Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 629.332 DOI: 10.30748/zhups.2019.61.14

М.Г. Грубель

Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, Львів

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ ШИНИ АВТОМОБІЛЯ З БЕЗДОРІЖЖЯМ

У статті розглянуто формування математичних моделей взаємодії пневматичної шини автомобіля, при прямолінійному русі, з характерними типами опорних поверхонь, що деформуються: зв'язними (глина, суглинок), сипучими (пісок, супісок) та снігом. Виконаний порівняльний аналіз відомих досліджень щодо формування прохідності колісної військової автомобільної техніки (ВАТ) та актуальних результатів дорожніх випробувань і адекватності застосованих математичних моделей на опорних поверхнях дозволяє констатувати принципову відмінність у формуванні останніх в наукових школах Росії, США та інших країнах блоку НАТО. Для наукової школи США та інших країн НАТО характерним є більш прогностичний підхід із акцентом на оперативну оцінку прохідності місцевості і потенційної швидкості руху, а у науковій школі Росії натомість більш детально опрацьована террамеханіка взаємодії пневматичної шини з різними типами опорних поверхонь і відповідними емпіричними залежностями, як від параметрів опорної поверхні так і зразка ВАТ. Практично метою аналітичної оцінки взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею, що деформується, є кількісна оцінка сумарного опору рухові, а відповідно і необхідного тягового зусилля – параметрів і характеристик силового приводу, з одного боку і сил зчеплення шини з поверхнею, як граничної межі реалізації можливості руху та потенційної швидкості у випадку більшого значення відносно коефіцієнта сумарного опору рухові у з іншого боку.

Ключові слова: *пневматична шина, автомобіль, бездоріжжя, опір рухові, сила зчеплення, моделювання-розрахунок.*

Вступ

Постановка проблеми. Рух автомобіля бездоріжжям, за винятком сухих ґрунтових доріг з ущільненою наїжденою поверхнею, як правило, супроводжується значними деформаціями як самої шини, так і опорної поверхні (ОП), що деформується. З аналізу відомих досліджень руху в умовах бездоріжжя [1–6] можна виділити характерні типи опорних поверхонь, що суттєво відрізняються фізико-механічними характеристиками і відповідною взаємодією з шиною:

– глинисті ґрунти (суглинок, болота, торфовища – т.зв. зв'язні опорні поверхні, опір рухові по яких зростає пропорційно вмісту вологи);

– піщані (супісок) – т.зв. сипуча ОП, опір рухові по яких зменшується при збільшенні вмісту вологи до певної межі та надалі з певним зростанням;

– засніжені поверхні – від свіжого "сухого" пухкого снігу до "мокрого" злежаного з льодяною скоринкою (фірном) та відповідно колосальною різницею на 5 порядків щодо опору деформації, руху колеса з незмінним вертикальним навантаженням та тягового обертального моменту.

Разом з тим аналітична оцінка прохідності військової автомобільної техніки (ВАТ), починаючи з етапу проектування машин, включаючи практичну сферу вибору маршрутів пересування в умовах бездоріжжя, обумовлює відповідне моделювання-розрахунок взаємодії коліс автомобіля з конкретним типом ОП і, як основи подальших дій і як щодо конструктивного синтезу та відповідного підбору параметрів і характеристик силового приводу та щодо формування маршрутів і прогнозування рівня мобільності (потенційних швидкостей руху) в реальній експлуатації.

Практично метою аналітичної оцінки взаємодії шини з ОП, що деформується, є кількісна оцінка сумарного опору рухові, а відповідно і необхідного тягового зусилля – параметрів і характеристик силового приводу, з одного боку, і сил зчеплення шини з поверхнею, як граничної межі реалізації можливості руху та потенційної швидкості у випадку більшого

© Грубель М.Г., 2019

значення коефіцієнту відносно коефіцієнта сумарного опору рухові, з іншого боку.

Слід зазначити, що впродовж останніх двох десятиліть у цій сфері, враховуючи умови сучасних гібридних збройних конфліктів, значно інтенсифікувались науково-прикладні дослідження. Так, з 2008 р. тільки у Росії захищено 4 докторські дисертації за тематикою прохідності ВАТ, що поряд з якісно новим рівнем розвитку комп'ютерної техніки дозволяє констатувати особливу актуальність і для України, тим паче за умов війни та необхідності кардинального оновлення технічно і морально застарілого, переважно фізично зношеного парку ВАТ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порівняльний аналіз відомих досліджень та актуальних результатів дорожніх випробувань і адекватності застосованих математичних моделей ОП дозволяє констатувати принципову відмінність у формуванні останніх на основі модуля деформації Е ґрунту (піску) у російській (радянській) науковій школі [1–3] та на основі конусного індексу CI (англ. – Cone index) у науковій школі США та інших країн НАТО [4–6]. Методика та апаратура визначення CI стандартизована [13], а з 2020 р. прийнята як ГОСТ Р у Росії [14]. Відповідний кореляційний зв'язок між значеннями конусного індексу CI та модуля деформації Е опрацьовано науковими школами у США та країнах НАТО [15] та віднедавна і в Росії [16].

Мета статті – опрацювання теоретичних основ розрахунку та оцінки взаємодії колеса ВАТ з бездоріжжям відповідно до сучасного рівня зарубіжних досліджень, як основи подальших дослідно-конструкторських і практичних робіт у формуванні перспективного типажу ВАТ ЗС України.

Виклад основного матеріалу

У класичній теорії руху автомобіля опір рухові і зчеплення шини з деформованою поверхнею окрім звичного для доріг з твердим покриттям опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині $f_ш$ додатково формується [1–6] (рис. 1):

– деформацією опорної поверхні та утворенням колії певної глибини $f_г$;

– опору зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т.зв. бульдозерний ефект) $f_б$;

– опору додаткової затрати енергії внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (т. зв. екскалаційний ефект) f_E;

– опору горизонтальному зміщенню верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (т.зв. тиск відпаду) $f_в$;

– для зв'язних опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини $f_п$.

Практично аналогічні чинники формують і силу зчеплення шини з опорною поверхнею.

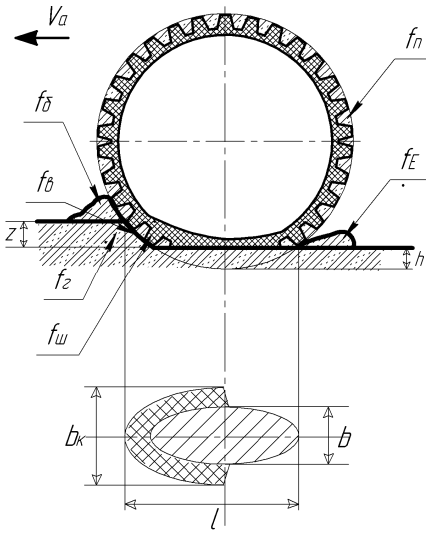

Рис.1. Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом

Донедавна практично всі розрахунки щодо оцінки взаємодії шини з деформованою ОП, у т.ч. і методами імітаційного моделювання, базувались виключно на емпіричних залежностях складових $f_б - f_П$ від заданих характеристик шини, опорної поверхні та навантажень на шину. Поява в інженерній практиці методу скінченних елементів (МСЕ) і його реалізація в комп'ютерному моделюванні деформації принаймі ґрунтових поверхонь під дією колеса автомобіля [7–8] дозволяють констатувати альтернативний і більш точний щодо відтворення фізико-механічних характеристик і плями контакту варіант, принаймі поки що стосовно ґрунтів як ОП. Разом з тим використання МСЕ через значно більшу розрахункову трудомісткість практично поки що використати у складі загальної моделі руху повнопривідної ВАТ бездоріжжям з використанням імітаційного моделювання руху наприклад у середовищі MATLAB Simulink достатньо проблемно [9]. А власне остання і є необхідним кінцевим елементом оцінки прохідності та ефективності конструкції ВАТ, де взаємодія шини з ОП відіграє важливу роль тільки однієї із ключових підпрограм розрахунку, поряд із підпрограмами динаміки силового приводу і автомобіля, водія у цілому.

Власне з умов оцінки режимів руху автомобіля в цілому, принаймі на даному етапі розвитку імітаційного моделювання в основу формування відповідної схеми Simulink взаємодії шини з ОП, обмежимось використанням емпіричних характеристик ОП і шини. Відомі методики і підходи однак обмежуються двома суттєвими допущеннями:

– рух колеса автомобіля є прямолінійним;

– бездоріжжя розглядається як однорідна і рівна ОП.

Щодо відтворення криволінійного руху, маневрування ВАТ на ОП слід констатувати, що вже достатньо адекватно опрацьовано математичний опис і моделювання взаємодії шини автомобіля під дією бічних сил і ефекту бічного відведення для умов твердих опорних поверхонь [10–12]. Однак відтворення динаміки взаємодії шини з ОП за умов бездоріжжя вимагає відповідного дослідження та уточнення емпірики механіки ОП в умовах повороту колеса, у т.ч. і з умов змін характеристик бічного відведення шини в умовах колії ОП, що деформуються.

Більш актуальним є врахування у процесі взаємодії шини з деформованою ОП реалії типових і характерних для бездоріжжя нерівностей (ям, вибоїн, горбків), загалом профіля місцевості у функції шляху. Рівне бездоріжжя у реаліях експлуатації ВАТ є в цьому плані рідкісним випадком і звичайно не відображає реалії руху.

Використання програмного середовища MATLAB Simulink дозволяє шляхом задання профілю нерівної опорної поверхні врахувати на базі відомих емпіричних залежностей деформацію плями контакту і корекцію радіальних і тангенціальних реакцій у зоні контакту при переїзді шиною нерівностей ОП [9]. Однак для конкретності моделювання – розрахунку, очевидно, окрім зміни висот ординат профілю ОП слід паралельно врахувати зміну принаймі вертикального навантаження, внаслідок роботи підвіски і коливань автомобіля на нерівній ОП та відповідних коливань сили зчеплення шини з ОП, що формуватиме і зміни інтенсивності пробуксовування шини. Ці обставини, на мій погляд, відтворюються окремою підпрограмою, що моделює динаміку підресорених і непідресорених мас автомобіля при русі по нерівній дорозі, однак з врахуванням уже взаємних деформацій ОП і шини та відповідних пружно-демпфуючих характеристик ОП, шини, підвіски. Очевидно, що та сама шина при взаємодії з нерівною ОП і статично однаковому вертикальному навантаженні матиме різні характеристики залежно від характеристик підвіски, динамічного перерозподілу навантажень на осі, швидкості руху і т.д.

Звично, що у основу імітаційної моделі взаємодії шини з дорогою закладається відповідні емпіричні моделі фізико-механічних характеристик як самої шини, так і ОП. Останні суттєво відрізняються для виділених вище з основних типів (ґрунти, піски, сніги). Очевидним є також паралельний розрахунок із випередженням кількісної оцінки зчеплення шини з ОП та наступною квантифікацією опору рухові взаємозв'язаного з інтенсивністю пробуксовування шини, на що, у свою чергу, окрім характеристик зчеплення шини з ОП впливатиме і величина підведеного до колеса обертального моменту, надлишок якого інтенсифікує пробуксовування, але неоднозначно не обов'язково збільшує швидкість поступального руху автомобіля. Вплив коливань автомобіля і робота підвіски на формування вертикальних навантажень і відповідно силу зчеплення шини з ОП теж очевидні. Тобто, підпрограма моделювання реакції автомобіля на нерівності ОП у цьому аспекті до відтворення динаміки взаємодії шини з ОП є допоміжною, але дозволяє на наступному кроці ітерації чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху автомобіля у поздовжньому напрямку і розрахунку динаміки коливань переміщень у вертикальному напрямку, як граничних обмежень допустимого дискомфорту екіпажу і максимально допустимої швидкості руху дозволяє дати більш реальну кількісну та якісну характеристику взаємодії шини з ОП, а відповідно, і динаміки руху автомобіля в цілому. Якщо кореляційний зв'язок між значеннями конусного індексу CI та модуля деформації E опрацьовано ще з 1970 років науковою школою США та інших країн НАТО та віднедавна і Російською науковою школою, то комп'ютерне моделювання – оцінка взаємодії шини автомобіля і ОП методологічно відрізняються.

Для першої школи характерним є більш прогностичний підхід із акцентом на оперативну оцінку прохідності місцевості і потенційної швидкості руху у другій школі натомість більш детально опрацьована террамеханіка взаємодії шини з різними типами ОП і відповідними емпіричними залежностями як від параметрів ОП, так і зразка ВАТ.

Попередня і послідовно деталізована оцінка взаємодії коліс ВАТ з ОП – оцінка прохідності в країнах НАТО у військових формуваннях стандартизована і базується на декількох етапах: оцінка прохідності ВАТ на базі оперативного визначення експериментального значення конусного індексу CI і базових параметрів ВАТ, діаметру Д і ширини колеса В, а у деяких випадках навантаження на колесо G_a, ще висоти самої шини Н та її радіальної деформації h_z та нескладного розрахунку т.зв. індексу (номера мобільності) ВАТ – MN, введеного згідно з методикою WES (англ. Waterway Engineering Station) інженерного корпусу армії США (англ. US Army Corps of Engineers), що є базою для подальшого вибору емпіричних моделей характеристик взаємодії шин ВАТ та конкретного типу ОП щодо кількісної оцінки характеристик і параметрів опору рухові і зчеплення шин з ОП необхідної для цього глибини колії, як оцінки прохідності загалом щодо конкретного типу ВАТ із розрахунком відповідного порогового значення конусного індексу VCI (англ. – Vehicle cone index) як результату отриманих значень

конусного індексу CI та MN [17,18].

Поряд з тим для обох наукових шкіл характерно наявність декількох різних емпіричних залежностей, що описують фізико-механічні властивості ОП і оцінку прохідності ВАТ, що, очевидно обумовлено і характерною різноманітністю типів і станів ОП. Хоча стосовно армії США чи Англії слід зазначити однозначність емпіричних залежностей оцінки прохідності ВАТ, процедури яких стандартизовані відповідно на базі VCI (США) чи MMP (англ. - Mean maximum pressure) (Англія). Наведені нещодавно порівняльні об'ємні дослідження [17–18] дозволяють на основі порівняльного аналізу стосовно основних типів ОП, характерних для України, виділити як пріоритетні з врахуванням експериментальних досліджень на ґрунтах Угорщини, Чехії, Польщі та в Україні [21–26].

Щодо 6 різновидів однотипної емпіричної залежності з визначення індексу прохідності MN – залежність запропоновану D. Rowland [27], що використовується і у військових відомствах Англії та ФРН

$$MN_R = \frac{CI \times B^{0,85} \times D^{1,15}}{W}\sqrt{\frac{\delta}{B}}, \qquad (1)$$

де CI – значення конусного індексу, МПа; W – вага автомобіля, т; D, B – діаметр і ширина шин, м; δ – деформація шини під номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні.

Або більш простішу залежність D, Freitag з корекцією, введеною у практику інженерним корпусом армії США [28,29]

$$MN_F = \frac{CI \times B \times D}{W}\sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \times \left(\frac{1}{1+\frac{B}{2D}}\right). \qquad (2)$$

Відповідно теоретична оцінка глибини колії на ОП визначається [30]:

$$z = \left(0,003 + \frac{0,287}{MN_F}\right) \times D, \qquad (3)$$

або

$$z = \left(-0,001 + \frac{0,248}{MN_R}\right) \times D. \qquad (4)$$

Остання є визначальною для комплексного розрахунку відповідно до коефіцієнтів зчеплення μ та сумарного опору рухові шини без врахування мікропрофілю місцевості, відповідно при використанні MN_R [30]:

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_F - 2,45} + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \qquad (5)$$

$$f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \qquad (6)$$

або за нещодавньою альтернативною пропозицією Maclaurin [32]:

$$\mu = 0,817 - \frac{3,2}{MN_F + 1,91} + \frac{0,453}{MN_F}; \quad f = 0,017 + \frac{0,453}{MN_F}, \qquad (7)$$

або при використанні MN_R:

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_R - 0,95} + \frac{0,2}{MN_R - 1,35}; \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_R - 1,35}. \qquad (8)$$

Як свідчить аналіз відомих досліджень [20; 22] власне залежності (5–8) забезпечують кращу збіжність результатів розрахунку та дорожніх випробувань насамперед на ґрунтових ОП.

В основу Російської методології, у т.ч. вітчизняної наукової школи террамеханіки колісної ВАТ, починаючи з 1950-х років покладена оцінка фізико-механічних характеристик ОП на базі модуля деформації Е – фактично модуля Юнга стосовно деформованих тіл, що однак безпосередньо у формулах не фігурує.

Розрахунок опору рухові колеса автомобіля на деформованих ОП базується не на узагальненій сумарній оцінці-розрахунку результуючого коефіцієнта сили опору рухові f/F_f на відміну від західної школи, а на диференціації відповідних вищезазначених складових опору рухові $f_ш$, $f_г$, $f_в$, $f_п$, для розрахунку яких необхідна також додаткова кількісна оцінка, окрім модуля Е таких фізико-механічних характеристик ОП, як:

– кут внутрішнього тертя у ОП (ґрунті) ϕ_0;

– опір ОП (ґрунту) зсуву;

– внутрішнє зчеплення у ґрунті C_0, МПа.

Розрахунок основної складової опору рухові – деформації ОП $f_г$ та коефіцієнта зчеплення базується на базових емпіричних залежностях, опрацьованих Агейкіним Я.С. [2], що отримали подальший розвиток у недавніх наукових працях В.В. Ларіна [3] та Вольської Н.С. [9]:

$$\mu = K_H \times f_T + (1 - K_H) \times \left(tg\phi_0 + \frac{C_0}{q_д}\right); \quad f_Г = q_д \times z \times 0,3 \times \left(\frac{B + B_1}{W_z}\right), \qquad (9)$$

де $q_д$ – тиск статичний, у роботах [3–9] – динамічний у контакті шини з ОП; z – глибина колії; W_z – вертикальне навантаження на колесо; B_1 – ширина колії; K_H – коефіцієнт насиченості протектора; C_0 –

внутрішнє зчеплення у ґрунті (ОП); ϕ_0 – кут внутрішнього тертя у ґрунті (ОП); f_T – коефіцієнт тертя гуми шини до ОП.

Залежності (9) обумовлюють необхідність попереднього розрахунку щодо оцінки значень питомого тиску q у контакті шини з ОП та глибини z і ширини B_1 утвореної колії:

$$q = 0,5\times\delta_Г\times\frac{P_ш+P_K}{B_1}\times \times\left(\frac{B}{H}+\frac{3H}{B}\right)\times\left(1-\delta_Г/B\right); \quad (10)$$

$$q_д = \frac{q}{1+\dfrac{V_a}{2\times\phi_0\times n\times l}}; \quad (11)$$

$$q_д = \frac{E\times z}{0,5\times a\times(B+B_к)\times arctg\left(\dfrac{H_Г-z}{0,5\times a\times(B+B_к)}\right)}+ +\frac{2E\times Z\times arctg\left(\pi\dfrac{H_Г-z}{(B+B_к)}\right)}{\pi\times q_s}, \quad (12)$$

де q – статичний тиск у контакті шини з ОП; $P_ш$ – тиск повітря у шині; $P_к$ – тиск на ОП від жорсткості каркаса шини; $\delta_Г$ – деформація шини на ОП; $q_д$ – динамічний тиск у контакті шини з ОП; V_a – швидкість автомобіля; z – глибина колії; n – кількість осей; l – довжина поверхні контакту колеса з ОП; $f_Г$ – товщина м'якого шару ОП; q_s – несна здатність ґрунту; a – коефіцієнт зміни напружень в ОП за глибиною.

Взаємопов'язане з q і $q_д$ значення глибини колії z визначається спільним розв'язком рівнянь (10)-(12) та залежності [3]

$$z = \left(\frac{W_z}{C_Г\times F_Ш\times 10^6}\right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (13)$$

де $C_Г$ – коефіцієнт деформації ґрунту; $F_Ш$ – площа плями контакту шини з ОП; γ – показник щільності ґрунту.

У свою чергу площа плями контакту $F_Ш$ спрощеним прямокутним контуром з ширини колії B_K та довжини плями контакту l суміщеним розв'язуванням (10–13) з врахуванням перерозподілу відомого вертикального навантаження на колесо W_z та деформаційних характеристик шини і ОП:

$$W_z = 0,25\times\pi\times q\times \times\left[\begin{array}{l}(1-0,5\xi)\times B\times 2\sqrt{D\times\delta-\delta^2}+\\ +\xi\times B_K\sqrt{D(\delta+z)-(\delta+z)^2}\end{array}\right]. \quad (14)$$

Додаткові уточнювальні складові опору рухові від горизонтального зміщення ОП:

бульдозерний ефект для гальмування та ведених коліс

$$f_б = 0,5\times\gamma\times q\times z\times tg^2\left(45^\circ+\frac{\phi_0}{2}\right)+2\times \times C_0\times tg\left(45^\circ+\frac{\phi_0}{2}\right). \quad (15)$$

Ескалаційний ефект для ведучих коліс при пробуксовуванні

$$f_e = \frac{1,5\times 10^6}{(\mu+1)^{W_z}}\times \times\left[\frac{Z_П\times(L_П-в_П)}{(1-S_б)\times(0,5D-\delta)\times 2\arcsin\dfrac{L_П}{D}}\right]^{\mu-1}\times \times B_K\times C, \quad (16)$$

де $Z_П$, $L_П$, $в_П$ – висота, крок, ширина грунтозачепів протектора шини; С – безрозмірний емпіричний коефіцієнт ОП; $S_б$ – коефіцієнт пробуксовування колеса.

Ефект ескалації ґрунту супроводжується винесенням часток ОП із зони контакту і відповідним додатковим поглибленням колії ΔZ.

Прилипання частинок ґрунту або піску у впадинах протектора

$$f_П = 0,5q_П\times B\times L/W_z, \quad (17)$$

де $q_П$ – питома сила прилипання часток мокрої ОП до колеса.

Окремо слід виділити взаємодію шини зразка колісної ВАТ із засніженою ОП, механіко-деформаційні характеристики якої є значно слабшими у порівнянні до грунто-піщаних ОП, однак для ущільнення вологого стану при густині 0,50-0,60 г/см^3, свіжий 0,10-0,20 г/см^3 модуль Е досягає значень 0,0005-0,0001 МПа, характерних для суглинків і глини вологістю, близькою до межі текучості при зчепленні з ОП, що є на порядок кращим. Практично слід констатувати обмаль аналітичних досліджень наукової школи США та інших країн НАТО щодо механіки взаємодії колеса і засніженої ОП, де обмежились оцінкою прохідності ВАТ за методикою армії Англії ММР, співставимою з торфовищами [3–4].

У Російській науковій школі ці питання більш детально розглянуті школою проф. Барахтанова (м. Нижній Новгород) [34–35], що базуються на базових положеннях M. Bekker та Y.I. Wong [4–5]. Загалом снігові ОП відрізняються від усіх типів ОП і заслуговують окремого суттєвого дослідження.

Очевидно, що враховуючи деформацію і ущільнення ОП при проходженні наступних, другої і третьої осі глибина входу шин при звичній для ВАТ

однорідності глибина колії буде меншою, а відповідно змінюються – зростає величина опору деформації (несна здатність) ОП та зменшується опір рухові для коліс кожної з наступних осей.

Кількісна оцінка ефекту ущільнення ґрунтових і піщаних ОП внаслідок багаторазового проходження коліс є достатньо близькою в обидвох наукових школах. У роботах [32; 36] запропоновано узагальнену емпіричну модель оцінки збільшення глибини колії Z_n при n циклів проходження колеса

$$z_n = z_1 \times n^{\frac{1}{a}}, \qquad (18)$$

де a – коефіцієнт врахування циклів навантаження ОП, який для піщаних ОП згідно з [32] знаходиться у діапазоні $a = 2 \div 26$ залежно від кількості циклів n проходження колеса, для зв'язних ОП – $a = 2 \div 5$.

У роботах [32; 36] запропоновано емпіричні залежності розрахунку коефіцієнта циклічності, а в залежності від конусного індексу CI чи індексу прохідності MN

$$a = 1,5 \times MN_F^{0.7}; \; a = 0.011 \times CI^{0.9}. \qquad (19)$$

Для заліснених місцевостей України з торфовищами і болотами опрацьовано дещо відмінні залежності [38]

$$a = 0,3 \times MN_R; \;\; a = 2 \times MN_F^{0.33}. \qquad (20)$$

Загалом починаючи від практично перших робіт у цій сфері [39] слід констатувати близькість результатів оцінки ущільнення ОП і зміни z при багаторазовому проходженням колесом колії обидвох наукових шкіл.

Однак практичною перевагою першої є безпосередня прив'язка до базового параметра CI механіко-деформаційних характеристик ОП. У практиці НАТО, як інженерного корпусу армії США [40], так і центру у сфері озброєння армії Англії [41] стандартизовані табульовані значення поправочного коефіцієнта до конусного індексу CI [40], або показника т.зв. ефективного тиску на ОП – MMP [38–41] щодо кількості зміни ущільнення ОП залежно від кількості проходів коліс по ОП.

Очевидно, що при формуванні національної нормативної бази у сфері прохідності та відповідних наукових досліджень і дослідно-конструкторських робіт по ВАТ доцільно орієнтуватись власне на ці дані з додатковими уточненнями щодо специфіки вітчизняних чорноземів і заболочених місцевостей.

Висновки

За умов нагальної потреби кардинального оновлення парку морально і технічно застарілої ВАТ ЗС України очевидна актуальність робіт у сфері розробки і експлуатації ВАТ з урахуванням суттєвого процесу, досягнутого за останні 15–20 років у обидвох наукових школах.

Актуальним в умовах необхідного становлення вітчизняної наукової школи у сфері прохідності ВАТ є порівняльна кількісна оцінка прохідності сучасних зразків ВАТ на базі нових методик оцінки взаємодії колеса з опорними поверхнями, що деформуються, типовими для України, та опрацювання відповідної сучасної нормативної бази, гармонізованої з вимогами НАТО як з умов розроблення нового вітчизняного покоління ВАТ, так і з умов потенційного експорту продукції ВПК у треті країни.

Першочерговим у цьому плані є опрацювання національного стандарту щодо методики і процедури оцінки фізико-механічних характеристик ОП за принципом конусного індексу CI, гармонізованого з відповідним стандартом ISO [13], та формування бази відповідних даних по конусному індексу CI, щодо характерних зон чорнозему та торф'яно-болотистих і засніжених ОП України, характеристики яких в існуючих дослідженнях західної школи є обмеженими.

Опрацювання бази емпіричних даних щодо ОП та адекватної методики імітаційного моделювання опорно-зчіпних характеристик взаємодії коліс автомобіля з ОП дозволить не тільки якісно сформувати перспективний типаж і структуру парку ВАТ, а також опрацювати відповідну комп'ютеризовану програму розрахунку оцінки прохідності конкретної місцевості на основі оперативного заміру конусного індексу CI що особливо актуально у сучасній практиці бойових дій. Такий підхід також є актуальним щодо можливості відповідної прогностичної оцінки максимальної швидкості переміщення ВАТ при конкретних характеристиках ОП. Остання і визначається умовою наближеного до максимального (83-87%) використання сили зчеплення коліс з ОП відповідними тяговими зусиллями та формуванням необхідних конструктивних параметрів силового приводу – тягових характеристик двигуна, передатними числами головних передач та нижнього діапазону розподільної коробки передач.

Список літератури

1. Кошарний М.Ф. Основи механіки та енергетики автомобіля / М.Ф. Кошарний. – К.: Вища школа, 1992. – 200 с.

2. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.

3. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин / В.В. Ларин. – М.: МГТУ им. Баумана, 2010. – 391 с.

4. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина. Пер. с англ. / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение,

1979. – 520 с.

5. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.

6. Wong Y.J. Theory of ground vehicle / Y.J. Wong. – London, NewYork: Mc-GrawHill Booh Comp, 1993. – 423 p.

7. Shoop S. Finite elemente modelling of tires on snow / S. Shoop, K. Kestler, R. Haehned // The Science and Technology. – 2006. – № 1(34). – P. 2-37.

8. Одинцов О.А. Разработка метода решения нелинейных контактных задач стационарного качения автомобильной шины: дис. ... канд. техн. наук / Одинцов О.А. – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 208 с.

9. Вольская Н.С. Математическая модель прямолинейного движения эластичного колеса по неровному деформируемому опорному основанию / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия высших учебных заведений. – 2017. – № 10(691). – С. 25-33.

10. Mitschke M. Dynamik der Kraftfahrzeuge / M. Mitschke, H. Wallentowitz. – Berlin-Heidelberg: Springer Velrad, 2004. – 914 p.

11. Kiencke U. Automotive Control Systems – For Engine Driveline and Vehicle / U. Kiencke, U. Nielsen. – Berlin-Heidelberg: Spriger Velrag, 2005. – 512 p.

12. Шадрин С.С. Математическое моделирование процесса взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью [Електронний ресурс] / С.С. Шадрин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. Электронный научный журнал. – 2014. – № 2(2). – С. 1-13. Режим доступу: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/89/pdf_35#.

13. ISO 22476-1:2012 Geotechnical investigation and testing. Field testing. Electrical cone and piezocone test. – 2017. – 28 p.

14. ГОСТ Р ИСО 22476-1-2017. Геотехнические исследования и испытания. Испытания полевые. Часть 1. Статическое и пьезостатическое зондирование электрическим зондом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://docs.cntd.ru/document/1200157638.

15. Chang B.S. Soil parameters to predict the performance of vehicles / B.S. Chang, W.J. Baker // – Journal of Terramechanics. – 1973. – № 2. – P. 13-31.

16. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта / Е.Г. Хитров, Г.В. Григорьев, И.Н. Дмитриева, Д.А. Ильюшенко // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4(24). – С. 127-131.

17. Wismer R.D. Off-road traction prediction for wheeled vehicles / R.D. Wismer, H.J. Lbnz // Journal of Terramechanics. – 1973. – № 2(10). – P. 49-61.

18. Freitag D.R. A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires on clay / D.R. Freitag // Journal of Terramechanics. – № 3(3). – 1966. – P. 51-68.

19. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications / R. He, C. Sandu, A.R. Khan, A.G. Gutherie, P.S. Els, H.A. Hammersma // Journal of Terramechanics. – 2019. – № 2(81). – P. 3-22.

20. Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: Дис. д.т.н. / Хахина А.М. – СПУ, Санкт-Петербург, 2017. – 332 с.

21. Marusiak M. Dynamic Soil Pressures Caused by Travelling Forest Machines [Електронний ресурс] / M. Marusiak, J. Neruda // Croatische journal of forest engeneering. – 2018. – № 39. – P. 223-245. Режим доступу: http://www.crojfe.com/site/assets/files/4242/marusiak.pdf.

22. Mathe L. Anallysis of the moution of vehicles running on to terrain / L. Mathe. – Geodoelloe: Szent ist van University, 2014. – 23 p.

23. Експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується / М.М. Балака, Л.Є. Пелевін, Г.О. Аржаєв, А.В. Василенко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1(8). – С. 132-139.

24. Ребров О.Ю. Аналіз відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини агроекологічним вимогам ймовірнісним методом з урахуванням грунто-кліматичних умов України / О.Ю. Ребров // Транспортне машинобудування. – № 14. – 2017. – С. 58-64.

25. Selection of the wheel and suspesion systems for vehicles operation in difficult wetland conditions / W. Plocharz, M. Lopatka, T. Muszynski, A. Dabrowska // Journal of research in agriculture Engineering. – 2016. – № 6(12). – P. 78-85.

26. Волонцевич Д.О. Підвищення прохідності колісних машин та вирівнювання ресурсу агрегатів трансмісії шляхом введення статичного дисбалансу розподілу ваги між мостами / Д.О. Волонцевич // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 23-34.

27. Rowland D. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles / D. Rowland, J.W. Peel // Institute of mechanical engineering. – 1975. – № 205. – P. 81-92.

28. Freitag D.R. A proposed strength classification test for fine-grained soils / D.R. Freitag // Journal of terramechanics. – 1987. – № 24(1). – P. 25-39.

29. Freitag D.R. A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires soft soil / D.R. Freitag // US Army Waterways Experimental Station. Report. – 1965. – № 3(688). – 72 p.

30. Turnage G.W. Using dimensloses prediction terms to descrabe off-road wheel vehicle performance / G.W. Turnage // ASAE Paper. – 1972. – № 72(634). – 21 p.

31. Maclaurin E.B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tires / E.B. Maclaurin // Proceding of the 10th ISTVS International Conference. – Kobe, 08.1990. – P. 177-186.

32. Abebe A. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic / A. Abebe, T. Tanaka, M. Yamazaki // Journal of Terramechanics. – 1992. – № 2(26). – P. 139-148.

33. Larminie J.C. Modifications to the mean maximum pressure system [Електронний ресурс] / J.C. Larminie // Journal of Terramechanics. – 1992. – № 2(29), P. 239-255. Режим доступу: https://bitly.su/UUAb4p.

34. Аникин А.А. К вопросу определения сопротивления движения машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барактанов,

И.О. Донато // Известия вузов. – 2006. – № 10. – С. 53-57.

35. Донато И.О. Проходимость колесных машин по снегу / И.О. Донато. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 231 с.

36. Saa Lahti M. Soil interaction model / M. Saa Lahti. – Helsinki: University of Helsinki, Department of Resourse Management, 2002. – 86 p.

37. Anttila T. Predicting the Rise of the Forest to the WES-Mendelmaeae / T. Anttila // University of Helsinki, Depart of forest resourse management Publications, 1998. – 53 p.

38. Rummukainen A. Manocurability of forwards and its prediction on peatlands / A. Rummukainen, J. Ala-Ilomaeki // Europian ISTVS conference off the road vehicles and agricalture earswork and foresty. – Warsaw. – 15-17 September 1986. – P. 75-81.

39. Reece A.R. Theory and of off the road locomotion / A.R. Reece // Procediryng of the institution of agricultural Engineers. – 1964. – № 2(20). – P. 16-19.

40. Scmid I.C. Interaction of vehicle and terrain results from 10 years reserch at IKK / I.C. Scmid // Journal of Terramechanics. – 1995. – № 1(32). – P. 3-26.

41. Lutz J. Mobility of ground vehicles. US military view a overview primer and reference source quide / J. Lutz. – Quant systems Inc. – 2003. – 101 p.

References

1. Kosharnyj, N.F. (1992), "*Osnovy mekhaniky ta enerhetyky avtomobilia*" [*Fundamentals of car mechanics and energy*], Vyshcha shkola, Kyiv, 200 p.

2. Ageykin, Ya.S. (1972), "*Vezdehodnyie kolesnyie i kombinirovannyie dvizhiteli*" [*Cross-country wheel and combined propulsion*], Mashinostroenie, Moscow, 184 p.

3. Larin, V.V. (2010), "*Teoriya dvizheniya polnoprivodnyih kolesnyih mashin*" [*Theory of motion of all-wheel drive wheeled vehicles*], Moscow, 391 p.

4. Bekker, M.G. (1979), "*Vvedenie v teoriyu sistem mestnost-mashina*" [*Introduction to the theory of terrain-machine systems*], Mashinostroenie, Moscow, 520 p.

5. Wong, Y. (1982), "*Teoriya nazemnyih transportnyih sredstv*" [*Theory of Land Vehicles*], Mashinostroenie, Moscow, 284 p.

6. Wong, Y.J. (1993), *Theory of ground vehicle*, Mc-GrawHill Booh Comp., London, NewYork, 423 p.

7. Shoop, S., Kestler, K. and Haehned, R. (2006), Finite elemente modelling of tires on snow, *The Science and Technology*, No. 1(34), pp. 2-37.

8. Odintsov, O.A. (2008), "*Razrabotka metoda resheniya nelineynyih kontaktnyih zadach statsionarnogo kacheniya avtomobilnoy shinyi: dissertation*" [*Development of a method for solving nonlinear contact problems of stationary rolling of a car tire: dissertation*], Moscow, 208 p.

9. Volskaya, N.S., Zhilejkin, M.M. and Zakharov, A.Yu. (2017), "Matematicheskaya model pryamolinejnogo 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.

10. Mitschke, M. and Wallentowitz, H. (2004), *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Springer Velrad, Berlin-Heidelberg, 914 p.

11. Kiencke, U. and Nielsen, U. (2005), *Automotive Control Systems – For Engine Driveline and Vehicle*, Spriger Velrag, Berlin-Heidelberg, 512 p.

12. Shadrin, S.S. (2014), "Matematicheskoe modelirovanie protsessa vzaimodeystviya pnevmaticheskoy shinyi s opornoy poverhnostyu" [Mathematical modeling of the process of interaction of a pneumatic tire with a supporting surface], *Automobile. Road. Infrastructure. Electronic Scientific Journal*, No. 2(2), pp. 1-13, available at: www.adi-madi.ru/madi/article/view/89/pdf_35# (accessed July 2019).

13. ISO 22476-1:2012 (2017), *Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone test*, 28 p.

14. State Standard of Russia (2017), "*22476-1-2017 Geotehnicheskie issledovaniya i ispyitaniya. Ispyitaniya polevyie. Chast 1. Staticheskoe i pezostaticheskoe zondirovanie elektricheskim zondom / data vvedeniya s 01.01.2020*" [*22476-1-2017 Geotechnical research and testing. Field Tests. Part 1. Static and piezostatic sounding by an electric probe / date of introduction from 01.01.2020*], Moscow, 32 p.

15. Chang, B.S. and Baker, W.J. (1973), Soil parameters to predict the performance of vehicles, *Journal of Terramechanics*, No. 2, pp.13-31.

16. Khitrov, E.G., Grigorev, G.V., Dmitrieva, I.N. and Ilyushenko, D.A. (2014), "Raschet konusnogo indeksa po velichine modulya deformaczii 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.

17. Wismer, R.D. and Lbnz, H.J. (1973), Off-road traction prediction for wheeled vehicles, *Journal of Terramechanics*, No. 2(10), pp. 49-61.

18. Freitag, D.R. (1966), A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires on clay, *Journal of Terramechanics*, No. 3(3), pp. 51-68.

19. He, R., Sandu, C., Khan, A.R., Gutherie, A.G., Els, P.S. and Hammersma, H.A. (2019), Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications, *Journal of Terramechanics*, No. 2, pp. 3-22.

20. Khakhyna, A.M. (2017), "*Metodyi prognozirovaniya i povyisheniya prohodimosti kolesnyih lesnyih mashin: dissertation*" [*Methods of forecasting and improving the patency of wheeled forest machines: dissertation*], St. Petersburg, 332 p.

21. Marusiak, M. and Neruda, J. (2018), Dynamic Soil Pressures Caused by Travelling Forest Machines, *Croatische Journal of Forest Engeneering*, No. 39, pp. 223-245, available at: www.crojfe.com/site/assets/files/4242/marusiak.pdf.

22. Mathe, L. (2014), *Anallysis of the moution of vehicles running on to terrain*. Szent ist van University, Geodoelloe, 23 p.

23. Balaka, M.M., Pelevin, L.Ye., Arzhaiev, H.O. and Vasylenko, A.V. (2013), "Eksperymentalni doslidzhennia roboty kolesa z pnevmatychnoiu shynoiu na opornii poverkhni, shcho deformuietsia" [Experimental studies of the operation of a tire with a pneumatic tire on a deformable support surface], *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, No. 1(18), pp. 132-139.

24. Rebrov, O.Yu. (2017), "Analiz vidpovidnosti maksymalnoho tysku na grunt traktornoi shyny ahroekolohichnym vymoham ymovirnisnym metodom z urakhuvanniam hrunto-klimatychnykh umov Ukrainy" [Analysis of compliance of maximum pressure on tractor tire soil with agro-ecological requirements by probabilistic method taking into account soil and climatic conditions of Ukraine], *Newsletter NTU KhPI* "*Transport Machine-Blowing*", No. 14, pp. 58-64.

25. Plocharz, W., Lopatka, M., Muszynski, T. and Dabrowska, A. (2016), Selection of the wheel and suspesion systems for vehicles operation in difficult wetland conditions, *Journal of Research in Agriculture Engineering*, No. 6(12), pp. 78-85.

26. Volontsevych, D.O. (2015), "Pidvyshchennia prokhidnosti kolisnykh mashyn ta vyrivniuvannia resursu ahrehativ transmisii shliakhom vvedennia statychnoho dysbalansu rozpodilu vahy mizh mostamy" [Increasing wheelbase and leveling the life of the transmission units by introducing a static weight imbalance between wheels], *Mekhanika ta Mashynobuduvannia*, No.1, pp. 23-34.

27. Rowland, D. and Peel, J.W. (1975), Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles, *Institute of Mechanical Engineering*, No. 205, pp. 81-92.

28. Freitag, D.R. (1987), A proposed strength classification test for fine-grained soils, *Journal of Terramechanics*, No. 24(1), pp. 25-39.

29. Freitag, D.R. (1965), A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires soft soil, *US Army Waterways Experimental Station. Report*, No. 3(688), 72 p.

30. Turnage, G.W. (1972), Using dimensloses prediction terms to describe off-road wheel vehicle performance, *ASAE Paper*, No. 72(634), 21 p.

31. Maclaurin, E.B. (1990), The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tires, *Proceding of the 10 ISTVS Conference*, Kobe, pp. 177-186.

32. Abebe, A., Tanaka, T. and Yamazaki, M. (1992), Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic, *Journal of Terramechanics*, No. 2, pp. 139-148.

33. Larminie, J.C. (1992), Modifications to the mean maximum pressure system, *Journal of Terramechanics*, No. 2(29), pp. 239-255, available at: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989290029J/.

34. Anikin, A.A., Baraktanov, L.V. and Donato, I.O. (2006), "K voprosu opredeleniya soprotivleniya dvizheniya mashin po snegu" [On the issue of determining the resistance to movement of cars in the snow], *University News*, No. 10, pp. 53-57.

35. Donato, I.O. (2006), "*Prohodimost kolesnyih mashin po snegu*" [*Wheel cars in the snow*], MGTU of E. Bauman, Moscow, 231 p.

36. Saa Lahti, M. (2002), *Soil interaction model*, University of Helsinki, Department of Resourse Management, 86 p.

37. Anttila, T. (1998), *Metsaemaan raiteistumisen ennustaminen WES – mendelmaeae ktaeyttaen*, University of Helsinki, Depart of forest resource management Publications, 53 p.

38. Rummukainen, A. and Ala-Ilomaeki, J. (1986), Manocurability of forwards and its prediction on peatlands, *Europian ISTVS Conference off the Road Vehicles and Agriculture Ears Work and Forestry*, Warsaw, pp. 75-81.

39. Reece, A.R. (1964), Theory and of off the road locomotion, *Proceeding of the institution of agricultural Engineers*, No. 2(20), pp. 16-19.

40. Scmid, I.C. (1995), Interaction of vehicle and terrain results from 10 years reserch at IKK, *Journal of Terramechanics*, No. 1(32), pp. 3-26.

41. Lutz, J. (2003), *Mobility of ground vehicles. US military view a overview primer and reference source quide*, Quant systems Inc., 101 p.

Надійшла до редколегії 14.06.2019
Схвалена до друку 13.08.2019

Відомості про автора:

Грубель Михайло Григорович
кандидат технічних наук доцент
докторант Національної академії
сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного,
Львів, Україна
https://orcid.org//0000-0002-4820-6935

Information about the author:

Mykhailo Hrubel
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Doctoral Student of Hetman Petro Sahaidachnyi
National Army Academy,
Lviv, Ukraine
https://orcid.org//0000-0002-4820-6935

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ АВТОМОБИЛЯ С БЕЗДОРОЖЬЕМ

М.Г. Грубель

В статье рассмотрено формирование математических моделей взаимодействия пневматической шины автомобиля, при прямолинейном движении, с характерными типами опорных поверхностей, что деформируются: связными (глина, суглинок), сыпкими. (песок, супесь) и снегом. Выполненный сравнительный анализ известных исследований по

формированию проходимости колесной ВАТ, актуальных результатов дорожных испытаний и адекватности примененных математических моделей на опорных поверхностях разрешает констатировать принципиальные различия в формировании последних в научных школах России, США и других стран блока НАТО. Для научной школы США и других стран блока НАТО характерным есть прогностический подход с акцентом на оперативную оценку проходимости местности и потенциальной скорости движения, а в научной школе России более детально отработана террамеханика взаимодействия пневматической шины з разними типами опорных поверхностей ы соответствующими эмпирическими зависимостями параметров опорной поверхности и образца ВАТ. Практически целью аналитической оценки взаимодействия шины с деформируемой опорной поверхностью есть количественная оценка суммарного сопротивления движению, и соответственно необходимого тягового усилия – параметров и характеристик силового привода с одной стороны, а также сил сцепления пневматической шины з поверхностью, как граничного предела реализации возможности движения и потенциальной скорости в случае большего значения относительно коэффициента суммарного сопротивления движению с другой стороны.

Ключевые слова: *пневматическая шина, автомобиль, бездорожье, сопротивление движению, сила сцепления, моделирование-расчет.*

THEORETICAL BASES OF GENERATING INTERACTION OF A VEHICLE PNEUMATIC TIRE WITH A BEARING SURFACE IN OFF-ROAD CONDITIONS

M. Hrubel

The article deals with generation of mathematical models of a vehicle pneumatic tire at straightforward motion on the specific types of deformable bearing surfaces: cohesive (clay, loam), running (sand, loamy sand) and snow. The comparative analysis of known studies as for formation of mobility and performance of wheeled military automotive equipment (MAE), the actual results of road tests and the adequacy of applied mathematical models on the bearing surfaces allows to establish a fundamental difference in the formation of the latter at scientific schools of Russia, the USA and other NATO countries. The US and other NATO countries scientific schools are characterized by a more predictive approach, with an emphasis on the operational evaluation of terrain trafficability and potential speed of movement, while the Russian scientific school. instead, elaborates in more details the thermomechanics of tire interaction with different types of bearing surfaces, and the corresponding empirical dependencies both on the parameters of the bearing surface and on the sample of MAE. However, the analytical evaluation of the terrain crossing capacity of MAE, starting from the stage of vehicle designing and including the practical sphere of choice of routes in off-road conditions, determines the appropriate analog computation and calculation of vehicle wheels interaction with a specific type of a bearing surface. This approach is the basis for further actions as for the constructive synthesis of MAE samples, the appropriate selection of parameters and characteristics of the power drive, the developing of routes and the prediction of the mobility level (potential speeds of movement) in the real operation. Practically, the purpose of the analytical evaluation of the interaction of a tire with a deformable bearing surface is a quantitative assessment of total driving resistance, and, accordingly, the required tractive effort - the parameters and characteristics of a power actuator, on the one hand, and the forces of tire adherence with a surface, as the border limit of realization of movement possibility and potential speed in case of a larger value of the coefficient relative to the coefficient of driving resistance on the other hand.

Keywords*: tire, vehicle, off-road, driving resistance, traction analog computation and calculation.*