. 2-37.
19. Volskaya, N. S., Zhilejkin, M. M. and Zakharov, A. Yu. (2017), “Matematicheskaya model pryamolineynogo dvizheniya elastichnogo kolesa po nerovnomu deformiruemomu opornomu osnovaniyu” [Mathematical model of the rectilinear motion of an elastic wheel along an uneven deformable support base], *News of higher educational institutions*. No. 10(691). Pp. 25-33.
20. Volskaya, N. S. (2007), “Otsenka prokhodimosti kolesnoj mashiny pri dvizhenii po nerovnoj gruntovoj poverkhnosti” [Assessment of the wheeled vehicle patency when driving on an uneven ground surface], *MGIU, M.*, 215 p.
21. Agejkin, Ya. S. and Volskaya, N. S. (2003), “Dinamika kolesnoj mashiny pri dvizhenii po nerovnoj gruntovoj poverkhnosti” [Dynamics of a wheeled vehicle when driving on an uneven ground surface], *MGIU, M.*, 124 p.

Відомості про авторів:

Грубель Михайло Григорович

кандидат технічних наук, доцент,

докторант штатний науково-організаційного відділу Національної академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного,

м. Львів, Україна

orcid.org/0000-0002-4820-6935

e-mail: m.g.grybel@gmail.com

Крайник Любомир Васильович

доктор технічних наук, професор

професор кафедри “Автомобілебудування” Національного університету “Львівська політехніка”

м. Львів, Україна

orcid.org/0000-0002-0524-9126

e-mail: l.krainyk@gmail.com

Боднар Микола Федорович

кандидат технічних наук, асистент кафедри
“Автомобілебудування” Національного університету
“Львівська політехніка”
м. Львів, Україна
orcid.org/0000-0003-3377-8209
e-mail: bodnarmykola@gmail.com

Mykola Bodnar

Candidate of Sciences, Assistant Lecturer of Automotive
Engineering Department, Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
orcid.org/0000-0003-3377-8209
e-mail: bodnarmykola@gmail.com

Information about the authors:**Mykhailo Hrubel**

Candidate of Sciences, Associate professor, Doctorant, Hetman
Petro Sahaidachnyi National Army Academy
Lviv, Ukraine
orcid.org/0000-0002-4820-6935
e-mail: m.g.grybel@gmail.com

Lybomyr Krajnyk

Doctor of technical sciences, professor,
Professor of Automotive Engineering Department, Lviv
Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
orcid.org/0000-0002-0524-9126
e-mail: l.kraynyk@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 03.06.2019 р.

Рецензент О. З. Горбай, д-р техн. наук

(Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів)

Рецензент М. І. Васьківський, д-р техн. наук, професор

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України,
м. Київ)

<https://orcid.org/0000-0002-2430-8478>