Показники стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї з урахуванням деформації підвіски та шин

Indicators of a Vehicle's Rollover Resistance on a Side-Sloping Surface while Firing from Weapons, Taking into Account Deformation of the Suspension and Tires

Олександр Біленко
доктор технічних наук, професор, професор кафедри, e-mail: bai69@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6007-3330

Сергій Шабатура
Corresponding author: ад'юнкт докторантури та ад'юнктури, e-mail: sergejsabatura@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1107-2088

Oleksandr Bilenko
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department, e-mail: bai69@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6007-3330

Serhii Shabatura
Corresponding author: PhD student, e-mail: sergejsabatura@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1107-2088

Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, Україна

National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Received: August 31, 2026 | Revised: October 2, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК: 623.4

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.40

Мета роботи. Удосконалення показників стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї шляхом урахування бічної та радіальної деформації шин.

Метод дослідження. Методи теоретичної механіки, математичного моделювання, експериментального дослідження та порівняльного аналізу розрахункових і емпіричних даних. Використано нелінійні функціональні залежності для опису зміни бічної жорсткості шин.

Результати дослідження. Удосконалено математичні залежності для визначення коефіцієнта запасу стійкості та відносного коефіцієнта стійкості автомобіля з урахуванням зміщення центру мас унаслідок деформації шин. На прикладі броньованої бойової машини "Варта" встановлено, що зі зниженням тиску повітря в шинах зростають розбіжності між експериментальними та розрахунковими значеннями бічного зміщення центру мас. Визначено, що неврахування деформації шин призводить до завищення граничного кута нахилу опорної поверхні на 1,3°, або близько 4 %.

Теоретична цінність дослідження. Розвинуто математичний апарат оцінювання поперечної стійкості автомобіля шляхом урахування додаткових деформаційних характеристик ходової частини.

Практична цінність дослідження. Отримані результати можуть використовуватися для обґрунтування умов застосування бойових машин та оцінювання впливу встановленого озброєння на їхню поперечну стійкість.

Обмеження дослідження. Результати отримано для конкретного зразка бойової машини та визначених характеристик шин і озброєння.

Тип статті. Дослідницька стаття.

Purpose. To improve vehicle rollover stability indicators on a laterally sloped surface during weapon firing by accounting for lateral and radial tire deformation.

Method. Theoretical mechanics, mathematical modeling, experimental investigation, and comparative analysis of calculated and empirical data were employed. Nonlinear functional relationships were used to describe changes in lateral tire stiffness.

Findings. Mathematical relationships for determining the rollover stability safety factor and relative vehicle stability coefficient were improved by incorporating center-of-mass displacement caused by tire deformation. Using the Varta armored vehicle as an example, the study established that decreasing tire inflation pressure increases discrepancies between experimental and calculated values of lateral center-of-mass displacement. Neglecting tire deformation was found to overestimate the limiting lateral slope angle by 1.3°, or approximately 4%.

Theoretical implications. The study extends the mathematical framework for assessing vehicle lateral stability by incorporating additional deformation characteristics of running gear components.

Practical implications. The findings can support the assessment of operating conditions for armored vehicles and the evaluation of how mounted weapons affect their lateral stability.

Limitations. The results were obtained for a specific armored vehicle configuration under defined tire and weapon characteristics.

Paper type. Research article.

Ключові слова: бойова машина, стійкість до перекидання, віддача зброї, бічний ухил, деформація шин, коефіцієнт запасу стійкості, відносний коефіцієнт стійкості, перекидальний момент.

Key words: combat vehicle, rollover stability, weapon recoil, lateral slope, tire deformation, rollover stability safety factor, relative stability coefficient, overturning moment.

Вступ

Особливе місце серед сучасних засобів вогневої підтримки та перевезення особового складу посідають легкі броньовані бойові машини (ББМ). Їх широке застосування під час виконання бойових і спеціальних завдань зумовлене високою мобільністю, захищеністю та можливістю оснащення різними видами озброєння.

Бойова живучість легких ББМ значною мірою залежить від показників їхньої рухливості та ефективності застосування озброєння [1, 2]. Одним із важливих чинників, що визначають можливості застосування бойових машин, є їхня стійкість, зокрема до бічного перекидання. Водночас підвищення потужності встановленого озброєння, спрямоване на забезпечення необхідної ефективності ураження цілей, може супроводжуватися збільшенням сили віддачі, що негативно впливає на поперечну стійкість машини [3]. Особливої актуальності ця проблема набуває під час експлуатації ББМ на поверхнях із бічним ухилом, коли сукупна дія сили тяжіння та сили віддачі зброї може призводити до зменшення запасу стійкості й підвищення ризику перекидання.

Оцінювання стійкості броньованих автомобілів до перекидання ґрунтується на врахуванні їхніх геометричних і масових характеристик, положення центру мас, параметрів підвіски та зовнішніх силових впливів [4]. Водночас у реальних умовах експлуатації істотний вплив на поперечну стійкість машини мають пружні властивості елементів ходової частини, зокрема підвіски та шин. Деформація зазначених елементів спричиняє зміну просторового положення корпусу автомобіля, його кута крену та положення центру мас, що безпосередньо впливає на співвідношення утримувальних і перекидальних моментів.

Попри наявність наукових досліджень, присвячених впливу деформації підвіски на стійкість автомобіля, питання врахування пружної деформації шин під час оцінювання стійкості легких ББМ до перекидання в умовах ведення вогню залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребує уточнення вплив бічної та радіальної деформації шин на зміщення центру мас автомобіля, зміну кута крену корпусу та величину граничного кута нахилу опорної поверхні, за якого втрачається поперечна стійкість машини.

Неврахування зазначених чинників у розрахункових моделях може призводити до завищення оцінюваного запасу стійкості автомобіля та, відповідно, до недостатньо обґрунтованого визначення допустимих умов його застосування. Особливого значення це набуває для бойових машин, оснащених озброєнням, під час стрільби з якого виникають додаткові силові навантаження на корпус і ходову частину.

Отже, удосконалення показників стійкості автомобіля до перекидання шляхом урахування деформації підвіски та шин є актуальним науково-прикладним завданням. Його розв'язання сприятиме підвищенню достовірності розрахункових оцінок поперечної стійкості бойових машин та обґрунтованості визначення умов їх застосування під час ведення вогню на поверхнях із бічним ухилом.

Огляд літератури

Питання забезпечення стійкості автомобілів і легких броньованих бойових машин (ББМ) належать до важливих напрямів досліджень у теорії автомобіля та динаміці транспортних засобів. У фундаментальних працях [5, 6] розглянуто закономірності формування сил і моментів, що визначають стійкість, керованість і безпеку руху автомобіля. Особливу увагу приділено впливу геометричних параметрів транспортного засобу, положення його центру мас, характеристик підвіски та взаємодії коліс з опорною поверхнею на експлуатаційні властивості автомобіля.

Дослідження механіки пневматичних шин засвідчують істотний вплив їхніх пружних властивостей на формування бічних сил, величину кута уводу, кут крену автомобіля та його поперечну стійкість. У працях [7–10] розглянуто характеристики бічної та радіальної жорсткості

шин, закономірності їх деформації під дією зовнішніх навантажень, а також вплив внутрішнього тиску та конструктивних особливостей шин на динамічні характеристики транспортних засобів. Водночас зазначені дослідження переважно зосереджені на питаннях забезпечення керованості, стійкості та безпеки руху автомобілів загального призначення.

У дослідженні [12] запропоновано вдосконалену модель оцінювання стійкості автомобіля до перекидання, яка враховує вплив деформації підвіски та шин. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного врахування пружних характеристик елементів ходової частини під час визначення умов втрати поперечної стійкості транспортного засобу. Проте безпосереднє застосування таких підходів до бойових машин потребує врахування додаткових силових впливів, зокрема сили віддачі від озброєння.

У працях [1, 2] досліджено питання забезпечення бойової живучості броньованих колісних машин та визначено взаємозв'язок між її рівнем, показниками рухливості й ефективністю застосування озброєння. Одним із чинників, що впливають на бойову живучість, визначено стійкість машини, зокрема, до бічного перекидання.

Подальший розвиток цього наукового напряму представлено в дослідженні [3], у якому запропоновано умову забезпечення стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї. У праці [11] удосконалено показники стійкості шляхом урахування деформації підвіски та відповідного зміщення центру мас автомобіля. Запропонований підхід дав змогу уточнити визначення граничного кута нахилу опорної поверхні, за якого автомобіль втрачає бічну стійкість.

Водночас результати експериментальних досліджень, наведені в праці [11], засвідчили, що зі зниженням тиску повітря в шинах розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями зміщення центру мас і кута крену автомобіля зростає. Це свідчить про необхідність додаткового врахування пружних властивостей шин у математичних моделях оцінювання поперечної стійкості бойових машин.

У дослідженні [13] розглянуто характеристики бічної сили шини з урахуванням взаємопов'язаного впливу вертикального навантаження та внутрішнього тиску. У праці [14] досліджено зміну пружних характеристик боковини шини залежно від тиску повітря. Результати цих досліджень підтверджують, що бічна жорсткість шини не є сталою величиною, а залежить від умов навантаження, внутрішнього тиску та конструктивних характеристик.

Отже, аналіз наукових публікацій свідчить про наявність теоретичних і методичних підходів до оцінювання поперечної стійкості автомобілів з урахуванням геометричних, масових і пружних характеристик їхніх конструктивних елементів. Водночас недостатньо дослідженим залишається сукупний вплив сили віддачі озброєння, бічного ухилу опорної поверхні та деформації шин на зміну положення центру мас і показники стійкості легких броньованих бойових машин.

Зазначене зумовлює необхідність удосконалення показників стійкості автомобіля до перекидання шляхом урахування бічної та радіальної деформації шин, що дасть змогу уточнити розрахункові значення запасу стійкості та граничного кута нахилу опорної поверхні під час ведення вогню зі зброї.

Методологія дослідження

Методологічну основу дослідження становить комплексний підхід до оцінювання поперечної стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї з урахуванням деформаційних характеристик підвіски та шин.

Для досягнення мети дослідження використано методи теоретичної механіки, математичного моделювання, експериментального дослідження та порівняльного аналізу розрахункових і емпіричних даних.

Методи теоретичної механіки застосовано для аналізу сил і моментів, що діють на автомобіль під час його розташування на похилій опорній поверхні та ведення вогню. Основну увагу приділено визначенню впливу сили тяжіння, сили віддачі зброї та деформації елементів

ходової частини на положення центру мас автомобіля, кут крену корпусу й співвідношення утримувальних і перекидальних моментів.

Математичне моделювання використано для вдосконалення показників стійкості автомобіля до перекидання, зокрема коефіцієнта запасу стійкості та відносного коефіцієнта стійкості. За основу прийнято раніше розроблені математичні залежності, що враховують геометричні й масові характеристики автомобіля, параметри встановленого озброєння, кут нахилу опорної поверхні та деформацію підвіски [3, 11]. Подальше вдосконалення цих залежностей здійснено шляхом урахування додаткового зміщення центру мас автомобіля внаслідок бічної та радіальної деформації шин.

Для опису впливу бічного навантаження на деформацію шин використано залежність коефіцієнта бічної жорсткості від прикладеної сили. При цьому враховано можливість нелінійної зміни жорсткості шини, зумовленої її конструктивними особливостями, внутрішнім тиском повітря та наявністю вставок типу RunFlat. Для математичного опису плавного переходу між ділянками різної жорсткості розглянуто використання гіперболічного тангенса та логістичної сигмоїди.

Експериментальні дослідження використано для визначення залежності бічного зміщення центру мас броньованої бойової машини “Варта” від величини прикладеної бічної сили та тиску повітря в шинах. Аналіз проведено для значень тиску 1,5; 3,5; 5,5 та 7,5 атм і бічних навантажень у діапазоні від 10 000 до 40 000 Н. Отримані емпіричні значення порівняно з результатами розрахунків за математичними залежностями, які не враховують деформацію шин.

Метод порівняльного аналізу застосовано для оцінювання розбіжностей між розрахунковими та експериментальними значеннями бічного зміщення центру мас автомобіля, а також для зіставлення результатів визначення показників стійкості за моделями з різним ступенем урахування деформаційних характеристик ходової частини.

Оцінювання впливу деформації шин на поперечну стійкість автомобіля здійснено на прикладі ББМ “Варта”, оснащеної 23-мм автоматичною гарматою 2А14. Розглянуто розрахункові залежності показників стійкості від кута нахилу опорної поверхні для трьох варіантів моделювання: без урахування деформації підвіски та шин; з урахуванням деформації підвіски; з урахуванням деформації підвіски та шин.

Застосування зазначених методів забезпечило можливість оцінити вплив пружних властивостей шин на положення центру мас автомобіля, уточнити математичні залежності для визначення показників його поперечної стійкості та встановити відмінності між розрахунковими результатами, отриманими з урахуванням деформації шин і без її врахування.

Результати

У дослідженні [11] удосконалено показники стійкості автомобіля до перекидання, запропоновані в праці [3], шляхом урахування деформації підвіски та зумовленого нею зміщення центру мас автомобіля. Відповідні математичні залежності наведено у формулах (1) і (2).

$$K_{CT} = \left[\left(\frac{B}{2} - \Delta_{BG}\right) G_a \cos\beta + \left(\frac{B}{2} - \Delta_{BF}\right) F_в \sin(\Theta_0 - \beta)\right] - \\ -\left[\left(h_g - \Delta h_g\right) G_a \sin\beta + (h_в - \Delta h_в) F_в \cos(\Theta_0 - \beta)\right], \quad (1)$$

$$K_{\text{СТВ}} = \frac{\left(\frac{B}{2} - \Delta_{BG}\right) G_a \cos\beta + \left(\frac{B}{2} - \Delta_{BF}\right) F_{\text{в}} \sin(\Theta_0 - \beta)}{\left(h_g - \Delta h_g\right) G_a \sin\beta + (h_{\text{в}} - \Delta h_{\text{в}}) F_{\text{в}} \cos(\Theta_0 - \beta)}. \quad (2)$$

де B – колія автомобіля;
G_a – сила тяжіння, що діє на автомобіль у центрі його мас;
β – кут ухилу опорної поверхні (косогору);
F_b – сила віддачі зброї;

Θ_0 – кут підвищення ствола;
h_g – відстань від опорної поверхні до центру мас автомобіля;
$h_в$ – відстань від опорної поверхні до точки прикладання сили віддачі зброї;
Δh_g – величина зсуву точки прикладання сили тяжіння за висотою;
Δ_{BG} – величина зсуву точки прикладання сили тяжіння у бічному напрямку;
$\Delta h_в$ – величина зсуву точки прикладання сили віддачі зброї за висотою;
Δ_{BF} – величина зсуву точки прикладання сили віддачі зброї у бічному напрямку.

Зміни значень відповідних плечей обчислюють за формулами (3)–(6) [11].

$$\Delta h_g = 2r_{кр}\, sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) cos\left(\frac{\pi-\psi_{кр}}{2} - \beta\right), \quad (3)$$

$$\Delta_{BG} = 2r_{кр}\, sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) sin\left(\frac{\pi-\psi_{кр}}{2} - \beta\right). \quad (4)$$

$$\Delta h_в = 2r_{крв}\, sin\left(\frac{\psi_{крв}}{2}\right) cos\left(\frac{\pi-\psi_{крв}}{2} - \beta\right), \quad (5)$$

$$\Delta_{BF} = 2r_{крв}\, sin\left(\frac{\psi_{крв}}{2}\right) sin\left(\frac{\pi-\psi_{крв}}{2} - \beta\right). \quad (6)$$

де $r_{кр}$ – відстань від точки обертання кузова до центру мас автомобіля;
$\psi_{\text{кр}}$ – кут крену, що зумовлений деформацією підвіски на косогорі внаслідок дії сили тяжіння;
$r_{крв}$ – відстань від точки обертання кузова до точки прикладання сили віддачі зброї;
$\psi_{крв}$ – кут крену, що зумовлений деформацією підвіски внаслідок дії сили віддачі зброї.

Результати проведених попередніх досліджень впливу бічної сили P, прикладеної до центру мас ББМ, та кута нахилу опорної поверхні, наβ якій розташовано ББМ, на кут крену $\psi_{\text{кр}}$ підресореної частини машини та зсув точки прикладання сили тяжіння (ЦМ) за висотою Δh_g та в бічному напрямку Δ_{BG} засвідчили достатньо високу узгодженість із розрахунками за наведеними вище формулами [11]. За максимального тиску повітря в шинах (7,5 атм) розбіжність становила близько 10–12 мм (10–15 %), що могло пояснюватися малим обсягом вибірки та похибками вимірювань. Проте подальші експериментальні дослідження, зокрема зі зниженим тиском у шинах, свідчать про значний вплив тиску в шинах на положення центру мас автомобіля.

У табл. 1 та на рис. 1 наведено залежність бічного зсуву центру мас автомобіля Δ_{BG} від значення бічної сили F_z для тиску в шинах P 1,5…7,5 атм для ББМ “Варта”. У чисельнику наведено емпіричні дані, а в знаменнику – розрахункові, отримані відповідно до [11]. На рис. 1 пунктирними лініями позначено розрахункові залежності без урахування деформації шин, а суцільними – емпіричні залежності, отримані під час експериментальних досліджень. Криві для тиску в шинах 3,5 атм та 5,5 атм на рисунку не наведено через практичний збіг деяких ліній та ускладнення сприйняття інформації.

Таблиця 1. Залежності бічного зсуву центру мас автомобіля від значення бічної сили та тиску в шинах для ББМ “Варта”

F, Н	*P*, атм			
	1,5	3,5	5,5	7,5
10000	44/31	31/25	23/17	11/6
20000	89/72	75/63	57/52	43/38
30000	143/122	128/110	107/96	86/78
40000	210/181	185/166	161/147	140/125

Джерело: складено авторами за результатами власних розрахунків та експериментальних досліджень.

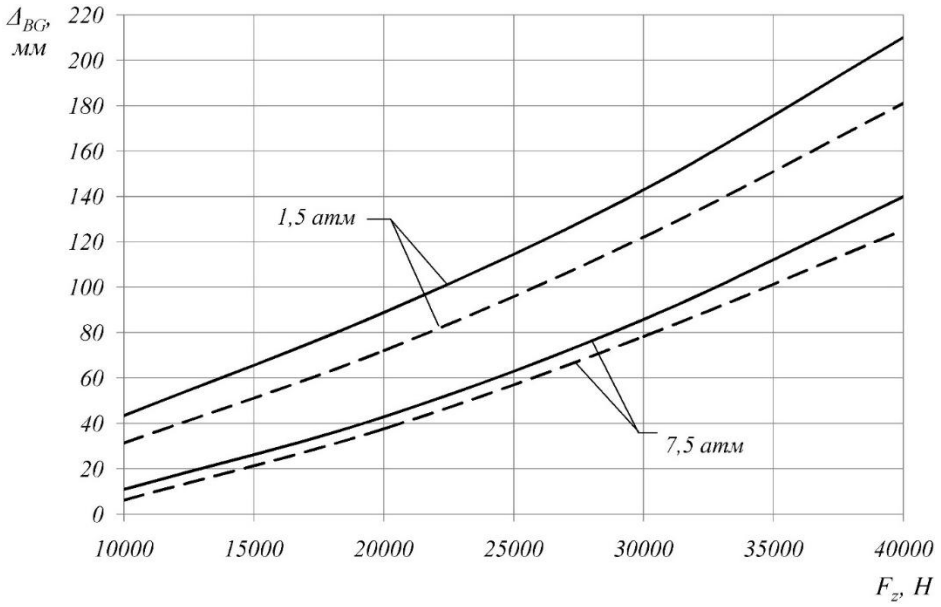


Рисунок 1. Залежності бічного зсуву центру мас автомобіля від значення бічної сили для ББМ “Варта”

Джерело: побудовано авторами на основі власних розрахунків та експериментальних досліджень.

Як свідчать дані табл. 1 та рис. 1, експериментальні значення бічного зміщення центру мас ББМ перевищують відповідні розрахункові значення, причому розбіжність між ними зростає зі зниженням тиску повітря в шинах. Зазначений ефект зумовлений додатковою деформацією шин під дією бічної сили, величина якої залежить від їхніх пружних характеристик, зокрема бічної жорсткості.

Бічна жорсткість шини характеризується коефіцієнтом K_z, який визначається як відношення бічної сили F_z до величини пружного бічного зміщення обода колеса відносно бігової доріжки протектора δ_z[7]:

$$K_z = \frac{F_z}{\delta_z}. \tag{7}$$

В окремих випадках залежність $K_z(F_z)$ приймається лінійною, що є справедливим для відносно вузьких діапазонів варіювання вказаних величин, які спостерігаються за нормальних умов експлуатації автомобільної техніки [8]. Однак в екстремальних умовах, за значень деформації шин, що наближаються до граничних, вважати величину K_z сталою не можна. Відносна складність впливу бічної сили та тиску в шинах на зміщення обода диска та, відповідно, центру мас ББМ пояснюється також наявністю у шинах ББМ вставок RunFlat. Внаслідок цього коефіцієнт бічної жорсткості шини K_z змінюється (підвищується) після достатнього зсуву борта шини та її упору в кільце RunFlat. У такому випадку варто подати K_z як функцію бічної сили:

$$K_z(F_z) = \begin{cases} K_{z1}, & \text{при } F_z \le F_{zcr} \\ K_{z1} + K_{zrf}, & \text{при } F_z > F_{zcr} \end{cases}, \tag{8}$$

де K_{z1} – початкове значення коефіцієнта бічної жорсткості шини, що зумовлене тиском повітря в шині та характеристиками її каркасу;

K_{zrf} – значення коефіцієнта бічної жорсткості шини, що відповідає вставці RunFlat;

F_{zcr} – критична бічна сила, під дією якої повністю вибирається конструктивний зазор між боковиною шини та вставкою RunFlat.

Стрибок жорсткості шини відбувається в момент, коли лінійне зміщення обода стає

рівним зазору. У реальних умовах перехід не є стрибкоподібним, оскільки гума боковини шини має власну товщину й плавно деформується. Тому для опису залежності коефіцієнта бічної жорсткості шини від бічної сили доцільно використовувати відповідні функції, наприклад, гіперболічний тангенс (9) або логістичну сигмоїду (10):

$$K_z(F_z) = K_{z1} + \frac{K_{zrf}}{2}\left(1 + \text{th}\left(\frac{F_z - F_{zcr}}{S}\right)\right) , \quad (9)$$

де S – коефіцієнт згладжування, який залежить від жорсткості внутрішнього шару шини.

$$K_z(F_z) = K_{z1} + \frac{K_{zrf}}{1+e^{-k[F_z - F_{zcr}]}} . \quad (10)$$

Запропоновані функціональні залежності (9) і (10) забезпечують математичну гладкість (диференційовність) та дають змогу описати плавний, але інтенсивний перехід від пружної деформації шини до режиму контакту її боковини зі вставкою RunFlat.

Для визначення бічного зміщення центру мас автомобіля, зумовленого бічною деформацією шин, перетворимо формулу (7) відносно величини δ_z (11):

$$\delta_z = \frac{F_z}{K_z}. \quad (11)$$

З урахуванням виразів (10) та (11) уточнено залежність (рис. 2), наведену у табл. 1 та на рис. 1.

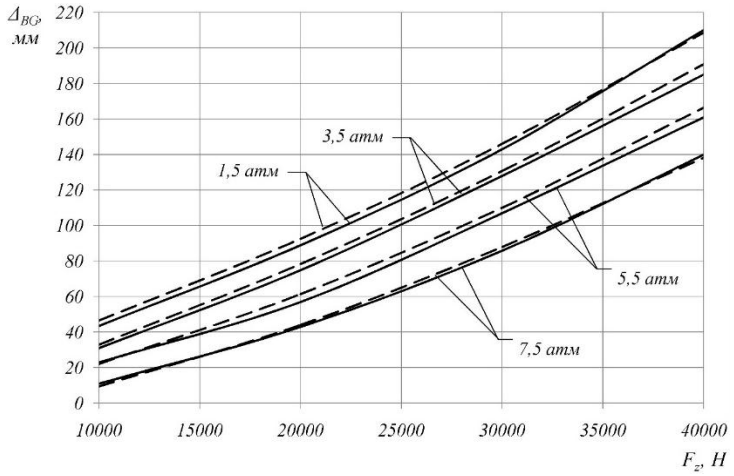


Рисунок 2. Залежності бічного зсуву центру мас автомобіля від значення бічної сили для ББМ “Варта” з урахуванням бічного зміщення центру мас автомобіля внаслідок бічної деформації шин

Джерело: розроблено авторами на основі математичних залежностей [3, 11] з урахуванням деформації шин.

Візуальне зіставлення на рис. 2 свідчить про узгодженість емпіричних і розрахункових значень зміщення центру мас ББМ. Це можна пояснити врахуванням величини δ_z. Незначні розбіжності можуть бути зумовлені похибками вимірювання величин та нестабільністю характеристик шин під час проведення експерименту, а також певною невідповідністю фактичних характеристик шин заявленим.

Для обчислення Δ_{BG} та Δ_{BF} треба додатково знати величину зсуву центру мас автомобіля та складову кута крену автомобіля через неоднакову радіальну деформацію шин, а також радіус цього крену.

На косогорі виникає динамічний перерозподіл вертикальних навантажень між бортами автомобіля. Нижній за схилом борт додатково притискається до опорної поверхні, а

верхній – розвантажується. Через виникнення різниці між цими деформаціями кузов автомобіля нахиляється. Кут крену кузова автомобіля $\psi_{крш}$ унаслідок радіальної деформації шин визначається за формулою (12) [10]:

$$\psi_{крш} = \frac{\Delta R_y}{K_y\, B/2}, \tag{12}$$

де ΔR_y – додаткова вертикальна сила, що діє на один борт автомобіля внаслідок дії перекидального моменту;

K_y – коефіцієнт радіальної жорсткості шини (за заданого внутрішнього тиску).

Під дією поперечного навантаження боковини шин деформуються в бічному напрямку. Прямокутний у статиці профіль шини підламується та набуває форми паралелограма, що призводить до зменшення статичного радіуса колеса та лінійного зсуву центру мас, величина якого $\delta h_{уш}$ обчислюється за формулою (13) [10]:

$$\delta h_{уш} = \frac{\delta^2_{y\ зовн} + \delta^2_{y\ вн}}{4H_{проф}}, \tag{13}$$

де $\delta_{y\ зовн}$ – лінійний бічний зсув колісних дисків відносно плям контакту шин завантаженого борту;

$\delta_{y\ вн}$ – лінійний бічний зсув колісних дисків відносно плям контакту шин розвантаженого борту;

$H_{проф}$ – початкова висота профілю шини у статичному стані без навантаження.

Радіус крену автомобіля через неоднакову радіальну деформацію шин $r_{крш}$ визначається за формулою (14) [7]:

$$r_{крш} = \sqrt{\left(h_g \cos\psi_{крш} - \Delta H_{уш}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{y\ зовн} + \delta_{y\ вн}}{2} + h_g \sin\psi_{крш}\right)}, \tag{14}$$

де h_g – початкова висота центру мас автомобіля.

З огляду на наведене вище, вирази (3) – (6) можна переписати з доповненнями, що враховують зміщення центру мас автомобіля та точки прикладання сили віддачі внаслідок крену автомобіля через неоднакову радіальну деформацію шин, а також через бічне зміщення обода диска щодо бігової доріжки протектора:

$$\Delta h_g = 2\left[r_{кр}\sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right)\sin\left(\frac{\pi-\psi_{кр}}{2}-\beta\right) + r_{крш}\sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right)\sin\left(\frac{\pi-\psi_{крш}}{2}-\beta\right)\right] + \delta h_{уш}, \tag{15}$$

$$\Delta_{BG} = 2\left[r_{кр}\sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi-\psi_{кр}}{2}-\beta\right) + r_{крш}\sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi-\psi_{крш}}{2}-\beta\right)\right] + \delta_z, \tag{16}$$

$$\Delta h_в = 2\left[r_{крв}\sin\left(\frac{\psi_{крв}}{2}\right)\sin\left(\frac{\pi-\psi_{крв}}{2}-\beta\right) + r_{кршв}\sin\left(\frac{\psi_{кршв}}{2}\right)\sin\left(\frac{\pi-\psi_{кршв}}{2}-\beta\right)\right] + \delta h_{уш}, \tag{17}$$

$$\Delta_{BF} = 2\left[r_{крв}\sin\left(\frac{\psi_{крв}}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi-\psi_{крв}}{2}-\beta\right) + r_{кршв}\sin\left(\frac{\psi_{кршв}}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi-\psi_{кршв}}{2}-\beta\right)\right] + \delta_z, \tag{18}$$

де $r_{крш}$ – відстань від точки обертання кузова внаслідок деформації шин до центру мас автомобіля;

$r_{кршв}$ – відстань від точки обертання кузова внаслідок деформації шин до точки прикладання сили віддачі зброї;

$\psi_{крш}$ – кут крену, що зумовлений деформацією шин на косогорі внаслідок дії сили тяжіння;

$\psi_{кршв}$ кут крену, що зумовлений деформацією шин внаслідок дії сили віддачі зброї.

Очевидно, що

$$r_{кршв} = r_{крш} + (h_в - h_g), \quad (19)$$

$$\psi_{крш} = \frac{\Delta R_y + \Delta R_{yв}}{к_y \, B/2}, \quad (20)$$

де $\Delta R_{yв}$ – додаткова вертикальна сила, що діє на один борт автомобіля внаслідок дії перекидального моменту, що зумовлений силою віддачі зброї.

Для ілюстрації впливу деформації шин на стійкість автомобіля до перекидання на рис. 3 наведено розрахункові залежності коефіцієнта стійкості від кута нахилу опорної поверхні для ББМ “Варта”, що озброєна 23-мм автоматичною гарматою 2А14. На рисунку пунктирною лінією позначено залежність без урахування деформації підвіски та шин, штрихпунктирною – з урахуванням деформації підвіски, а суцільною – з урахуванням деформації підвіски та шин (для тиску в шинах 1,5 атм).



Рисунок 3. Залежності коефіцієнта стійкості від кута нахилу опорної поверхні для ББМ “Варта”

Джерело: побудовано авторами за результатами математичного моделювання.

З рис. 3 видно, що використання виразів, які не враховують жорсткості підвіски та шин, призводить до завищення розрахункового значення кута нахилу опорної поверхні, на якій забезпечується стійкість машини до бічного перекидання. Неврахування жорсткості шин у наведеному прикладі дає завищення значення безпечного кута на 1,3° (близько 4 %). При цьому для зразків техніки, що не використовують вставок типу RunFlat, зазначена похибка може бути значно вищою.

Таким чином, вдосконалено показники стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї, а саме коефіцієнт запасу стійкості та відносний коефіцієнт стійкості автомобіля (1), (2), (15) – (18). Змін зазнали формули (15) – (18).

На відміну від відомих показників, удосконалені показники враховують зміщення центру мас автомобіля внаслідок деформації шин, що дає змогу підвищити достовірність їх розрахункових значень та точність визначення кута нахилу опорної поверхні, за якого втрачається бічна стійкість автомобіля.

Варто зазначити, що для обчислення зазначених вище показників необхідно мати набір вихідних даних, деякі з яких не завжди доступні або взагалі невідомі. У такому випадку

доцільно вдатися до експериментального визначення необхідних параметрів, зокрема кутів нахилу корпусу машини та зміщення її центру мас як функції кута нахилу опорної поверхні. Експериментальні дослідження дають змогу отримати необхідні дані для конкретних зразків техніки з меншим впливом припущень і спрощень, властивих аналітичним моделям, отже, дають змогу підвищити достовірність отриманих результатів. Тому напрямом подальших досліджень слід вважати розроблення методики експериментального визначення параметрів крену та зсуву центру мас автомобіля під впливом деформації пружних елементів підвіски на похилих опорних поверхнях.

Обговорення

Отримані результати дослідження свідчать про доцільність урахування деформаційних характеристик шин під час оцінювання стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом в умовах ведення вогню зброї. На відміну від підходів, що ґрунтуються переважно на геометричних і масових характеристиках автомобіля, запропоноване вдосконалення математичних залежностей передбачає врахування додаткового зміщення центру мас, зумовленого бічною та радіальною деформацією шин.

Результати експериментальних досліджень, проведених на базі ББМ “Варта”, засвідчили наявність розбіжностей між розрахунковими та емпіричними значеннями бічного зміщення центру мас автомобіля. Встановлено, що зі зниженням тиску повітря в шинах зазначені розбіжності зростають. Це підтверджує необхідність урахування пружних характеристик шин, які впливають на положення корпусу автомобіля та співвідношення утримувальних і перекидальних моментів.

Порівняння результатів, наведених у табл. 1 та на рис. 1, свідчить, що використання математичних залежностей без урахування деформації шин призводить до систематичного заниження розрахункових значень бічного зміщення центру мас автомобіля. Зазначена закономірність особливо помітна за зниженого тиску повітря в шинах, коли їхня бічна жорсткість зменшується, а деформація під дією зовнішнього навантаження зростає. Отже, застосування спрощених моделей без урахування зазначеного чинника може призводити до недостатньо точного визначення показників поперечної стійкості бойових машин.

Урахування нелінійного характеру зміни бічної жорсткості шин, зокрема за наявності вставок типу RunFlat, дає змогу уточнити математичний опис їхньої деформації під дією бічного навантаження. Використання функціональних залежностей на основі гіперболічного тангенса та логістичної сигмоїди дає змогу моделювати перехід між ділянками з різними характеристиками жорсткості. Водночас фізична адекватність таких залежностей визначається коректністю вибору їхніх параметрів і відповідністю реальним деформаційним характеристикам конкретного типу шин.

Результати порівняння емпіричних і розрахункових залежностей, представлені на рис. 2, демонструють покращення їх узгодженості після врахування додаткового бічного зміщення, зумовленого деформацією шин. Це свідчить про перспективність запропонованого підходу до вдосконалення математичної моделі. Водночас для кількісного підтвердження підвищення точності доцільно використовувати відповідні показники похибки та оцінювати їх на основі незалежних експериментальних даних.

Важливим результатом дослідження є встановлення впливу деформації шин на визначення граничного кута нахилу опорної поверхні, за якого автомобіль втрачає бічну стійкість. Зокрема, для ББМ “Варта”, оснащеної 23-мм автоматичною гарматою 2А14, неврахування жорсткості шин у розглянутому розрахунковому прикладі призводить до завищення граничного кута нахилу на 1,3°, що становить близько 4 %. Отриманий результат підтверджує практичну значущість урахування деформаційних характеристик шин під час визначення показників стійкості автомобіля до перекидання.

Порівняно з результатами попередніх досліджень [3, 11], у яких розглянуто умови забезпечення стійкості автомобіля до перекидання та вплив деформації підвіски, запропонований підхід передбачає додаткове врахування зміщення центру мас автомобіля внаслідок деформації шин. Це забезпечує подальший розвиток математичного апарату оцінювання поперечної стійкості автомобіля за умов одночасного впливу бічного ухилу опорної поверхні та сили віддачі зброї.

Отримані результати узгоджуються із загальними положеннями теорії динаміки транспортних засобів [5, 6] та результатами досліджень механіки пневматичних шин [7–10], відповідно до яких пружні характеристики елементів ходової частини впливають на просторове положення кузова автомобіля та його стійкість. Водночас запропонований підхід розвиває положення дослідження [12] щодо врахування деформації підвіски та шин під час оцінювання стійкості до перекидання шляхом розгляду додаткового силового впливу, зумовленого віддачею від встановленого озброєння.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання вдосконалених показників для обґрунтування умов застосування бойових машин на поверхнях із бічним ухилом, оцінювання впливу характеристик установленого озброєння на їхню поперечну стійкість, а також уточнення розрахункових обмежень щодо допустимих умов експлуатації. При цьому результати моделювання необхідно розглядати як складову технічного оцінювання, що потребує підтвердження експериментальними дослідженнями для конкретного зразка техніки.

Основні обмеження дослідження пов'язані з використанням експериментальних даних, отриманих для одного типу бойової машини, а також із залежністю результатів розрахунків від характеристик шин, параметрів підвіски, положення центру мас і конструктивних особливостей встановленого озброєння. Крім того, у представлених результатах не наведено повної кількісної оцінки невизначеності вимірювань і незалежної перевірки точності вдосконаленої математичної моделі. Це обмежує можливість безпосередньо поширювати отримані висновки на інші типи бойових машин без додаткового обґрунтування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методики експериментального визначення параметрів крену та зміщення центру мас автомобіля з урахуванням деформації підвіски та шин, встановлення залежності зазначених параметрів від тиску повітря в шинах і величини зовнішнього навантаження, а також перевірку застосовності вдосконалених показників до інших зразків броньованої колісної техніки.

Висновки

Удосконалено показники стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї, зокрема коефіцієнт запасу стійкості та відносний коефіцієнт стійкості. На відміну від відомих підходів, запропоновані математичні залежності враховують додаткове зміщення центру мас автомобіля, зумовлене бічною та радіальною деформацією шин, що дає змогу уточнити розрахункові значення показників поперечної стійкості.

Установлено, що деформаційні характеристики шин істотно впливають на результати оцінювання поперечної стійкості автомобіля. Експериментальні дослідження ББМ “Варта” засвідчили збільшення розбіжностей між розрахунковими та емпіричними значеннями бічного зміщення центру мас за зниження тиску повітря в шинах. Урахування зазначеного чинника забезпечує краще узгодження розрахункових залежностей з експериментальними даними.

За результатами розрахунків для ББМ “Варта”, оснащеної 23-мм автоматичною гарматою 2А14, визначено, що неврахування деформаційних характеристик шин призводить до завищення граничного кута нахилу опорної поверхні, за якого забезпечується стійкість автомобіля до бічного перекидання, на 1,3° або близько 4 %. Отриманий результат

підтверджує необхідність урахування пружних властивостей шин під час оцінювання стійкості бойових машин на поверхнях із бічним ухилом.

Практичне значення вдосконалених показників полягає в можливості їх використання для обґрунтування умов застосування бойових машин, оцінювання впливу характеристик установленого озброєння на поперечну стійкість автомобіля та уточнення розрахункових обмежень щодо його експлуатації. Водночас застосування запропонованого підходу до інших зразків техніки потребує врахування їхніх конструктивних особливостей і деформаційних характеристик ходової частини.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методики експериментального визначення параметрів крену та зміщення центру мас автомобіля з урахуванням деформації підвіски та шин, а також на перевірку точності вдосконалених математичних залежностей для різних типів броньованих колісних машин.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють, що використовували ШІ для перевірки правопису та пошуку ресурсів.

Список використаних джерел

1. Кайдалов Р. О., Біленко О. І., Кудімов С. А. Показники та критерії бойової живучості броньованих колісних машин. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2022. № 2 (40). С. 35–42. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2022/2/40/270529.
2. Кайдалов Р. О., Біленко О. І., Кудімов С. А. Методика забезпечення заданого рівня бойової живучості броньованих колісних машин. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2023. № 1 (41). С. 65–72. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2023/1/41/280883.
3. Bilenko O., Shabatura S. The Condition of the Vehicle's Stability to Overturning on a Surface with a Lateral Slope When Firing from the Weapon. *Честь і закон*. 2024. Т. 4, № 91. С. 22–27. https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324061.
4. Aparow V. R., Hudha K., Megat Ahmad M. H., Abdullah S. Study on the Dynamic Performance of Armored Vehicle in Lateral Direction due to Firing Impact. *Advances in Military Technology*. 2016. Vol. 11, No. 1. P. 3–18.
5. Gillespie T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA : SAE International, 1992. 495 p.
6. Wong J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. 592 p.
7. Pacejka H. B. *Tire and Vehicle Dynamics*. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. 672 p.
8. Abe M. *Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015. 286 p.
9. Clark S. K. (ed.). *Mechanics of Pneumatic Tires*. Washington, D.C. : National Bureau of Standards, 1981. 876 p.
10. Heißing B., Ersoy M. (eds.). *Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. 591 p.
11. Bilenko O., Shabatura S. Condition for Vehicle Rollover Stability on a Lateral Slope During Firing with Account of Suspension and Tire Deformation. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16, No. 2. P. 246–255. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.21.

12. Song X. Development of a Refined Rollover Model That Recognizes the Effects of Suspension and Tire Deformation. Mathematical Problems in Engineering. 2013. Article ID 750896. https://doi.org/10.1155/2013/750896.
13. Guo K., Chen P., Xu N., Yang C., Li F. Tire Side Force Characteristics with the Coupling Effect of Vertical Load and Inflation Pressure. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH. 2019. Vol. 3, No. 1. P. 19–30. https://doi.org/10.4271/10-03-01-0002.
14. Matsubara M., Tajiri D., Horiuchi M., Kawamura S. Evaluation of Spring Properties of Tire Sidewall under Changes in Inflation Pressure. SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems. 2015. https://doi.org/10.4271/2015-01-2193.

References

1. Kaidalov, R. O., Bilenko, O. I., & Kudimov, S. A. (2022). Pokaznyky ta kryterii boiovoi zhyvuchosti bronovanykh kolisnykh mashyn [Indicators and criteria of combat survivability of armored wheeled vehicles]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy, 2(40), 35–42. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2022/2/40/270529
2. Kaidalov, R. O., Bilenko, O. I., & Kudimov, S. A. (2023). Metodyka zabezpechennia zadanoho rivnia boiovoi zhyvuchosti bronovanykh kolisnykh mashyn [Methodology for ensuring a specified level of combat survivability of armored wheeled vehicles]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy, 1(41), 65–72. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2023/1/41/280883
3. Bilenko, O., & Shabatura, S. (2024). The condition of the vehicle's stability to overturning on a surface with a lateral slope when firing from the weapon. Chest i Zakon, 4(91), 22–27. https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324061
4. Aparow, V. R., Hudha, K., Megat Ahmad, M. H., & Abdullah, S. (2016). Study on the dynamic performance of armored vehicle in lateral direction due to firing impact. Advances in Military Technology, 11(1), 3–18.
5. Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of vehicle dynamics. SAE International.
6. Wong, J. Y. (2008). Theory of ground vehicles (4th ed.). John Wiley & Sons.
7. Pacejka, H. B. (2012). Tire and vehicle dynamics (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
8. Abe, M. (2015). Vehicle handling dynamics: Theory and application (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
9. Clark, S. K. (Ed.). (1981). Mechanics of pneumatic tires. National Bureau of Standards.
10. Heißing, B., & Ersoy, M. (Eds.). (2011). Chassis handbook: Fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives. Vieweg+Teubner Verlag.
11. Bilenko, O., & Shabatura, S. (2026). Condition for vehicle rollover stability on a lateral slope during firing with account of suspension and tire deformation. *Social Development and Security*, 16(2), 246–255. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.21
12. Song, X. (2013). Development of a refined rollover model that recognizes the effects of suspension and tire deformation. Mathematical Problems in Engineering, 2013, Article 750896. https://doi.org/10.1155/2013/750896
13. Guo, K., Chen, P., Xu, N., Yang, C., & Li, F. (2019). Tire side force characteristics with the coupling effect of vertical load and inflation pressure. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 3(1), 19–30. https://doi.org/10.4271/10-03-01-0002
14. Matsubara, M., Tajiri, D., Horiuchi, M., & Kawamura, S. (2015). Evaluation of spring properties of tire sidewall under changes in inflation pressure. SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems. https://doi.org/10.4271/2015-01-2193

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.