

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

Condition for Vehicle Rollover Stability on a Lateral Slope during Firing with Account of Suspension and Tire Deformation

Олександр Біленко

доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління логістикою навчально-наукового інституту підготовки керівних кадрів, 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: sergeisabatura@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1107-2088>

Oleksandr Bilenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Logistics Management, Educational and Scientific Institute for Leadership Training, e-mail: bai69@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6007-3330>

Serhii Shabatura

Corresponding author: Postgraduate Doctoral Candidate of the Doctoral and Adjunct Programs, e-mail: sergeisabatura@gmail.com, ORCID ID: <http://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: March 30, 2026 | Revised: April 18, 2026 | Accepted: April 30, 2026

UDC 623.4

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.21>

Мета роботи. Вдосконалення науково-методичного підходу до визначення умови стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї шляхом урахування деформації пружних елементів підвіски та шин, що впливають на положення центру мас і плечі прикладання зовнішніх сил.

Метод дослідження. Методологічну основу становить аналітичний підхід, який поєднує положення теорії динаміки транспортних засобів, елементи внутрішньої балістики та математичне моделювання імпульсних навантажень. Застосовано методи декомпозиції сил і моментів, геометричного аналізу зміщення центру мас, системного підходу до опису взаємодії підресованої та непідресованої мас, а також алгоритмічного моделювання для формалізації умов стійкості.

Результати дослідження. У роботі отримано вдосконалений математичний вираз умови стійкості автомобіля до перекидання, який, на відміну від відомих моделей, враховує зміну геометричних параметрів системи під впливом деформації підвіски та шин. Встановлено залежності для визначення зсуву центру мас і точки прикладання сили віддачі, що дозволяє більш точно оцінювати співвідношення перекидаючих і встановлювальних моментів у реальних умовах експлуатації.

Практична цінність дослідження. Запропонована методика може бути використана для обґрунтування вибору озброєння для бойових машин і безпілотних платформ, оцінювання допустимих умов їх експлуатації на похилих поверхнях, а також у процесі проектування та модернізації шасі з урахуванням вимог до стійкості. Крім того, результати можуть бути застосовані для розроблення рекомендацій щодо режимів стрільби та налаштування параметрів підвіски і тиску в шинах.

Тип статті. Науково-прикладна (методична) стаття.

Purpose. To improve the methodological approach to determining the rollover stability condition of a vehicle on a lateral slope during firing by taking into account the deformation of suspension elements and tires, which affect the position of the center of mass and the lever arms of external forces.

Method. The methodological framework is based on an analytical approach combining the principles of vehicle dynamics, elements of internal ballistics, and mathematical modeling of impulse loads. Methods of force and moment decomposition, geometric analysis of the center of mass displacement, a systems approach to describing the interaction between sprung and unsprung masses, and algorithmic modeling for formalizing stability conditions are applied.

Findings. An improved mathematical expression for the rollover stability condition of a vehicle has been developed. Unlike existing models, it accounts for changes in the system geometry caused by the deformation of suspension components and tires. Dependencies for determining the displacement of the center of mass and the point of application of the recoil force have been established, enabling a more accurate assessment of the ratio between overturning and restoring moments under real operating conditions.

Practical value of the study. The proposed methodology can be used to justify the selection of weapon systems for combat vehicles and unmanned platforms, to assess permissible operating conditions on sloped surfaces, and in the design and modernization of vehicle chassis with regard to stability requirements. In addition, the results can be applied to develop recommendations for firing modes and for adjusting suspension parameters and tire pressure.

Paper type. Scientific and applied (methodological) article.

Ключові слова: бойова машина; стійкість до перекидання; віддача зброї; перекидаючий момент; умова стійкості автомобіля.

Key words: Vehicle; Combat Vehicle; Rollover Stability; Weapon Recoil; Stability Condition; Suspension Deformation; Rollover Moment.

Вступ

Аналіз досвіду військових конфліктів, що відбуваються у світі та на території України у XXI столітті свідчить про суттєву та постійно зростаючу роль бойових машин (БМ) у виконанні

силами безпеки та оборони різноманітних бойових та спеціальних завдань. На даний час на озброєння силових структур нашої держави прийнята значна кількість БМ, серед яких легкі броньовані машини (ЛБМ) та військові самохідні платформи, зокрема наземні безпілотні апарати (Unmanned GroundVehicle (UGV)).

Для виконання відповідних вогневих завдань ЛБМ та UGV оснащуються вогнепальною зброєю – автоматичними гарматами та гранатометами, великокаліберними, єдиними або ручними кулеметами тощо. При цьому спостерігається постійне зростання потужності засобів ураження та, відповідно, сили віддачі зброї по відношенню до маси ЛБМ, що негативно відбивається на стійкості до перекидання останніх, особливо під час стрільби на похилих опорних поверхнях (косогорах).

Стосовно UGV дана проблема є ще більш значною, що обумовлюється їх меншими масо-габаритними характеристиками у порівнянні з ЛБМ [1]. В результаті відношення стабілізуючого моменту (який є пропорційним масі машини та розміру колії) до перекидаючого моменту, що створюється силою віддачі є меншим, ніж у класичних ЛБМ. Відповідно стійкість до перекидання UGV при веденні вогню на похилих опорних поверхнях є також нижчою.

Таким чином, існує необхідність врахування сили віддачі вогнепальної зброї під час проектування БМ, а також під час прийняття рішення щодо встановлення певного зразка зброї на відповідну платформу.

Огляд літератури

Питання стійкості автомобілів можна вважати достатньо дослідженим. Авторами роботи [2] розглядаються фундаментальні принципи динаміки автомобіля, включаючи процеси розгону, гальмування, керованості та стійкості руху. Значну увагу приділено впливу конструктивних параметрів, характеристик підвіски, шин і розподілу маси на динамічну поведінку транспортного засобу, а також умовам виникнення перекидання.

У роботі [3] досліджуються питання динаміки та стійкості транспортних засобів з акцентом на поперечну стійкість, керованість і вплив сил та моментів, що діють на автомобіль під час руху. Розглянуто процеси виникнення крену, вплив підвіски, шин і навантажень на стійкість, а також поведінку транспортного засобу в граничних режимах руху.

У дослідженні [4] розглянуто питання динаміки руху військових транспортних засобів на складних опорних поверхнях, зокрема на схилах та пересіченій місцевості, аналізуються умови втрати стійкості машин, вплив геометричних параметрів конструкції на ймовірність перекидання, а також методи підвищення прохідності та безпеки експлуатації військових машин.

У праці [5] викладено основи взаємодії транспортного засобу з опорною поверхнею. Розглядаються питання прохідності, стійкості та маневреності машин, вплив властивостей ґрунту, навантажень і геометричних параметрів на рух та втрату стійкості транспортного засобу в складних умовах експлуатації.

У роботі [6] розглянуто основні показники стійкості транспортних засобів та чинники, що впливають на їх поперечну та поздовжню стійкість, а також методи їх оцінювання.

Автори роботи [7] приділяють увагу дослідженню динаміки руху автомобілів, процесам втрати стійкості під час руху пересіченою місцевістю та впливу експлуатаційних факторів на стійкість транспортних засобів. Також визначено основні критерії оцінювання поперечної стійкості та розглянуто умови перекидання автомобіля під дією зовнішніх сил.

У фундаментальному дослідженні [8] зокрема аналізується вплив конструктивних параметрів транспортного засобу, зокрема висоти центра мас, ширини колії та маси машини, на показники її стійкості під час руху по косогору.

Значну увагу останнім часом приділяється вивченню роботизованих наземних платформ, аналізу їхньої динаміки та стійкості під час руху пересіченою місцевістю та виконання бойових

завдань. Зокрема, у статті [9] автори акцентують увагу на питаннях динаміки та стабільності UGV під час руху по складній місцевості, аналізі впливу конструктивних параметрів платформи, розташування центра мас та параметрів підвіски на показники стійкості машини під час виконання маневрів та руху по нерівних опорних поверхнях.

Автори статті [10] досліджують питання стабільності й керованості UGV, а також ступінь впливу конструктивних параметрів шасі на загальну стійкість платформи у складних умовах експлуатації.

У роботі [11] розглядається задача забезпечення стійкості мобільного робота під час руху на похилих поверхнях. Проведено аналіз умов втрати стійкості, впливу кутів нахилу, параметрів руху та керування на динаміку системи, а також запропоновано методи керування, спрямовані на запобігання перекиданню.

У статті [12] розроблено методику забезпечення заданого рівня бойової живучості БКМ, яка дозволяє шляхом послідовного покращення експлуатаційних характеристик автомобіля, зокрема стійкості, отримати такі показники бойової живучості які відповідають заданому рівню бойової живучості

Аналіз наявних наукових джерел свідчить, що більшість досліджень присвячена загальним питанням стійкості транспортних засобів. При цьому питання забезпечення стійкості БМ з урахуванням впливу сили віддачі стрілецького або гарматного озброєння під час ведення вогню на поверхнях з бічним ухилом у науковій літературі досліджені недостатньо.

Найбільш близькою до змісту досліджуваного питання є робота [1]. У зазначеній статті розглядається питання оцінювання стійкості автомобіля на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї. Але отримані у даній роботі результати є справедливими для БМ з жорсткою підвіскою, що є властивою лише для UGV, отже мають обмежену придатність.

Таким чином, існує проблемна ситуація, яка полягає у протиріччі між необхідністю визначення умови стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом в момент ведення вогню зі зброї з урахуванням деформації пружних елементів підвіски та відсутністю відповідних напрацювань.

Мета статті – визначення умови стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом в момент ведення вогню зі зброї з урахуванням деформації підвіски та шин.

Методологія

Методологічною основою дослідження є поєднання аналітичного, системного та розрахунково-моделювального підходів, спрямованих на формалізацію умов стійкості бойової машини до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі стрілецької зброї. Вихідним положенням є класичні положення динаміки транспортних засобів і теорії взаємодії колісної машини з опорною поверхнею, які доповнені урахуванням імпульсного впливу сили віддачі та деформацій пружних елементів підвіски і шин.

На першому етапі застосовано метод теоретичного аналізу, що передбачає узагальнення існуючих математичних моделей стійкості транспортних засобів та виявлення їх обмежень у контексті бойового застосування. Зокрема встановлено, що наявні підходи не враховують зміну геометрії системи “шасі–підвіска–опорна поверхня” під впливом деформацій, що призводить до систематичного завищення критичних умов стійкості.

Другий етап базується на методах аналітичного моделювання, у межах яких сформовано математичний опис сил і моментів, що діють на транспортний засіб. Використано декомпозицію сил тяжіння та віддачі зброї на складові, які формують перекидаючі та встановлювальні моменти. Для урахування впливу деформації підвіски та шин введено параметри зсуву центру мас і точки прикладання сили віддачі (Δh_g , ΔB_G , Δh_v , ΔB_F), що визначаються через геометричні співвідношення та кути крену. Такий підхід дозволяє перейти від статичної до квазидинамічної моделі стійкості.

На третьому етапі застосовано системний підхід, відповідно до якого транспортний засіб розглядається як багатокомпонентна механічна система, де взаємодіють підресорена та непідресорена маси, пружні елементи підвіски та шини. Це дало змогу врахувати сумарний ефект деформацій різних елементів та їх вплив на положення центру мас і плечі прикладання сил.

Четвертий етап передбачає використання алгоритмічного моделювання, що полягає у формалізації отриманих залежностей у вигляді послідовності розрахункових процедур для визначення умов стійкості. Це забезпечує можливість практичного застосування розробленої методики для різних типів бойових платформ за заданих параметрів.

Водночас дослідження має низку обмежень: модель ґрунтується на припущенні квазістатичного характеру процесу стрільби та не враховує складних динамічних ефектів (вібрації, резонансні явища, змінний контакт з опорною поверхнею). Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію моделі та розширення її на випадки повністю динамічного навантаження.

Результати

В роботі [1] наводиться математичний вираз (1), що визначає умову стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї з відповідною ілюстрацією (рис. 1) [1]:

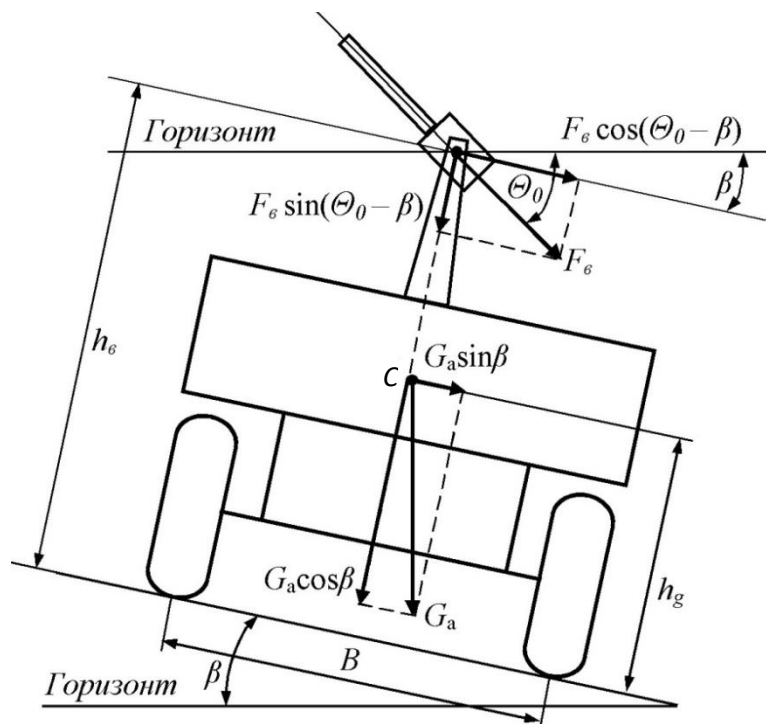


Рисунок 1: Схема сил та моментів, які діють на центр мас автомобіля, що розташований на поверхні з бічним ухилом в момент ведення вогню зі зброї

Джерело: розроблено автором

$$h_g G_a \sin \beta + h_g F_g \cos(\Theta_0 - \beta) = \frac{B}{2} (G_a \cos \beta + F_g \sin(\Theta_0 - \beta)), \quad (1)$$

- де h_g – відстань від опорної поверхні до центру мас автомобіля;
 G_a – сила тяжіння, що діє на автомобіль в центрі його мас;
 β – кут ухилу опорної поверхні (косогору);

h_{θ}	–	відстань від опорної поверхні до точки прикладання сили віддачі зброї;
F_{θ}	–	сила віддачі зброї;
θ_0	–	кут підвищення ствола;
B	–	колія автомобіля;
C	–	центр мас автомобіля;
$G_a \sin \beta$	–	складова сили тяжіння, що утворює перекидаючий момент;
$G_a \cos \beta$	–	складова сили тяжіння, що утворює встановлювальний момент;
$F_{\theta} \sin(\theta_0 - \beta)$	–	складова сили віддачі, що утворює встановлювальний момент;
$F_{\theta} \cos(\theta_0 - \beta)$	–	складова сили віддачі, що утворює перекидаючий момент.

Вказана умова стійкості розроблена для безпілотних платформ та не враховує впливу на стійкість автомобіля кутів крену, які зумовлені деформацією пружних елементів підвіски та шин. Використання виразу (1) для бойових машин, які мають підвіску та можуть мати різний тиск у шинах (в залежності від особливостей ґрунту) дає завищене значення допустимого кута ухилу опорної поверхні, що може приводити до перекидання машин.

Для вдосконалення виразу (1) шляхом урахування деформації підвіски та шин спочатку розглянемо схему утворення кута крену автомобіля $\psi_{кр}$, який зумовлений деформацією пружних елементів підвіски (рис. 2).

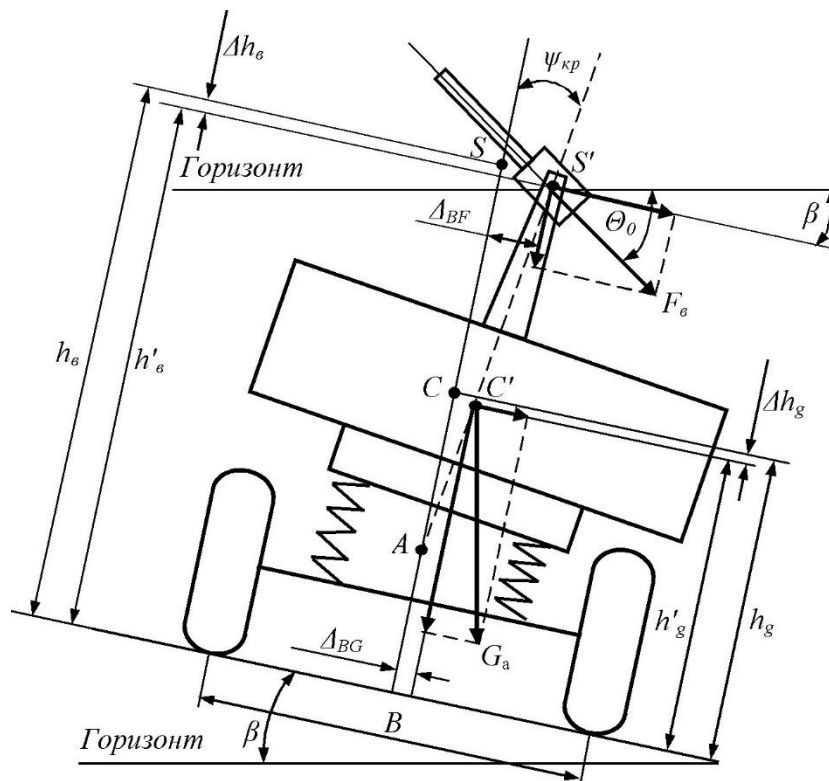


Рисунок 2: Схема утворення кута крену автомобіля, який розташований на поверхні з бічним ухилом в момент ведення вогню зі зброї, що зумовлений деформацією пружних елементів підвіски

Джерело: розроблено автором

Очевидно, що внаслідок деформації пружних елементів підвіски кут крену автомобіля не дорівнюватиме куту ухилу β , а буде більшим за нього. При цьому положення центру мас автомобіля зміститься з точки C у точку C' , а положення точки прикладання сили віддачі зброї

з точки S у точку S' . Зазначені точки зміщуються на величини Δh_g і Δh_b по висоті та Δ_{BG} і Δ_{BF} по боковому напрямку відповідно. Наслідком зсуву точок прикладання сил є зміна відповідних перекидаючих та встановлювальних моментів.

Складова сили віддачі $F_b \cos(\theta_0 - \beta)$ буде діяти відносно поверхні дороги не на плечі h_b , а на плечі h'_b , що відповідає висоті розташування ствола зброї з урахуванням деформації підвіски. В результаті утворюється перекидаючий момент $h'_b F_b \cos(\theta_0 - \beta) = (h_b - \Delta h_b) F_b \cos(\theta_0 - \beta)$. Складова $F_b \sin(\theta_0 - \beta)$ буде діяти на плечі, що дорівнює не половині колії автомобіля B , а на плечі $(B/2 - \Delta_{BF})$ та утворює встановлювальний момент $(B/2 - \Delta_{BF}) F_b \sin(\theta_0 - \beta)$. Аналогічно сила тяжіння створює перекидаючий момент $h'_g G_a \sin \beta = (h_g - \Delta h_g) G_a \sin \beta$ та встановлювальний момент $(B/2 - \Delta_{BG}) G_a \cos \beta$.

У такому випадку вираз (1) ускладнюється та приймає вигляд (2):

$$(h_g - \Delta h_g) G_a \sin \beta + (h_b - \Delta h_b) F_b \cos(\theta_0 - \beta) = \left(\frac{B}{2} - \Delta_{BG}\right) G_a \cos \beta + \left(\frac{B}{2} - \Delta_{BF}\right) F_b \sin(\theta_0 - \beta). \quad (2)$$

Для розрахунку значень Δh_g та Δ_{BG} розглянемо рис. 3, на якому: A – точка обертання підресореної частини автомобіля внаслідок деформації пружних елементів підвіски C_0 – положення центру мас автомобіля, який стоїть на горизонтальній поверхні; C – положення центру мас автомобіля, який стоїть на похилій поверхні (косогорі) з кутом нахилу β без врахування деформації пружної підвіски; C' – положення центру мас автомобіля, який стоїть на похилій поверхні з кутом нахилу β та з врахуванням деформації підвіски; $\psi_{кр}$ – кут крену, що зумовлений деформацією підвіски на косогорі; довжини відрізків CD та $C'D$ дорівнюють шуканим значенням Δh_g та Δ_{BG} відповідно.

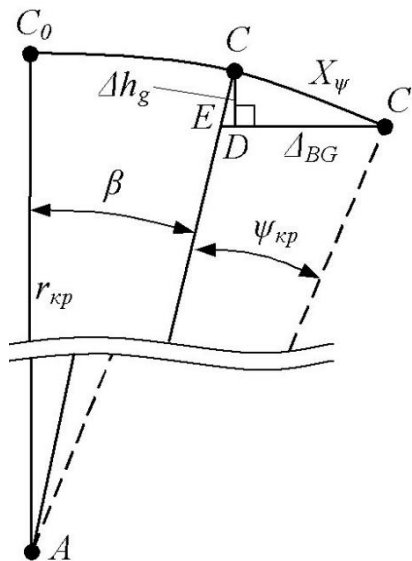


Рисунок 3: Схема утворення кута крену та зсуву центру мас автомобіля, що зумовлені деформацією пружних елементів підвіски

Джерело: розроблено автором

Довжина відрізка CC' дорівнює довжині відповідної хорди X_ψ [13]:

$$CC' = X_\psi = 2r_{кр} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right). \quad (3)$$

Очевидно, що кут трикутника ECD при вершині C дорівнює β , а кути рівнобедреного трикутника ACC' при вершинах C та C' є рівними $(180^\circ - \psi_{кр})/2$. Отже, кут трикутника DCC' при вершині C дорівнює $(180^\circ - \psi_{кр})/2 - \beta$. З прямокутного трикутника DCC' знайдемо довжини сторін DC та DC' , які відповідно дорівнюють величинам Δh_g та Δ_{BG} .

$$\Delta h_g = X_\psi \cos\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) = 2r_{кр} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right), \quad (4)$$

$$\Delta_{BG} = X_\psi \sin\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) = 2r_{кр} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right). \quad (5)$$

Значення Δh_g та Δ_{BG} розраховуються аналогічно, але замість $r_{кр}$ слід використати $r_{крв}$ – відстань від точки обертання кузова до точки прикладання сили віддачі зброї:

$$\Delta h_g = 2r_{крв} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right), \quad (6)$$

$$\Delta_{BG} = 2r_{крв} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right). \quad (7)$$

Подібна ситуація спостерігається при деформації шин, яка призводить до збільшення кута крену автомобіля, тому розрахунок відповідних складових Δh_g , Δ_{BG} , Δh_v та Δ_{BF} здійснюється аналогічно. Але замість радіусів $r_{кр}$ та $r_{крв}$ слід використовувати радіуси, що виходять з точки одночасного обертання не підресореної та підресореної частин внаслідок деформації шин, а саме $r_{крш}$ – відстань від точки обертання до центру мас автомобіля та $r_{кршв}$ – відстань від точки обертання до точки прикладання сили віддачі зброї. Також, замість кута $\psi_{кр}$ враховується кут $\psi_{крш}$, який відповідає одночасному крену не підресореної та підресореної частин внаслідок деформації шин. Таким чином, отримуються формули (8) – (11), які одночасно враховують вплив деформацій підвіски та шин:

$$\Delta h_g = 2 \left[r_{кр} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) + r_{крш} \sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{крш}}{2} - \beta\right) \right], \quad (8)$$

$$\Delta_{BG} = 2 \left[r_{кр} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) + r_{крш} \sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{крш}}{2} - \beta\right) \right], \quad (9)$$

$$\Delta h_v = 2 \left[r_{крв} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) + r_{кршв} \sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi - \psi_{крш}}{2} - \beta\right) \right], \quad (10)$$

$$\Delta_{BF} = 2 \left[r_{крв} \sin\left(\frac{\psi_{кр}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{кр}}{2} - \beta\right) + r_{кршв} \sin\left(\frac{\psi_{крш}}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi - \psi_{крш}}{2} - \beta\right) \right]. \quad (11)$$

Необхідні значення $r_{кр}$, $r_{крв}$, $r_{крш}$, та $r_{кршв}$ можна розрахувати на основі даних про радіальну жорсткість підвіски та колеса, а також конструктивних особливостей підвіски та основних геометричних розмірів її елементів відомими методами [6, 7, 14]

Таким чином, отримано вдосконалений математичний вираз (2), що визначає умову стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї у сукупності з формули (8) – (11) для обчислення параметрів запропонованої умови стійкості автомобіля. На відміну від відомих вираз враховує дію сили віддачі зброї та утворювані нею перекидаючий та встановлювальний моменти з урахуванням деформації підвіски та шин.

Але, на практиці у війська поступає велика кількість зразків бойових машин та безпілотних систем, для яких параметри жорсткості підвіски та коліс, а також конструктивні особливості підвіски та основні геометричні розміри її елементів не відомі. Отримати їх можливо шляхом вимірювання з використанням реальних зразках техніки.

У такому випадку представляється доцільним розроблення методики експериментального визначення чисельних значень величин Δh_g , Δ_{BG} , Δh_v та Δ_{BF} , що є напрямком подальшого дослідження. Використання емпіричних методів дослідження

дозволить безпосередньо та одночасно отримати інформацію як про зсув центру мас під впливом нахилу опорної поверхні та деформації елементів підвіски та коліс, так і про кути крену автомобіля в функції від ухилу поверхні та жорсткості підвіски та коліс. Зокрема, представляється можливість отримати залежність кута крену від тиску в шинах, що для військової техніки є особливо важливим, бо зниження тиску в шинах активно використовується для підвищення прохідності автомобільної техніки.

Обговорення

Отримані результати дозволяють уточнити існуючі уявлення про умови стійкості бойових машин до перекидання в умовах ведення вогню на похилих поверхнях. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель враховує не лише геометричні параметри та дію сили віддачі, але й деформаційні процеси у підвісці та шинах, що істотно змінюють положення центру мас і плечі прикладання сил. Це дозволяє пояснити розбіжності між розрахунковими та фактичними випадками втрати стійкості, які спостерігаються під час експлуатації бойових платформ.

Водночас слід критично оцінити припущення, покладені в основу дослідження. Зокрема, використання квазістатичного підходу обмежує можливість врахування динамічних ефектів, таких як коливання підресореної маси, імпульсні перевантаження при чергах пострілів та нерівномірність контакту коліс з опорною поверхнею. Це може призводити до недооцінки ризику перекидання в реальних умовах бойового застосування. Крім того, параметри жорсткості підвіски та шин у практичних умовах часто є невідомими або змінними, що знижує точність аналітичних розрахунків.

Порівняння з відомими дослідженнями у галузі динаміки транспортних засобів свідчить, що запропонований підхід розширює класичні моделі, однак потребує подальшої верифікації із застосуванням чисельного моделювання та експериментальних методів. Зокрема, перспективним є використання багатотілових динамічних моделей і сенсорних вимірювань для визначення фактичних кутів крену та переміщення центру мас.

Таким чином, запропонована методика є теоретично обґрунтованою та практично значущою, однак її застосування потребує уточнення вхідних параметрів і розширення на випадки динамічного навантаження. Це відкриває напрямки подальших досліджень, пов'язаних із інтеграцією аналітичних та експериментальних підходів.

Висновки

Вдосконалено математичний вираз, що визначає умову стійкості автомобіля до перекидання на поверхні з бічним ухилом під час ведення вогню зі зброї. На відміну від відомих вираз враховує дію сили віддачі зброї та утворювані нею перекидаючий та встановлювальний моменти з урахуванням деформації підвіски та шин.

Запропоновано формули для обчислення параметрів зсуву центру мас автомобіля під впливом деформації пружних елементів підвіски та шин.

Напрямок подальшого дослідження є розроблення методики експериментального визначення чисельних значень параметрів зсуву центру мас автомобіля під впливом деформації пружних елементів підвіски та шин.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. 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 // *Honor and Law*. 2024. Vol. 4, No. 91. P. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324061>.
2. Gillespie T. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale : SAE International, 1992. DOI: <https://doi.org/10.4271/R-114>.
3. Milliken W. F., Milliken D. L. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale : SAE International, 1995. URL: <https://www.sae.org/books/race-car-vehicle-dynamics-r-146/> (дата звернення: 14.03.2026).
4. Wong J. Y. *Terramechanics and off-road vehicle engineering*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8561-0.00014-X>.
5. Bekker M. G. *Introduction to terrain-vehicle systems*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1969. URL: https://books.google.com.ua/books?id=Q5dTAAAMAAJ&redir_esc=y (дата звернення: 15.03.2026).
6. Говорущенко М. Я., Туренко А. М. *Експлуатаційні властивості автомобілів*. Харків : ХНАДУ. URL: <https://af.khadi.kharkov.ua/chairs/inzhiniringu-sistem-avtomobilnogo-transportu-im-govorushchenka-mja/navchalna-robota/> (дата звернення: 06.03.2026).
7. Волков В. П. *Теорія експлуатаційних властивостей автомобілів*. Харків : ХНАДУ. URL: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=U84wC8MAAAJ&hl=uk> (дата звернення: 12.03.2026).
8. Wong J. Y. *Theory of ground vehicles*. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470381021>.
9. Reina G., Paiano M., Blanco-Claraco J. Vehicle dynamics modelling and stability analysis for unmanned ground vehicles // *Journal of Field Robotics*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21927>.
10. Gonzalez R., Rodriguez F., Garcia J. Stability analysis of unmanned ground vehicles on uneven terrain // *Robotics and Autonomous Systems*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.03.003>.
11. Shojaei K., Shahriari M. Stability analysis and control of a mobile robot on sloped terrain // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/56833>.
12. 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. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2022/2/40/270529>.
13. Корн Г., Корн Т. *Довідник з математики для наукових працівників та інженерів* : пер. з англ. Київ : Техніка, 1984. 832 с.
14. Сахно В. П., Поляков В. М., Костенко А. В. та ін. *Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів*. У 3 ч. Ч. 3 : Маневреність. Керованість. Стійкість. Донецьк : ЛАНДОН-XXI, 2015. 400 с.

References

1. 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. *Honor and Law*, 4(91), 22–27. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324061>
2. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-114>
3. Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race car vehicle dynamics*. SAE International. <https://www.sae.org/books/race-car-vehicle-dynamics-r-146/>
4. Wong, J. Y. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8561-0.00014-X>

5. Bekker, M. G. (1969). *Introduction to terrain-vehicle systems*. University of Michigan Press. <https://books.google.com.ua/books?id=Q5dTAAAMAAJ>
6. Hovorushchenko, M. Ya., & Turenko, A. M. (n.d.). *Ekspluatatsiini vlastyvosti avtomobiliv*. Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://af.khadi.kharkov.ua/chairs/inzhiniringu-sistem-avtomobilnogo-transportu-im-govorushchenka-mja/navchalna-robota/>
7. Volkov, V. P. (n.d.). *Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobiliv*. Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=U84wC8MAAAAJ&hl=uk>
8. Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470381021>
9. Reina, G., Paiano, M., & Blanco-Claraco, J. (2020). Vehicle dynamics modelling and stability analysis for unmanned ground vehicles. *Journal of Field Robotics*. <https://doi.org/10.1002/rob.21927>
10. Gonzalez, R., Rodriguez, F., & Garcia, J. (2021). Stability analysis of unmanned ground vehicles on uneven terrain. *Robotics and Autonomous Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.03.003>
11. Shojaei, K., & Shahriari, M. (2013). Stability analysis and control of a mobile robot on sloped terrain. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. <https://doi.org/10.5772/56833>
12. Kaidalov, R. O., Bilenko, O. I., & Kudimov, S. A. (2022). Pokaznyky ta kryterii boiovoi zhyvuchosti bronovanykh kolisnykh mashyn. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy*, 2(40), 35–40. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2022/2/40/270529>
13. Korn, G., & Korn, T. (1984). *Dovidnyk z matematyky dlia naukovykh pratsivnykiv ta inzheneriv* (Trans. from English). Tekhnika.
14. Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Kostenko, A. V., et al. (2015). *Ekspluatatsiini vlastyvosti avtotransportnykh zasobiv* (Vols. 1–3, Part 3: Manevrenist. Kerovanist. Stiikist). LANDON-XXI.



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