

УДК 629.3.017.5



М. В. Склярів



О. І. Шаповалов

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПО ДЕФОРМОВАНІЙ ОПОРНІЙ ПОВЕРХНІ ПРИ ЗМІНІ ТИСКУ В ШИНАХ КОЛІС БАГАТОЦІЛЬОВОГО БРОНЬОВАНОГО АВТОМОБІЛЯ НА ПРИКЛАДІ КраЗ “УРАГАН”

Пропонується математичне моделювання руху багатоцільових броньованих автомобілів військового призначення. Розглядається можливість покращення умов їх руху та підвищення прохідності шляхом забезпечення оптимального перерозподілу тиску повітря в шинах коліс.

К л ю ч о в і с л о в а: рух транспорту, математичне моделювання, прохідність.

Постановка проблеми. Прохідність – це один з основних показників ефективності багатоцільових броньованих автомобілів (ББА). Вона визначається рухомістю, маневреністю, масово-габаритними і тягово-швидкісними властивостями, які формують рівень техніки в Національній гвардії України.

Для забезпечення необхідної прохідності ББА НГУ доцільно визначити вплив на неї різноманітних факторів.

Експлуатація автобронетанкової техніки достатньо різноманітна, її застосовують в різних дорожніх та кліматичних умовах [5]. В межах міст або на відкритій місцевості виконання службово-бойових завдань може бути пов'язано як з поодиноким рухом техніки, так і з рухом у колонах [1, 5, 6].

Зазначене обумовлює специфіку експлуатації ББА НГУ та відрізняє її від експлуатації автотранспортних засобів медичних служб, МЧС та ін. [3].

Для забезпечення прохідності ББА під час руху на марші в колонах з дотриманням необхідного швидкісного режиму [1, 5, 6] та руху по бездоріжжю важливу роль відіграє рівень тиску повітря в шинах коліс. Фізичні характеристики опорних поверхонь, по яких пересувається техніка НГУ, також дуже різні [7, 8, 11, 13, 15, 16, 17]. Тому для підвищення ефективності експлуатації, з метою покращення наявної динаміки руху та прохідності колісної техніки НГУ доцільно виконати математичне моделювання її руху з урахуванням впливу фізичних характеристик опорних поверхонь та зміни тиску в шинах коліс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами у працях [1 – 16] приділена значна увага вивченню різних факторів, що характеризують прохідність. Основні висновки з аналізу прохідності автомобільної техніки багатоцільового призначення в різних умовах руху зі змінами параметрів тиску повітря в шинах ведучих коліс наведено в статті [4].

У більшості праць, в яких досліджується експлуатація автомобільної техніки [2, 3, 7 – 17], основна увага зосереджена на експлуатаційних характеристиках без урахування складних умов експлуатації, які вкрай важливі для автомобільної техніки НГУ.

У статтях [1, 4, 5, 6] досліджено експлуатацію автомобільної техніки НГУ в різних умовах без урахування впливу опорних поверхонь та зміни величини тиску повітря в шинах коліс на її рух, а саме: на швидкісний режим при русі по шляхах загального призначення та на прохідність при русі або маневруванні по бездоріжжю.

У працях [7, 8, 9] розглянуто умови руху в гірській місцевості, а у працях [15, 16, 17] досліджено властивості ґрунтів та їх вплив на прохідність без дослідження впливу зміни тиску повітря в шинах.

У наведених джерелах не вдалося виявити математичних залежностей руху ББА за різних умов експлуатації та при зміні тиску повітря в шинах для збільшення їх прохідності.

Тому для підвищення ефективності експлуатації автомобільної техніки НГУ доцільно виконати математичне моделювання її руху в різних умовах з урахуванням властивостей опорних поверхонь при зміні тиску повітря в шинах.

Мета статті. Створити математичну модель руху багатоцільового броньованого автомобіля по деформованій опорній поверхні зі змінними коефіцієнтами зчеплення та опору коліс з урахуванням регулювання тиску повітря між осями для збільшення його прохідності.

Виклад основного матеріалу. В основу математичної моделі прямолінійного руху ББА по деформованій опорній поверхні (ДОП) і визначення характеристик цього руху (показників опорної прохідності) покладено моделювання руху автомобіля, запропоноване авторами у працях [9, 12, 13, 16].

Створюючи математичну модель руху ББА по ДОП, необхідно розробити розрахункову схему з такими допущеннями:

- розглядається рух ББА по нерівній опорній основі;
- умови руху лівого і правого бортів однакові;
- сліди коліс всіх мостів (осей) по бортах автомобіля повністю збігаються;
- характеристики ґрунтової поверхні по бортах автомобіля однакові;
- зв’язок коліс з кузовом автомобіля у вертикальній площині жорсткий (без урахування пружних властивостей підвіски);
- враховується поздовжня податливість напрямних елементів підвіски;
- крутний момент двигуна впливає безпосередньо на колесо;
- пружнодемпфуючі властивості елементів трансмісії не враховуються;
- деформація ґрунту задається не через його безпосередні фізичні характеристики, а як питомі втрати енергії при коченні колеса по рівній основі;
- реакція двигуна на зміну положення органу подачі пального без затримки;
- характеристика крутного моменту, що розвиває двигун, прийнята у вигляді похилої прямої, максимальне значення якої визначається частковою зміною положення органу подачі пального.

У даному випадку, за умови рівності навантажень під колесами лівого і правого бортів ББА, замість просторової можна скористатися більш простою плоскою розрахунковою схемою, поданою на рисунку 1.

На рисунку 1 прийняті основні позначення: G_a – вага ББА; M_k – маса колеса; V_{Xc} – швидкість центра мас ББА; ω_{ki} – кутова швидкість i -го колеса; K_i – поздовжня швидкість центра мас i -го колеса; α – кут нахилу опорної поверхні; β – кут нахилу ББА, пов’язаний з деформацією опорної поверхні; f_{wi} – коефіцієнт опору руху.

Відповідно до рис. 1 при прямолінійному русі без урахування косоугру (плоска схема) та поздовжнього нахилу на ББА діють зі сторони опорної поверхні зі зміщенням по осі OX нормальні (R_{zi}) та зі зміщенням по осі OZ поздовжні (R_{xi}) реакції у місці контакту коліс з ґрунтом, а з іншої сторони (без урахування нахилу корпусу ББА до опорної поверхні) – вага автомобіля G_a , що проходить через центр ваги нормально до опорної поверхні, та, діючи на висоті центра парусності та тягово-зчіпного пристрою відповідно, сили лобового опору повітря P_e і тяги на гаку P_{KP} . Крім цього, при контактуванні корпусу автомобіля або балок його мостів з ґрунтом виникають поздовжні сили бульдозерного опору ґрунту P_{mi} , які можна вважати прикладеними на рівні осей мостів (колес).

Тоді рівняння прямолінійного руху автомобіля матиме такий вигляд [9]:

$$m_a \cdot \dot{V}_{Xc} = 2 \sum_{i=1}^n P_{xi} - \{m_a g \cdot [f \cdot \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) + P_{KP} + P_e + \sum P_{mi}]\}. \quad (1)$$

Динаміка руху коліс описується [12, 13] рівняннями

$$J_{ki} \cdot \dot{\omega}_{ki} = M_{ki} - (I - S_{oi}) \cdot (f_{wi} + \varphi_i) \cdot R_{zi} \cdot r_{ko}, \quad (2)$$

$$m_{ki} \cdot \dot{V}_{Xki} = \varphi_i \cdot R_{zi} - P_{Zi} - m_{ki} \cdot g \cdot \sin(\alpha + \beta). \quad (3)$$

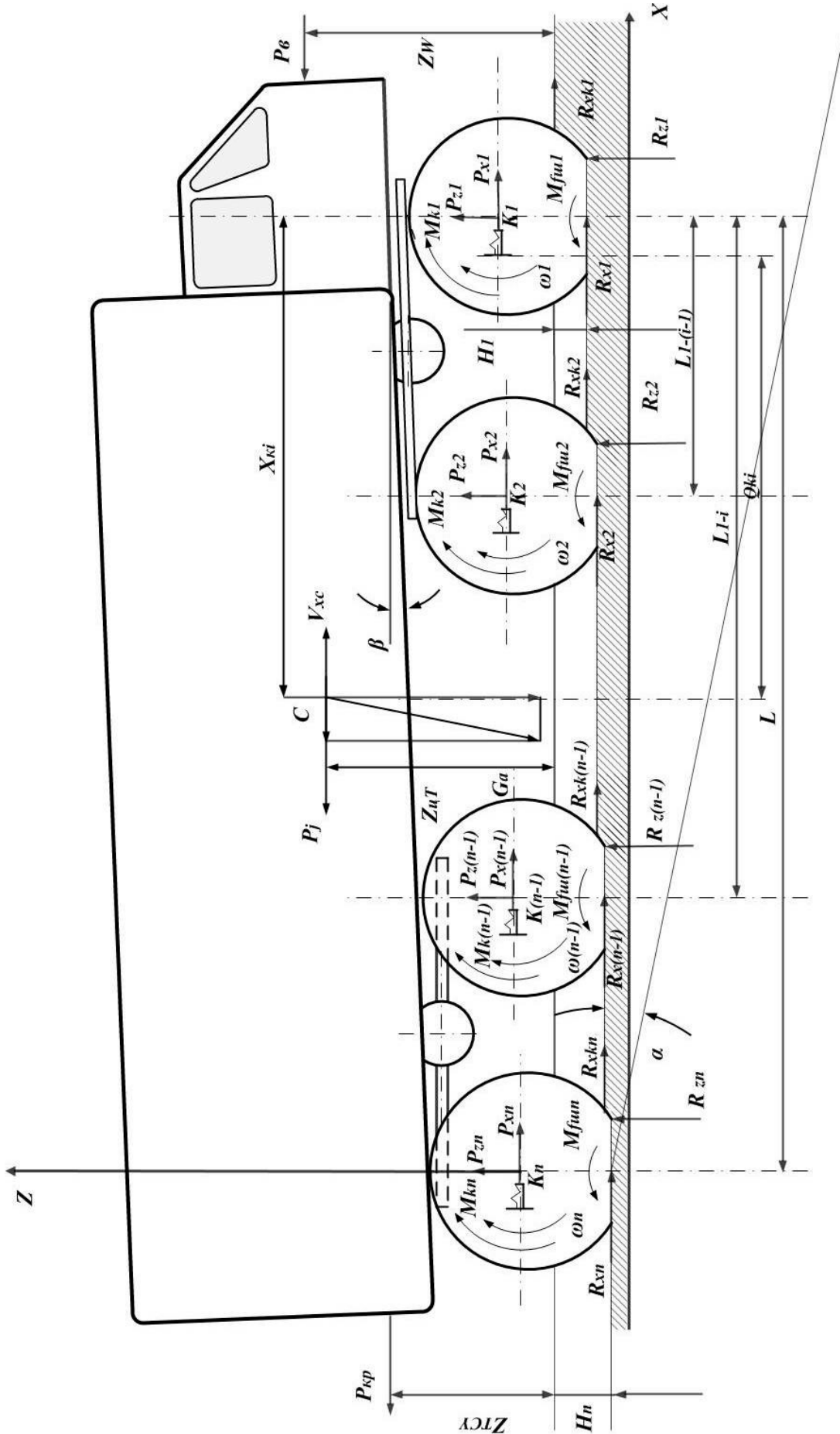


Рисунок 1 – Розрахункова схема прямолінійного руху БА по ґрунту, що деформується

Кут β визначається [16] за формулою

$$\beta = \arcsin \frac{H_n - H_1}{L}, \quad (4)$$

де H_n – глибина колії після проходження ББА (рис. 1);

H_1 – глибина колії після першого проходження ведучих коліс (рис. 1);

L – база ББА (рис. 1).

Приріст глибини колії визначається [17] за формулою

$$H_i = \left(\frac{2R_{zi}}{k_{HPwi} \cdot c_i \cdot B \sqrt{2r_k} \cdot \left(2 - \frac{13}{15} \mu + \frac{1}{5} \mu^2 \right)} \right)^{\frac{1}{\mu+0.5}}, \quad (5)$$

де μ – показник степеня, який характеризує закон зміни опору вдавненню ґрунту;

B – ширина профілю шини;

R_{zi} – вертикальна реакція i -го колеса ББА (рис. 1);

k_{HPwi} – коефіцієнт, який ураховує вплив тиску повітря на деформацію ґрунту [17];

c_i – коефіцієнт пропорційності (показник, що характеризує початковий опір ґрунту вдавненню штампа); для передніх коліс $c_1 = c_0$, для наступних $c_i = c_{i-1} \cdot H_{i-1}^\mu$;

H_i – коефіцієнт ущільнення ґрунту, чисельно дорівнює приросту глибини колії.

Сила, діюча на корпус ББА з боку колеса по осі X [9],

$$P_{Xi} = (X_{Ki} - Q_{Ki}) \cdot C_{підв} + (V_{XKi} - V_{XC}) \cdot B_{підв}, \quad (6)$$

де $C_{підв}$ – коефіцієнт жорсткості підвіски у поздовжньому напрямі;

$B_{підв}$ – коефіцієнт демпфування підвіски у поздовжньому напрямі;

X_{Ki} – відстань від центра мас до осі колеса по осі X (рис. 1);

Q_{Ki} – відстань від центра мас до точки кріплення підвіски по осі X (рис. 1);

V_{XC} – швидкість центра мас ББА (рис. 1).

Визначаючи характеристики взаємодії колісного рушія з опорною поверхнею, що деформується, коефіцієнт зчеплення колеса з опорною поверхнею, який визначає тягу в плямі контакту, визначається за залежністю, наведеній у статті [4], також у цій статті наведена функціональна залежність коефіцієнта опору руху і описаний характер його зміни.

Коефіцієнти опору коченню f_{w0i} у веденому режимі з номінальними навантаженням та тиском повітря в шині, а також значення коефіцієнтів корекції коефіцієнта опору кочення k були визначені за рекомендаціями джерел [4, 7, 8, 10, 11]. Графічні залежності деяких показників прохідності наведені в статті [4].

Вертикальна реакція в плямі контакту колеса с опорною поверхнею визначається за такою залежністю [9]:

$$R_{zi} = P_{zi} + m_{Ki} \cdot g \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (7)$$

Для чотиривісного ББА з переднім та заднім балансирними візками [15]:

$$R_{z1} - R_{z2} = 0, \quad (8)$$

$$R_{z3} - R_{z4} = 0, \quad (9)$$

$$2R_{z1} + 2R_{z2} - \frac{G_a \cdot \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0. \quad (10)$$

$$G_a \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot X_{Ki} - 2(M_{K1} + M_{K2} + M_{K3} + M_{K4}) + P_{KP} \cdot Z_{TCY} - 2 \cdot (R_{Z2} \cdot L_{1-2} + R_{Z3} \cdot L_{1-3} + R_{Z4} \cdot L) = 0. \quad (11)$$

Для ББА з колісною формулою 8×8 динаміка трансмісії з диференціальним зв'язком описується такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_e = \frac{2 \cdot \dot{\omega}_{1-2} + 2 \cdot \dot{\omega}_{3-4}}{4}, \\ J_e \cdot \dot{\omega}_e = M_e - M_D, \\ J_{1-2} \cdot \dot{\omega}_1 = \frac{2M_D}{4} - M_{K1-2}, \\ J_{3-4} \cdot \dot{\omega}_2 = \frac{2M_D}{4} - M_{K3-4}. \end{array} \right. \quad (12)$$

де J_{1-2} та J_{3-4} – моменти інерції коліс;

J_e – момент інерції двигуна;

$\dot{\omega}_e$ – кутове прискорення обертання вала двигуна;

M_e – момент, який розвиває двигун на вихідному валу коробки передач;

M_D – момент на корпусі диференціала;

$\dot{\omega}_1$ та $\dot{\omega}_2$ – кутові прискорення 1-го та 2-го коліс;

$\dot{\omega}_{1-2}$ – кутове прискорення на передньому візку;

$\dot{\omega}_{2-3}$ – кутове прискорення на задньому візку;

M_{K1-2} – момент опору на передньому візку;

M_{K3-4} – момент опору на задньому візку.

$$\dot{\omega}_{1-2} = \frac{\dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_2}{2}, \quad (13)$$

$$\frac{1}{2} M_{K1-2} = M_{K1} = M_{K2}. \quad (14)$$

$$\dot{\omega}_{3-4} = \frac{\dot{\omega}_3 - \dot{\omega}_4}{2}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} M_{K3-4} = M_{K3} = M_{K4}. \quad (16)$$

Для ББА з колісною формулою 8×8 динаміка трансмісії з блокуванням зв'язком описується такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_e \cdot \dot{\omega}_e = M_e - M_\delta, \\ M_\delta = M_{K1-2} + M_{K3-4}, \\ \dot{\omega}_e = \dot{\omega}_{1-2} = \dot{\omega}_{3-4}, \end{array} \right. \quad (17)$$

де M_δ – момент блокування диференціала.

$$\dot{\omega}_{1-2} = \dot{\omega}_1 = \dot{\omega}_2, \quad (18)$$

$$\dot{\omega}_{3-4} = \dot{\omega}_3 = \dot{\omega}_4, \quad (19)$$

$$M_{K1-2} = M_{K1} + M_{K2}. \quad (20)$$

$$M_{K3-4} = M_{K3} + M_{K4}. \quad (21)$$

Таким чином, враховуючи параметри колісного рушія ББА, координати центра ваги, положення тягово-зчіпного пристрою, центра парусності, тип, характеристики трансмісії та силової установки, характеристики ґрунту, функціональну залежність коефіцієнта опору руху від тиску повітря в шинах, вертикальне навантаження на колеса, розташування коліс на базі ББА, можливо розрахунковим шляхом визначити майже всі показники характеристик прямолінійного руху по ДОП багатівісного ББА та кожного з його коліс, які включають показники оцінки опорної прохідності з широкою варіацією його конструктивних та експлуатаційних параметрів.

Вирази (1) – (21) складають формульну схему розробленої математичної моделі дослідження руху ББА по ДОП, яка описується за відомих навантажувальних і розмірних параметрів, показників характеристик жорсткості, а також механічних параметрів ґрунту. Модель дозволила провести теоретичне дослідження параметрів цього кочення в функції навантаження, що припадає на колеса, встановленого тиску повітря в шинах і номера проходження (або кожного колеса, що котиться по сліду попереднього).

Одним з об’єктів дослідження прохідності ББА може бути КрАЗ “Ураган” (KRAZ Hurricane) – великогабаритний броньований автомобіль з колісною формулою 8×8, призначений для виконання різноманітних місій на полі бою [18].

Чисельне моделювання руху ББА на прикладі КрАЗ “Ураган” було здійснено з використанням програмного продукту Matlab у пакеті Simulink.

Початкові умови: $\dot{V}_x(t_0) = 0$; $\dot{V}_y(t_0) = 0$; $\dot{\omega}_1 = 0$; $V(t_0) = 7 \text{ м/с}$. Розрахункові змінні: ω_e , M_{Ki} , M_{K2-3} , M_e , M_σ , $\dot{\omega}_i$, $\dot{\omega}_{2-3}$, $\dot{\omega}_e$, c_i , V_{XC} , β , \dot{V}_{Xki} , ω_{ki} , $\dot{\omega}_{ki}$, φ_i , f_{wi} , f_{w0i} , R_{Zi} , S_σ , M_{fki} , H_n , H_1 , H_i .

Реалізація моделі наведена на рис. 2.

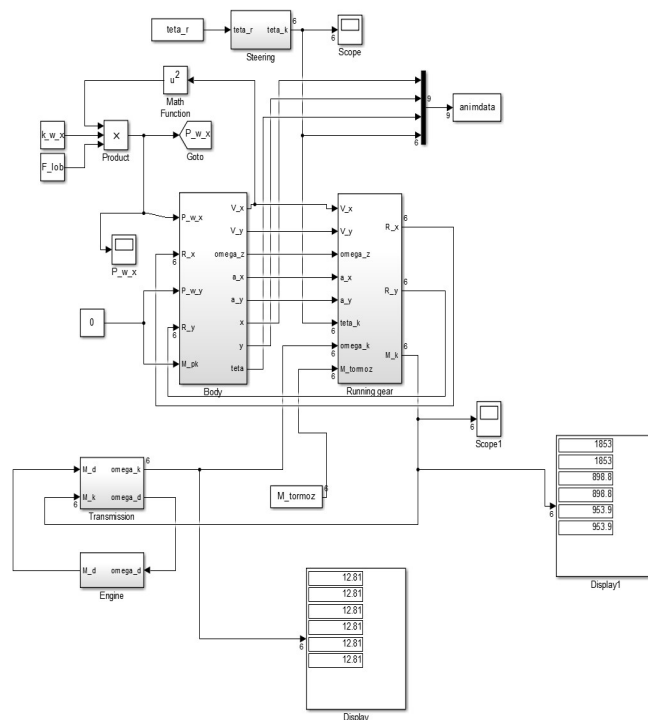


Рисунок 2 – Блок-схема математичної моделі

Проведеними дослідженнями встановлено, що характер руху ББА по ДОП визначається множиною-безліччю факторів (конструктивних та експлуатаційних) і типом ґрунту.

Наслідком руху ББА по ДОП є природна зміна характеристик опорної поверхні (ущільнення, руйнування ґрунту і т. ін.) при проходженні кожного наступного колеса ББА. При цьому колеса кожної наступної осі можуть рухатися по колії, прокладеній попереднім колесом, частково по цілинній опорній поверхні і по ще не деформованому ґрунту. Конструкція ББА найчастіше передбачає однакову ширину колії для коліс всіх осей, що обумовлює кочення кожного колеса по сліду попереднього.

Як зазначено у працях багатьох авторів [9, 13, 14, 16], при послідовному проходженні коліс відбувається приріст глибини колії, що викликає збільшення сил тертя залежно від типу ґрунту і його характеристик і збільшення витрат потужності на подолання цього опору. На ДОП з ґрунтовою основою, що ущільнюється, опір коченню передніх коліс більше, ніж наступних.

Використання системи регулювання тиску повітря в шинах ББА дозволяє зменшити глибину колії та опір коченню коліс. Разом з тим величина оптимального тиску повітря в шинах залежить від навантаження, що припадає на колеса, від розважки ББА і типу ДОП, по якій відбувається рух.

На основі реалізації розробленої математичної моделі (рис. 2) проведено розрахунок впливу тиску повітря в шинах P_w на опір коченню коліс f_{w0} при послідовних проходженнях і різноманітних вертикальних навантаженнях R_z .

У реалізації математичної моделі руху ББА по ДОП на прикладі КрАЗ “Ураган” були прийняті такі обмеження і допущення:

- тип ґрунтової поверхні – вологий річковий пісок;
- як вихідні значення показника c , що характеризує початковий опір ґрунту вдавлюванню, і степеневого показника μ використані експериментальні дані, отримані для вологого річкового піску ($c = 0,53$; $\mu = 0,34$);
- ґрунт однорідний, його фізико-механічні властивості не змінюються під впливом природно-кліматичних факторів;
- ґрунтова поверхня однорідна, горизонтальна і рівна;
- кочення рівномірне, прямолінійне з усталеною швидкістю близько 7 м/с;
- збільшення ширини шини більше ширини бігової доріжки при її прогинанні, з причини незначного впливу цієї зміни в місці контакту з ґрунтом на величину заглиблення колеса в ґрунтову основу, не враховується;
- збільшення глибини утвореної колії при появі горизонтальних сил визначається в функції поправки на буксування колеса;
- відстань від поверхні недеформованого ґрунту до глибини заглиблення колеса при коченні відповідає глибині утвореної колії;
- для пневматичного колеса вибрані параметри або діапазон зміни тиску повітря, властиві шині 315/80 R22.5 (Goodyear, Dunlop, Fulda, Sava, Кама, Ling-Long, Jinyu) моделі “Кама-1260” як найбільш поширеної і такої, що використовується на ББА економічного сектора країни і державних структур, які діють в інтересах оборони, забезпечення законності та правопорядку;
- діапазон вертикальних навантажень на колесо і кількість послідовних проходжень визначені відповідно до типу ББА вантажопідйомністю від $3\ 000$ кг до $15\ 000$ кг та колісною формулою 8×8 .

Результати математичного моделювання руху ББА по ДОП з урахуванням зазначених обмежень і припущень дозволили отримати залежності опору його коченню в функції від навантаження, що припадає на колеса, встановленого тиску повітря в шинах і номера проходження.

Результати моделювання на прикладі залежностей f_{w0} в функції R_z і P_w для першого та другого, третього та четвертого проходжень колеса по ґрунтовій основі ДОП “вологий пісок” подані на рисунках 3 і 4.

Аналіз результатів математичного моделювання також дозволив визначити інтервали раціонального тиску повітря в шинах коліс, що відповідають найменшим значенням коефіцієнта опору коченню при русі по ґрунтовій основі, з варіюванням навантаження на колеса і залежно від номера проходження для випадку кочення коліс по ґрунтовій основі опорної поверхні “вологий пісок”. Значення раціонального тиску повітря для першого проходження з навантаженням $10\ 000$ Н і $20\ 000$ Н, другого проходження з навантаженням від $10\ 000$ Н до $40\ 000$ Н і третього проходження з навантаженням від $30\ 000$ Н до $50\ 000$ Н знаходяться в інтервалі від $0,10$ МПа до $0,15$ МПа. Зі збільшенням навантаження при першому проходженні коліс до $30\ 000$ – $50\ 000$ Н, а при другому проходженні до $50\ 000$ Н значення раціонального тиску повітря знижуються і знаходяться в інтервалі від $0,05$ МПа до $0,10$ МПа. Для четвертого проходження також характерне зменшення значень раціонального тиску зі збільшенням навантаження.

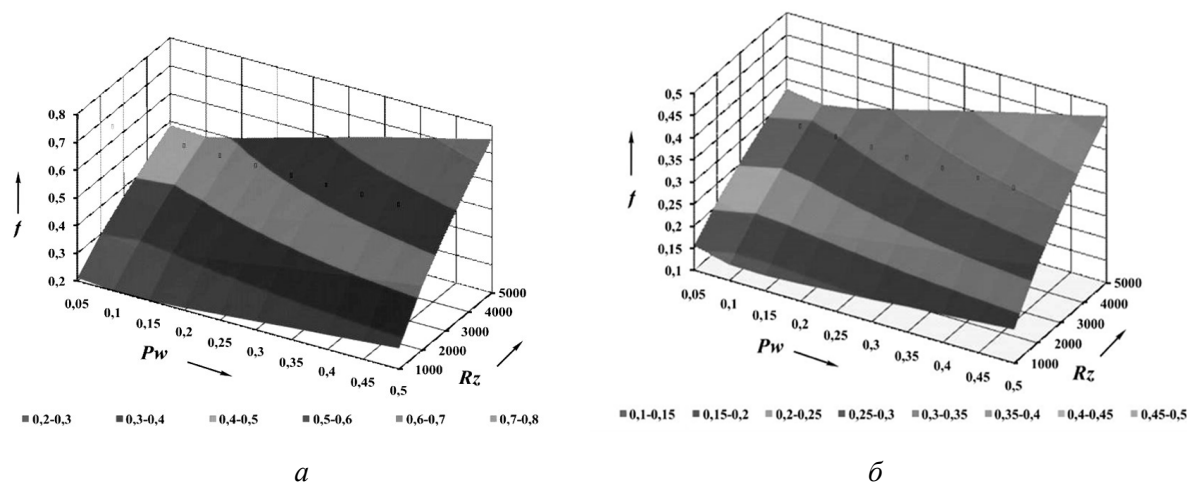


Рисунок 3 – Залежності $f_w\theta$ в функції R_z і P_w першого (а) та другого (б) проходжень колеса по ґрунтовій основі ДОП “вологий пісок”

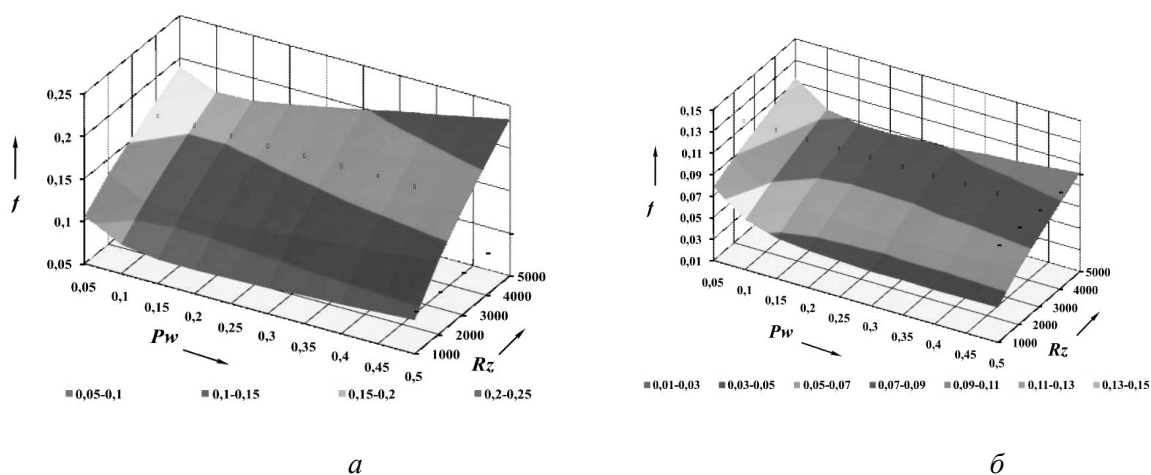


Рисунок 4 – Залежності $f_w\theta$ в функції R_z і P_w для третього (а) та четвертого (б) проходжень колеса по ґрунтовій основі ДОП “вологий пісок”

Розроблена математична модель також може бути використана для випадків кочення коліс по ґрунтовій основі опорної поверхні “суглинок-20”, “суглинок-35”, “рілля” з різними значеннями раціонального тиску повітря в шинах та для різного ступеня навантаження ББА.

Інтервали значень раціонального тиску повітря в шинах коліс P_w , що відповідають мінімальним значенням коефіцієнта опору коченню для встановленого навантаження залежно від номера проходження коліс по відповідній ґрунтовій основі, подані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Раціональні значення P_w (МПа) для випадку руху по ДОП “вологий пісок”

R_z , Н	Номер проходження			
	перше	друге	третє	четверте
10 000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20	0,35–0,40
20 000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20	0,25–0,30
30 000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,20–0,25
40 000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
50 000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,10–0,15	0,15–0,20

Базуючись на результатах проведеного математичного моделювання, можна дійти висновку, що у разі руху ББА по ДОП необхідно знижувати тиск повітря в шинах колісного рушія окремо для коліс кожної осі. Величина раціонального тиску повітря в шинах коліс ББА, що відповідає мінімальним значенням коефіцієнта опору коченню, залежить від типу ДОП, фізико-механічних характеристик ґрунту, навантаження, що припадає на кожне колесо ББА, і розташування коліс у колісній формулі ББА.

Отже, для підвищення прохідності ББА, незалежно від колісної формули, необхідно застосовувати метод децентралізованого регулювання тиску повітря в шинах.

Висновки

1. Розроблено математичну модель руху багатоцільових броньованих колісних транспортних комплексів по деформованих опорних поверхнях, що дозволяє оцінювати безпеку та енергоефективність руху при виконанні СБЗ підрозділами Національної гвардії України та Збройних Сил України.

2. Математична модель дозволяє моделювати рух ББА як по недеформованих, так і по деформованих опорних поверхнях. Її використання дозволяє імітувати рух ББА в заданих умовах експлуатації, тим самим значно скоротити терміни проектування, доводочних випробувань, а також терміни підготовки до виконання СБЗ і підвищити безпеку та енергоефективність руху.

3. На основі отриманих даних пропонується спосіб підвищення прохідності ББА шляхом децентралізованого регулювання тиску повітря в шинах у функціональній залежності від навантаження, що припадає на колеса, та їх розташування в колісній формулі ББА.

4. Застосування автоматизованої системи регулювання тиску повітря в шинах модернізованої конструкції дозволяє оперативнo адаптувати колісний рушій ББА до дорожніх умов, встановлюючи раціональний тиск повітря в шинах коліс кожної осі залежно від навантаження на колеса.

5. За допомогою імітаційного моделювання встановлено, що розроблений закон розподілу моментів по колесах пропорційно відносним нормальним навантаженням, а саме в кожен рушій, що поєднує в собі переваги диференціального і блокованого зв'язку, дозволяє підвищити безпеку та енергоефективність для всіх досліджуваних випадків руху у всьому швидкісному діапазоні.

6. Отримані результати математичного моделювання можуть бути в подальшому порівняні з результатами натурних експериментів для доведення адекватності розробленої математичної моделі.

7. Розроблена математична модель дозволяє визначити параметри прохідності на стадії проектування нових ББА або у процесі експлуатації існуючих ББА у визначених умовах.

Перелік джерел посилання

1. Повышение маневренности и управляемости колонн Национальной гвардии Украины применением беспилотных автомобилей / С. А. Соколовский та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ. 2018. Вип. 1 (31). С. 27–35.

2. Склярів Н. В., Склярів В. Н., Волков В. П., Волкова Т. В. Автомобиль. Автоматизация управления : учеб. пособие. Донецк : ЛАНДОН-XXI, 2015. 286 с.

3. Подригало М. А. Новое в теории эксплуатационных свойств автомобилей и тракторов : монография. Харьков : Акад. ВВ МВС Украины, 2013. 222 с.

4. Склярів М. В., Воробйов С. О. Вплив конструктивних факторів на прохідність автомобільної техніки багатоцільового призначення. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ. 2020. Вип. 1 (35). С. 69–78.

5. Нікорчук А. І. Підвищення маневреності військової автомобільної техніки при динамічному та комбінованому способах управління поворотом. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ. 2016. Вип. 2 (28). С. 10–15.

6. Кайдалов Р. О., Баштовий В. М., Ларін О. О., Водка О. О. Експериментальне оцінювання плавності ходу спеціального транспортного засобу з нелінійним підресорюванням при русі по бездоріжжю. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ. 2015. Вип. 2 (26). С. 27–31.

7. Вольская Н. С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 377 с.

8. Автоматизированный стенд для определения деформации грунта в условиях циклического взаимодействия с эластичным колесом / Н. С. Вольская и др. *Системы и приборы управления* : труды ФГУП “НПЦАП”. 2016. № 3. С. 19–27.
9. 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.
10. Агейкин Я. С. Расчет проходимости автомобилей при проектировании. *Теория, проектирование и испытания автомобилей* : межвуз. сб. науч. тр. Москва, 1982. Вып. 1. С. 8–15.
11. Беккер М. Г. Введение в теорию систем “местность – машина”. Москва : Машиностроение, 1973. 520 с.
12. Келлер А. В., Драгунов Г. Д. Теоретические основы оптимизации распределения мощности в колесных машинах. *Вестник ЮУрГУ*. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ. 2004. № 5(№34). С. 90–94.
13. Котиев Г. О., Горелов В. А. Моделирование прямолинейного движения полноприводной машины по несвязным грунтам. *Автомобили и двигатели* : труды МАМИ. 2009. № 241. С. 25–29.
14. Котиев Г. О., Серебряный И. В. Повышение проходимости автомобиля за счет рационального распределения потоков мощности по колесам. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение*. 2009. Спец. вып. С. 193–201.
15. Наумов А. Н., Чистов М. П. Математическая модель криволинейного движения эластичного колеса по деформируемому грунту. *Труды МАМИ. Автомобили*. Москва, 2007. № 6 (47). С. 19–23.
16. Наумов А. Н. Оценка влияния конструктивных и эксплуатационных параметров автомобилей на показатели их опорной проходимости : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Москва, 2007. 153 с.
17. Чистов М. П. Исследование сопротивления качению при движении полноприводного автомобиля по деформируемому грунту : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Москва, 1971. 136 с.
18. Бронированный автомобиль KRAZ Hurricane (КрАЗ “Ураган”). URL: <https://www.enovosty.com/armiya/full/681-bronirovannyj-avtomobil-kraz-hurricane-kraz-uragan> (дата звернення: 09.01.2021).

Стаття надійшла до редакції 22.04.2021 р.

УДК 629.3.017.5

Н. В. Скляр, А. И. Шаповалов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПО ДЕФОРМИРОВАННОЙ
ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ В ШИНАХ КОЛЕС
МНОГОЦЕЛЕВОГО БРОНИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ НА ПРИМЕРЕ КрАЗ “УРАГАН”**

Предлагается математическое моделирование движения многоцелевых бронированных автомобилей военного назначения. Рассматривается возможность улучшения условий их движения и повышения проходимости путем оптимального перераспределения давления воздуха в шинах колес.

К л ю ч е в ы е с л о в а: движение транспорта, математическое моделирование, проходимость.

UDC 629.3.017.5

M. Sklyarov, O. Shapovalov

**MATHEMATICAL SIMULATION OF MOVEMENT ON A DEFORMED SUPPORTING
SURFACE WITH CHANGE OF TIRE PRESSURE IN WHEEL TIRES OF A MULTI-PURPOSE
ARMORED VEHICLE IN THE EXAMPLE OF KRAZ “HURRICANE”**

Mathematical modeling of the movement of multi-purpose armored vehicles for military purposes has significant features in contrast to the modeling of the movement of civilian vehicles. Because the operation of military equipment provides the ability to move not only on general roads, but also outside them. With

different coefficients of adhesion of wheels to the road and coefficients of rolling resistance on the road. Therefore, to improve driving conditions and increase cross-country, it is advisable to carry out the optimal redistribution of air pressure in the tires. The efficiency of motion in such conditions must be theoretically investigated using a modern mathematical apparatus. That will allow providing for multipurpose motor vehicles effective performance of the set level of tasks in the specified operating conditions and at a certain ratio of its technical characteristics to provide the maximum degree of performance of technical requirements.

The purpose of the article is to create a mathematical apparatus for regulating the air pressure between the axles of an armored vehicle with a wheel formula 8×8 , when moving on surfaces with variable coefficients of traction and wheel resistance, to increase the passability of a multi-purpose armored vehicle.

The basis of the mathematical model of rectilinear motion of a multi-purpose armored vehicle on a deformed support surface and the determination of the characteristics of this movement (indicators of reference passability) is the modeling of the car movement proposed by the authors in the works.

When developing a mathematical model of the movement of a multi-purpose armored vehicle on a deformed bearing surface, it is necessary to develop a calculation scheme in which the assumptions are made:

- the rectilinear movement of the multipurpose armored car on an equal basic basis is considered;*
- left and starboard conditions are the same;*
- wheel tracks of all bridges (axes) on the sides of the car completely coincide;*
- the characteristics of the ground surface on the sides of the car are the same;*
- the connection of the wheels with the car body in the vertical plane is rigid (without taking into account the elastic properties of the suspension);*
- the longitudinal flexibility of the suspension guide elements is taken into account;*
- the engine torque affects the wheel directly;*
- elastic - damping properties of transmission elements are not taken into account;*
- soil deformation is specified not because of its direct physical characteristics, but as specific energy losses during wheel rolling on a flat surface*
- the longitudinal pliability of the guide elements of the suspension is taken into account;*
- engine torque directly affects the wheel;*
- elastic-damping properties of transmission elements are not taken into account;*
- deformation of the soil is set not because of its direct physical characteristics, but as specific energy losses when rolling the wheel on a flat basis;*
- engine response to a change in the position of the fuel supply body without delay;*
- characteristic of the torque developed by the engine, taken in the form of an inclined line, the maximum value of which is determined by the fractions of the change in the position of the fuel supply body.*

К e y w o r d s: traffic, mathematical modeling, possibility.

Склярів Микола Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0001-7785-6059>

Шаповалов Олександр Ігорович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0001-8518-4336>