

Методи визначення допустимого ухилу місцевості для безпечної експлуатації спеціалізованої техніки під дією нестационарного навантаження

О.С. Мачуга¹ • М.М. Борис¹ • Ю.Р. Луста¹

Received: 27 May 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. Експлуатація сучасного високотехнологічного обладнання потребує чіткого окреслення безпечних умов для його роботи. У значній мірі це стосується машин, які переміщуються і працюють на необробленій ґрунтовій поверхні: лісова техніка, сільськогосподарська техніка, дорожньо-будівельні машини, військова техніка тощо. Асиметричність розташування робочих органів, робота на поверхнях з боковим ухилом, нестационарна взаємодія з робочим середовищем – ось чинники, які посилюють експлуатаційні ризики.

Мета даного дослідження полягає у встановленні меж безпечної експлуатації спеціалізованих машин, що працюють на необробленій поверхні, що має ухил до горизонту.

В роботі розглянено методи визначення безпечних ухилів для окресленої вище техніки в умовах її нестационарної взаємодії з предметом праці. Зокрема визначаються небезпечні ухили місцевості, які можуть спричинити перекидання машини чи бокового скокування. Реалізація поставленої мети досягається шляхом будівництва математичної моделі та відповідних розрахункових схем, які охоплюють обидві можливості втрати стійкості. Збудовано графіки для відображення граничних ухилів з огляду перекидання та скокування машини на ухилі для заданих експлуатаційних навантажень. Інтегральна характеристика граничного значення ухилу охоплює обидва вказаних вище ризиків.

Застосування запропонованих методів проілюстровано розрахунком безпечного ухилу для ведення вогню танками для різних кутів відхилення гармати від поверхні руху на ухилі та від типу ґрунтової поверхні руху. Отримано наступні результати: розроблено методи розрахунку допустимих ухилів для можливості експлуатації на них спеціалізованих машин із урахуванням ґрунтових умов, а також продемонстровано застосування підходу для випадку військової техніки.

Використання вказаних результатів є необхідним чинником для впровадження у проектування технологічних процесів для спеціалізованих машин з огляду на мінімізацію експлуатаційних ризиків.

Ключові слова: технологічні ризики, безпечна експлуатація машин, небезпечні ухили місцевості, ведення вогню танками.

Вступ

Спеціалізована техніка, яка виконує технологічні операції під час руху по необробленій негоризонтальній ґрунтовій поверхні, зазнає силового впливу як від опорної поверхні, так і зі сторони робочого органу. Такий вплив зазвичай є нестационарним, нерідко – імпульсним, що зумовлюється стохастичними неоднорідностями макро- і мікропрофілю поверхні руху, а також експлуатаційними режимами робочих органів, що

динамічно взаємодіють з робочим середовищем. Вказані експлуатаційні умови можуть спричинити аварії машини через поперечну втрату стійкості, аж до перекидання чи критичного скокування.

Наявні підходи до визначення безпечних експлуатаційних умов зазвичай базуються на теоретичних методах статистики та експериментальних методах [1], що не дає змоги прогнозувати увесь спектр безпечних умов експлуатації. Тому розвиток методів визначення допустимого ухилу місцевості для безпечної експлуатації техніки під дією нестационарного навантаження є вагомим та актуальною проблемою.

Застосування таких методів є доцільним для спеціалізованої техніки з асиметрично, відносно напрямку руху, розташованим робочим органом в умовах негоризонтальної необробленої поверхні руху. Зокрема це машини лісового господарства, такі як харвестери чи

✉ O.S. Machuga
oleg_mach@ukr.net

¹ Національний лісотехнічний університет України,
Львів, Україна

форвадери [2]; дорожньо-будівельні машини [3]; машини сільськогосподарського призначення [4]; військова техніка – танки [5] тощо. Для окреслених типів машин розроблено методи визначення меж стійкості на ухилі [6–8], визначено особливості експлуатаційних випробувань [9]. Однак такі дослідження базуються в основному на застосуванні методів статички. Розширення досліджень для реальних умов нестационарної взаємодії є можливим, зокрема, шляхом запровадження інерційних чи імпульсних додатків у відповідні рівняння математичної моделі, як це застосовано, наприклад, в [10, 11]. Стійкість спеціалізованої машини на ухилі характеризується двома різними аспектами. Втрата стійкості можлива внаслідок або перекидання, або зсуву машини ухилом унаслідок динамічної втрати зчеплення рушія з ґрунтом. Тому в даній роботі для окреслення безпечних експлуатаційних умов інтегрально використовуються результати двох методів. Можливе розв'язання й оберненої задачі, а саме – формування розширених науково-методичних підходів до обґрунтування енергоощадних та еколого-безпечних параметрів лісових машин [12] для заданих експлуатаційних умов, зокрема – ухилів місцевості, для яких проєктуються такі машини.

Постановка задачі та основні відношення

Розглядатимемо модельну задачу для спеціалізованої машини, яка виконує роботу території з боковим,

у відношенні до напрямку руху, ухилом. Для ілюстрування постановки задачі обрано ковшовой екскаватор (рис. 1).

На рис. 1 застосовано наступні позначення: xOz – система координат, пов'язана з горизонтальною поверхнею та нормаллю до неї; $x'Oz'$ – система координат, утворена повертанням системи xOz на кут α проти годинникової стрілки, α – кут ухилу поверхні руху; C – центр мас машини з урахуванням асиметрично розташованого робочого органу з корисним навантаженням; z_c – відстань між центром мас машини та поверхнею руху; $G = mg$ – вага машини, направлена вертикально вниз, m – маса машини, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; l – точка контакту нижнього рушія з поверхнею руху, – для подальших розрахунків можемо вважати, що ця точка співпадає із зовнішнім габаритом машини за слідом рушія, b – ширина машини за зовнішнім габаритом за слідом рушія; γ – кут між напрямком дії сили ваги G та нормаллю до поверхні руху в точці l .

Схема, подана на рис. 1, відповідає статичному положенню машини на ухилі та може слугувати для визначення меж експлуатаційної стійкості за стаціонарної взаємодії робочого органу машини з предметом оброблення. Очевидною умовою стійкості машини до перекидання є такі значення кута ухилу поверхні руху α , за яких кут γ буде більшим за нуль. Зазвичай в таких умовах втрата стійкості через перекидання може відбуватись за значних ухилів ($\alpha \pm 50^\circ$), що зазвичай є поза межею експлуатації машини.

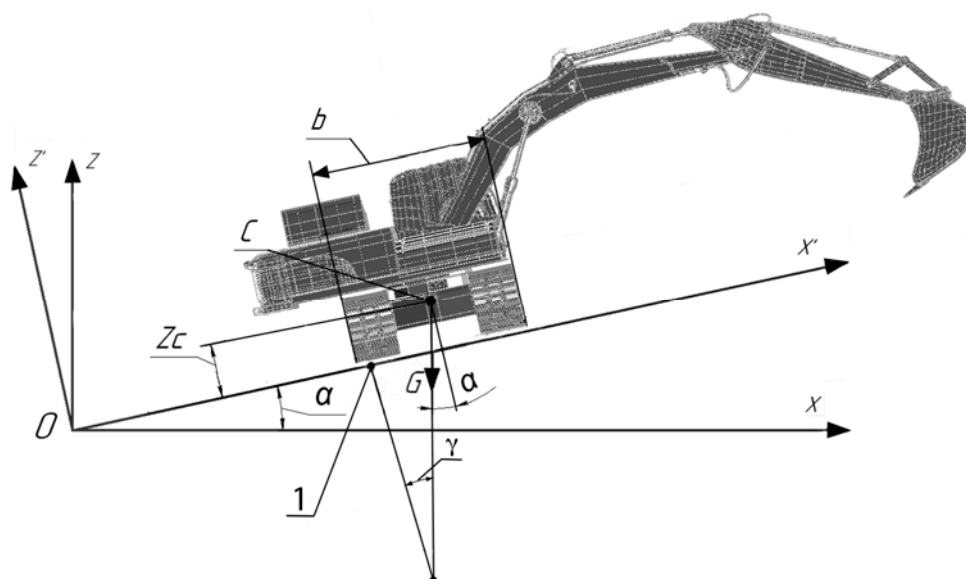


Рис. 1. Схема розташування екскаватора на ухилі

Втрата стійкості внаслідок бокового сковзання відбувається у випадку перевищення дотичними напруженнями, що виникають від дії рушія (гусениці) на поверхню руху, рівня тримної здатності (опірності) ґрунту до зсуву.

Стійкість до перекидання. У випадку нестаціонарної взаємодії робочого органу – ковша екскаватора з зовнішнім чинником (перешкодою, корисним навантаженням тощо) – баланс сил може істотним чином змінитись стосовно даної на рис. 1 схеми. Для такого випадку необхідно розглядати динамічне навантаження на робочий орган, яке пропонуємо охарактеризувати імпульсом I :

$$I = Fi \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де Fi – сила імпульсу, Δt – час дії сили Fi на розглядувану машину. Схему навантаження екскаватора на ухилі з урахуванням сили Fi та опорних реакцій подано на рис. 2.

На рис. 2 застосовано наступні позначення: R_1, R_2 – нормальні реакції опорної поверхні відповідних рушіїв;

T_1, T_2 – відповідні дотичні реакції; β – кут між поверхнею руху та напрямком сили дії імпульса Fi ; M – умовна точка прикладання імпульса (momentum); l_m – довжина асиметрично розташованого робочого органу; z_m – відстань від поверхні руху до точки M .

Геометрична інтерпретація втрати стійкості внаслідок перекидання машини полягає в тому, що критичний стан досягається за такої сили Fi , коли геометрична сума G' сил G та Fi проходить через точку I (див. рис. 3), або лівіше від неї. У такому випадку реакція R_2 буде рівна нулю.

Охарактеризована вище геометрична інтерпретація щодо втрати стійкості не зовсім зручна для будівництва математичної постановки розглядуваної задачі. Визначення напрямку сили G' потребує складних геометричних будовань. Вважаємо за доцільне використовувати в подальшому систему рівнянь силового балансу плоскої системи сил для розглядуваної постановки задачі. Використовуючи схему на рис. 2, отримаємо наступні вирази:

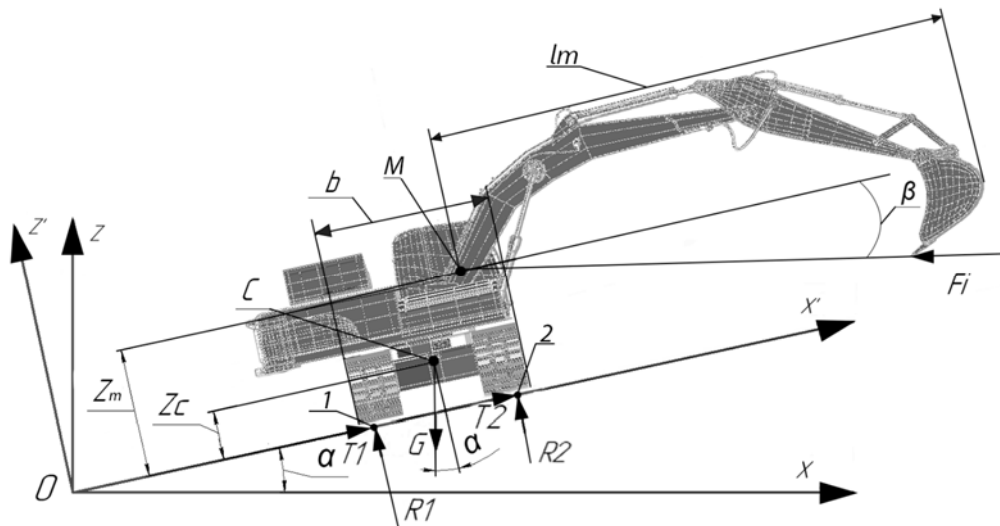


Рис. 2. Зовнішні сили й опорні реакції, що діють на екскаватор на ухилі

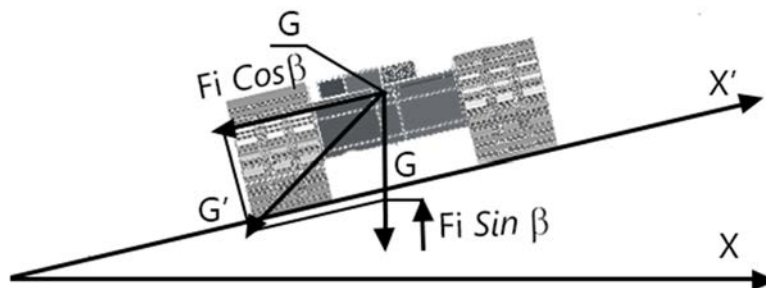


Рис. 3. Баланс сил під час дії сили імпульсу Fi

$$\begin{aligned} \sum_i F_{Ox'}^i &= T_1 + T_2 - G \sin \alpha - F_i \cos \beta = 0, \\ \sum_i F_{Oz'}^i &= R_1 + R_2 - G \cos \alpha + F_i \sin \beta = 0, \\ \sum_i \text{mom}_i(M) &= -R_1 \cdot b + G \cos \alpha \cdot \frac{b}{2} - G \sin \alpha \times \\ &\times (z_M - z_C) + (T_1 + T_2) \cdot z_M = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Зазначимо, що третє рівняння в (2) з метою спрощення отримане з несуттєвим припущенням, що точка M знаходиться на осі дії реакції 2. Однак в кожному конкретному випадку можемо будувати вказане рівняння з фактичними геометричними та силовими характеристиками машини без використання такого припущення.

Для розв'язування системи рівнянь (2) припустимо, що внаслідок однорідності ґрунтової основи руху дотичні реакції T_1 та T_2 рівні між собою. Окрім того, для спрощення перетворень вважатимемо, що в критичному з огляду на перекидання стані, рушій з індексом 2 відривається від землі тобто $R_2 = 0$. Тоді перше з системи рівнянь (2) слугує для визначення дотичних реакцій, а друге і третє – для визначення реакції R_1 та кута α^* для критичного ухилу з огляду на можливе перекидання машини. Такий розв'язок системи рівнянь (2) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} T_1 + T_2 &= G \sin \alpha + F_i \cos \beta, \\ R_1 &= -R_2 + G \cos \alpha - F_i \sin \beta, \\ \cos \alpha^* - \sin \alpha^* \frac{2z_C}{b} &= \frac{2F_i}{G} \left(\sin \beta + \frac{z_M}{b} \cos \beta \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Зазначимо, що перших два рівняння в (3) справедливі для загального випадку кута ухилу поверхні руху α , а третє справедливе лише для граничного значення ухилу α^* , за якого $R_2 = 0$, – машина перекидається.

Визначення кута α^* за третьою формулою з (3) можливе за допомогою числового методу, або графічним чином в кожному конкретному випадку діючої сили імпульса F_i й кута відхилення цієї сили від поверхні руху β . Це буде проілюстровано в подальших викладках.

Із аналізу отриманого результату (3) відзначимо, що величина критичного ухилу α^* залежить лише від вагових характеристик машини та навантаження, а також геометричних характеристик об'єкту дослідження та не залежить від фізико-механічних характеристик ґрунту.

Стійкість до бокового сковзання

Взаємодія рушійної машини з ґрунтовою поверхнею на ухилі характеризується величиною дотичних реакцій ґрунту T_1 , T_2 (див. рис. 2), розміром контактної площадки обох гусениць із ґрунтом S_K та здатністю опору ґрунту до зсуву, тобто тримною (несучою) здатністю ґрунту τ_s [13].

Вважатимемо, що втрата стійкості через бокове сковзання настає тоді, коли дотичні напруження, викликані контактом машини, що знаходиться на ухилі, з ґрунтом під час її взаємодії із зовнішнім об'єктом

$$\tau = \frac{T_1 + T_2}{S_K} \quad (4)$$

перевищують тримну здатність ґрунту, яка у відповідності до [13] визначається наступним відношенням:

$$\tau_s = c + \sigma \cdot \text{tg} \varphi, \quad (5)$$

де c – зчеплення частинок ґрунту, φ – кут внутрішнього тертя, $\sigma \approx \frac{R_1 + R_2}{S_K}$ – середнє значення нормальних напружень під гусеничними рушіями машини.

Сформульовану вище умову стійкості запишемо наступним чином:

$$\tau \leq \tau_s, \quad (6)$$

а з урахуванням виразів (4) та (5):

$$\frac{T_1 + T_2}{S_K} \leq c + \frac{R_1 + R_2}{S_K} \cdot \text{tg} \varphi. \quad (7)$$

Застосовуючи до умови стійкості (7) отримані вище результати силового балансу (3), після нескладних математичних перетворень можемо записати у вигляді:

$$\cos \alpha^{**} \cdot \text{tg} \varphi - \sin \alpha^{**} = \frac{1}{G} (F_i \cdot \sin \beta \cdot \text{tg} \varphi - c \cdot S_K) \quad (8)$$

В формулі (8) знак нерівності, який характеризує кути ухилу α , достатні для забезпечення стійкості до сковзання, замінено на граничну рівність. Ця рівність визначає кут α^{**} , який є небезпечним щодо втрати стійкості.

Із аналізу результату (8) зазначимо, що граничний кут α^{**} залежить як від вагових характеристик машини та корисного навантаження, так і від фізико-механічних характеристик ґрунтової поверхні руху.

Методи визначення допустимих експлуатаційних умов спеціалізованої машини, що працює на ґрунтових поверхнях з ухилом, реалізовано формулами (3) та (8), які й визначають такі умови. Для визначення власне таких умов потрібно знайти кути α^* та α^{**} та встановити безпечні експлуатаційні умови розглядуваної машини для заданих зовнішніх нестационарних навантажень з умови мінімального значення кута α^* чи α^{**} . Демонстрація застосування методів подано в подальших викладках даного дослідження.

Результати та їх обговорення

Застосування запропонованого підходу проілюстровано на прикладі танку, що веде вогонь з території на ухилі (рис. 4).

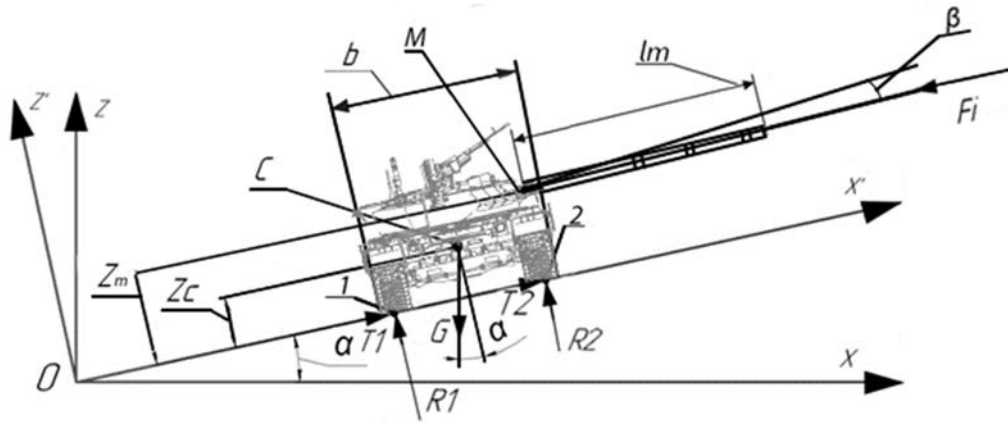


Рис. 4. Розрахункова схема для танка, що веде вогонь з території на ухилі

Для розглядуваного випадку запишемо вираз для закону збереження імпульсу:

$$\left(M + \frac{\mu}{2}\right) \cdot v_T = \left(m + \frac{\mu}{2}\right) \cdot v_C, \quad (9)$$

де M, m, μ – маса танка, снаряда та заряду відповідно, v_T, v_C – лінійна швидкість відкату танка та снаряда в момент пострілу. Враховуючи, що маса порохового заряду є нікчемно малою у порівнянні з масою танка, можемо визначити початкову швидкість відкату:

$$v_T = \frac{m + \frac{\mu}{2}}{M} v_C. \quad (10)$$

Враховуючи (1), з формули (9) отримаємо:

$$F_i = \frac{\left(m + \frac{\mu}{2}\right) v_C}{\Delta t}. \quad (11)$$

Встановлення часу Δt імпульсної взаємодії снаряда з гарматою, тобто пострілу, є складною задачею.

Для спрощення викладок допустимо, що сила імпульсу F_i близька до максимальної сили відкату F , яка для кожного типу гармати є нормативною величиною. Зокрема для гармати КБА 3 [14], якою комплектується танк Т-84 [4] відомо, що максимальна сила відкату $F = 98\,000 \text{ кГс} = 980\,000 \text{ Н}$. З метою отримання ілюстраційного результату для розглядуваного прикладу запровадимо коригувальний коефіцієнт k_k , який охоплює інерційні, в'язкісні та динамічні ефекти у процесі пострілу; у випадку $k_k = 1$ рух снаряду в дулі гармати рівномірний, а у випадок $k_k = 11$ відповідає нерівноприскореному рухові, за якого час Δt є таким, що забезпечує еквівалентність F та F_i . Враховуючи такі аргументи запишемо:

$$\Delta t = \frac{11 \cdot l_m}{v_C}. \quad (12)$$

Використовуючи технічні характеристики танка Т-84 [4], результати розрахунків Δt (12) та F_i (11) для різних типів снарядів подано в таблиці 1.

Для визначення розв'язку рівняння (3), запровадимо функції:

Таблиця 1. Час імпульсної взаємодії Δt та сила від імпульсу пострілу F_i для різних типів снарядів

№	Тип снаряду	Маса заряду μ , кг	Маса снаряду m , кг	Швидкість снаряду v_C , м/с	Δt , с	F_i , кН
1	2	3	4	5	6	7
1	Підкаліберний	7	5,67	1800	0,0257	643 100
2	Броньбійний підкаліберний	7	5,8	1800	0,0257	652 200
3	Броньбійний підкаліберний	7	7	1700	0,0271	656 800
4	Броньбійний підкаліберний	7	7,05	1680	0,0275	644 500
5	Кумулятивний	7	18,5	1650	0,0280	1 296 000
6	Осколково-фугасний	7	23,2	1560	0,0296	1 406 000

$$y_1 = \cos \alpha - \sin \alpha \frac{2z_C}{b};$$

$$y_2 = \frac{2Fi}{G} \left(\sin \beta + \frac{z_M}{b} \cos \beta \right). \quad (13)$$

І збудуємо їхні графічні залежності відносно кута α для різних значень кута β – відхилення ствола гармати від поверхні руху. Точки перетину збудованих таким чином графіків визначають кут α^* – граничний ухил щодо перекидання танка для різних кутів відхилення гармати β . Розрахунки виконано для танка Т-84 за наступних характеристик [4]: маса – 46,5 т, довжина – 4 560 мм, ширина – 3 595 мм, висота – 2 760 мм, довжина дула гармати $l_m=4,2$ м, висоту центру мас прийmemo – 980 мм, найлегший тип снаряду – підкаліберний (ч.1 таблиці 1) та найтяжчий – осколково-фугасний (ч. 7 таблиці 1). На рис. 5 подано графіки функцій y_1 та y_2 (13) за наведеними вище даними для найважчого та найлегшого серед наведених в таблиці снарядів.

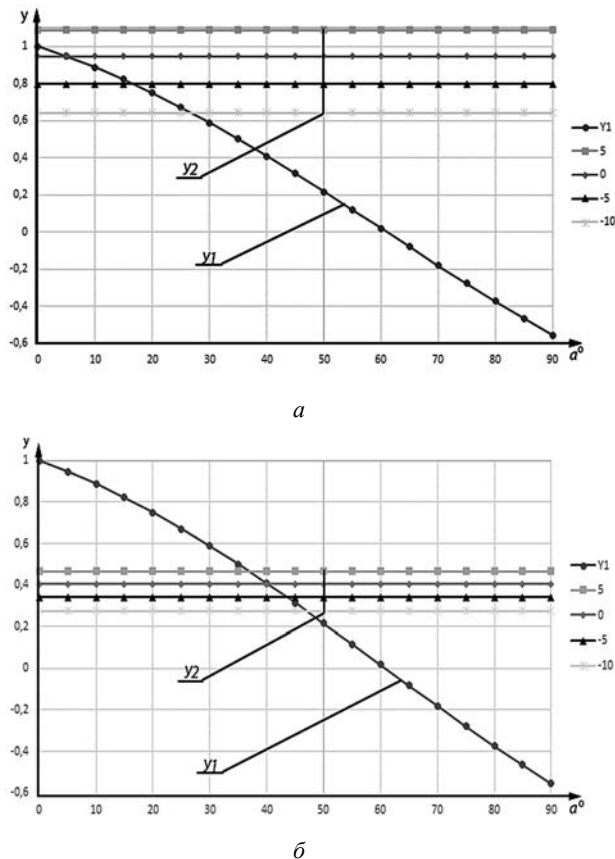


Рис. 5. Графічні будовання для визначення безпечного кута ухилу місцевості α^* для різних кутів $\beta = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ$ відхилення ствола гармати від поверхні руху танка. *a* – осколково-фугасний снаряд, *б* – підкаліберний снаряд

Точки перетину графіків на рис. 5 визначають залежності граничних кутів ухилу місцевості α^* від на-

прямку пострілів β з огляду на стійкість до перекидання (рис. 6). Ці ж графіки визначають допустиме відхилення напрямку пострілу від поверхні руху для заданого ухилу території α^* . Використання цих даних можливе для встановлення відповідних обмежувачів на напрям відхилення пострілу в заданих умовах.

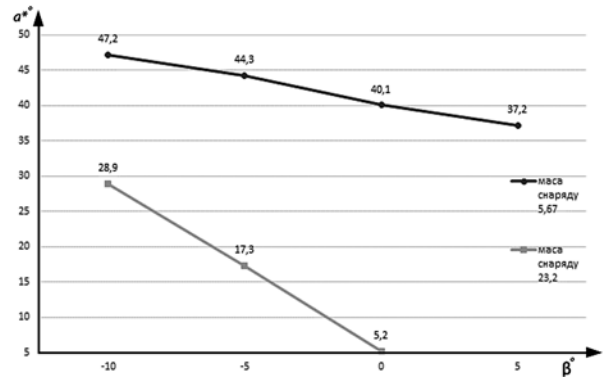


Рис. 6. Кутіві обмеження на ведення вогню різними типами снарядів

З рис. 6 зрозуміло, що для підкаліберного (легшого) снаряду гранично небезпечні кути ведення вогню є практично поза межею експлуатації танка. Однак у випадку осколково-фугасного снаряду обмеження на ведення вогню під різними кутами є доволі значним. Зокрема ухил α стає критичним за величини $5,2^\circ$ навіть за лінії ведення вогню вздовж поверхні руху.

Зазначимо, що кутіві обмеження інших типів снарядів, наведених в таблиці 1, займають проміжковий характер стосовно графіків, наведених на рис. 6 та можуть застосовуватись у разі необхідності. Важливим серед результатів даного розрахунку є те, що граничні кути для танка, що веде вогонь з негоризонтальної поверхні залежать тільки від вагових характеристик танка та геометричних характеристик території.

Окрім передбачення небезпечних умов ведення вогню з огляду на перекидання танку, необхідно визначити й небезпечні умови з огляду на поперечне сповзання ухилом, як це вже зазначалось вище. З цією метою можемо використовувати умову (7) або (8). Для (7) запровадимо функції y_3 та y_4 наступним чином:

$$y_3 = G \sin \alpha + Fi \cos \beta;$$

$$y_4 = (G \cos \alpha - Fi \sin \beta) \cdot \text{tg} \varphi + c \cdot S_K. \quad (14)$$

де S_K – площа контакту обох гусениць з ґрунтом. Для розрахунку умов безпечно виконання стрільби необхідно, на відміну від попереднього розрахунку, задати параметри тримної здатності ґрунту: φ – кут внутрішнього тертя та c – зчіплення частинок ґрунту. За даними ЕсоWood проекту [15] окремі дані щодо тримної здатності перезволожених ґрунтів можна отримати з таблиці 2:

Величини розрахункового опору ґрунтів σ є основним параметром тривкої здатності ґрунту, визначається експериментальним методом. Дані для інших типів ґрунтів наведено в таблиці 3 [13], вони можуть застосовуватись для практичного використання з метою визначення величини τ з таблиці 2.

За такого набору характеристик ґрунтів, пропонуємо використовувати для даного дослідження, поряд із даними з таблиць 2 та 3, дані [16], витяг з яких для деяких мало зволжених ґрунтів наведено в таблиці 4.

Для розглядуваного вище танка, який веде вогонь на ухилі, розраховано небезпечні умови з огляду на стійкість до сковзання. Вибрано два види ґрунтів: суглинок та глина за максимальних значень тримної здатності (таблиця 4).

На рис. 7 а та б подано графіки залежності функції u_3 та u_4 (14) для вказаних ґрунтових умов, а на рис. 8 – залежність граничного кута α^{**} стосовно сковзання танка. Всі розрахунки проведено для підкаліберного снаряда. Для осколково-фугасного снаряда для такого типу ґрунтів показники стійкості вкрай незадовільні: постріли з ґрунтів низької тримної здатності викликають непередбачуване сковзування танка.

Із результатів розрахунку, поданих на рис. 8 відмітимо, що граничні щодо сковзування кути значно менші, аніж граничні щодо перекидання кути (рис. 6) для аналогічного типу снаряду. Окрім того наведені результати отримано в припущенні, що обидві гусениці танка контактують з ґрунтом. Однак в момент пострілу на ухилі верхня гусениця частково розвантажується аж до часткової втрати контакту з ґрунтом. Це значним чином може зменшити значення функції u_4 (14) за рахунок певного зменшення площі контакту S_K та перерозподілу значень між реакціями T_1 та T_2 . Це потрібно певним чином враховувати у подальших практичних розрахунках для конкретизованих випадках.

Підсумовуючи зазначимо, що визначення допустимих кутів ухилу території потребують застосування обох видів розрахунків. Встановлення дійсних умов безпечної експлуатації спеціалізованої техніки на ухилі реалізується шляхом вибору мінімальних, з обидвох отриманих результатів, значень ухилу.

Наведені вище розрахунки носять ілюстративний характер щодо застосування методів розрахунку та можуть використовуватись для практичних цілей лише після відповідної конкретизації типу спеціалізованої машини.

Таблиця 2. Класифікація ґрунтових умов за EcoWood проектом

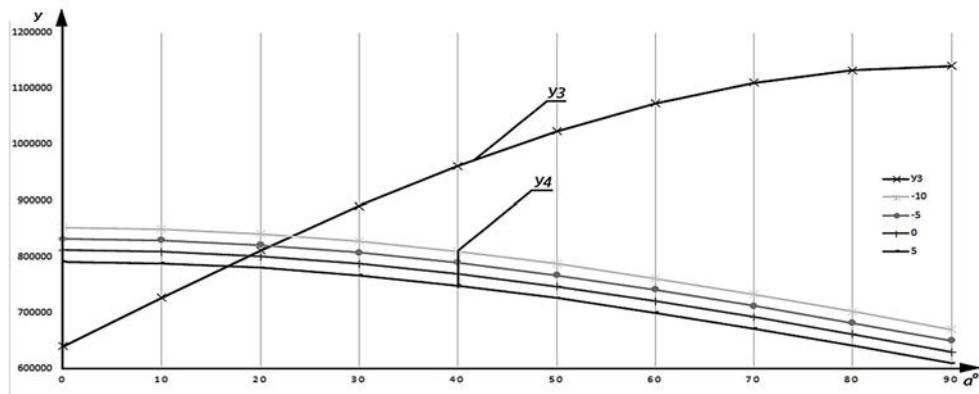
№	Твердість ґрунту (клас)	Параметри тримної здатності		
		E , кПа	τ , кПа	σ , кПа
1	Висока (1)	> 60	> 60	> 80
2	Середня (2)	20–60	20–60	60–80
3	Низька (3)	< 20	< 20	40–60

Таблиця 3. Розрахункові опори σ для різних типів ґрунтів

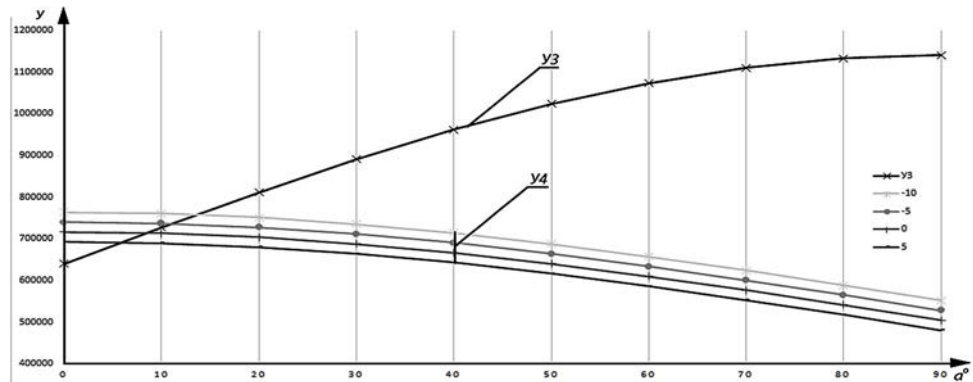
№	Тип ґрунтів			σ , кПа
1	Крупно-зернисті ґрунти	Щебінь з піском		600
2		Щебінь з глинистим наповнювачем		450
3		Гравій з глинистим наповнювачем		400
4	Піски	Крупнозернисті високої щільності		600
5		Дрібнозернисті низької щільності		400
6	Супіски	Природного відкладення, щільність в сухому стані		300
7	Суглинки	Природного відкладення, щільність в сухому стані		200
8	Глини	Коефіцієнт пористості e		0,5
9				0,8

Таблиця 4. Характеристики міцності окремих типів мало зволжених ґрунтів

Чч	Види зв'язних ґрунтів	Несуча здатність ґрунту σ , кГс/см ²	Внутрішнє зчеплення ґрунту c , кГс/см ²	Кут внутрішнього тертя φ , °
1	Легкий суглинок	3,5–5	0,5–1	24–25
2	Суглинок	4,5–9	0,6–1,2	21–23
3	Глина	5–10	0,75–1,5	15–20



a



б

Рис. 7. Графік залежності функцій y_3 та y_4

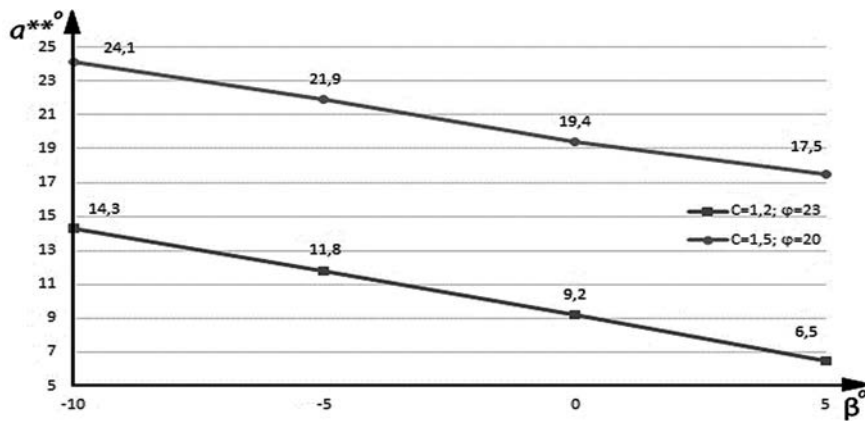


Рис. 8. Залежність граничного кута α^{**} стосовно ковзання танка

Висновки

В роботі запропоновано розрахункові схеми та відповідні формули для визначення безпечних умов експлуатації – стійкості на ухилі спеціалізованої машини, що виконує технологічні завдання за нестационарного (імпульсного) навантаження. Розглянено дві можливості втрати стійкості – перекидання та бокове

сковзання. Перша можливість характеризується лише силовими параметрами машини й технологічного навантаження. Друга можливість характеризується значною залежністю від ґрунтових умов.

Результати проілюстровано на прикладі визначення граничних кутів ведення вогню танками. Встановлено, що безпечні кути ведення вогню визначаються, як мінімальні значення з обох результатів. Більшу небезпеку становить можливість скоззування на зволжених ґрунтах.

References

- [1] N.I. Byblyuk, *Forest vehicles: Theory*, Lviv: Panorama, 2004.
- [2] N.I. Byblyuk and O.S. Machuga, "Forestry harvesters: design features, functional diagrams, prospects", *Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta "Kievskij politehniceskij institute"*. Serija mashinostroenie, No. 55, pp. 235–241, 2009.
- [3] K.M. Gurey, *Road and wake-up cars*, Lviv: Kalvariya, 2007.
- [4] A.T. Lebedev, Eds., *Tractors and cars. Working, additional and auxiliary equipment*, Kharkiv, 2006.
- [5] V.S. Tovstiy, *Military ground equipment*, Kyiv: Promin, 2009.
- [6] O.S. Machuga, "Features of designing logging equipment for work in areas with a slope. 1th part", *Bulletin of NTU "KhPI", Series: Mathematical modeling in engineering and technology*, No. 6 (1049), pp. 130–144, 2014.
- [7] N.I. Byblyuk, O.S. Machuga and M.M. Boyko, "Features of designing road-building and logging equipment for work in areas with a slope", *Theory and practice of construction*, No. 11, pp. 17–21, 2013.
- [8] O.S. Machuga, "Features of designing logging equipment for work in areas with a slope. 3th part", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technology*, No. 39 (1082), pp. 108–125, 2014.
- [9] O.S. Machuga, "Substantiation of the program of operational tests of stability of the forest machine working on a slope", in *Proc. Transfer of Innovative Technologies 2020: VI Int. Sci. and Pract. Conf.* KNUCA, Kyiv-Jiangsu-Zabrze, 20 – 21 May 2020, Kyiv: KNUCA, pp. 77–80, 2020. <https://doi.org/10.32347/tit2020.conf.06>
- [10] O.S. Machuga and Yu. O. Datsyuk, "Investigation of transverse and longitudinal loss of stability by machines for transporting liquids on a slope", in *Proc. Hydraulic and pneumatic machines - modern achievements and applications*, International Scientific and Technical Internet Conference, 27–29 December, 2018, Vinnytsia: VNTU, pp. 86–90, 2019.
- [11] V.O. Volyanyuk, D.I. Mischuk and E.M. Gorbatyuk, "Determination of inertial loads of the rotary boom of a self-propelled crane", *Mining, construction, road and reclamation machines*, Kyiv: KNUBA, No. 96, pp. 12–21, 2020. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0201>
- [12] M.M. Boris, O.S. Machuga, N.V. Shevchenko and N.I. Byblyuk, "Scientific and methodological approaches to substantiation of energy saving and environmentally friendly parameters of forest machines", *Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, Lviv: NLTU, No. 19, pp. 201–210, 2019. <https://doi.org/10.15421/411825>
- [13] K. Terzaghi, *Soil mechanics theory*, Moscow: Gosstroyizdat, 1961.
- [14] KBA-3. Available: <https://uk.wikipedia.org/wiki/КБА3>
- [15] P.M.O. Owende *et al.*, *Operations protocol for Eco-efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites*, Project ECOWOOD.Contract No. QLK5-1999-00991, 2002.
- [16] Ja.S. Ageev, *All-terrain wheeled and combined propellers (theory and calculation)*, Moscow: Mashynostroenie, 1972.

Methods of the terrain allowable slope determining for safe operation of specialized equipment under the non-stationary load action

O.S. Machuga, M.M. Borys, Yu.R. Lusta

The operation of modern high-tech equipment requires a clear delineation of safe conditions for its operation. To a large extent, this applies to machines that move and work on untreated soil surface: forestry machinery, agricultural machinery, road construction machinery, military equipment, and so on. Asymmetry of the location of the working bodies, work on surfaces with a lateral slope, non-stationary interaction with the working environment - these are the factors that increase operational risks.

Objective of this study is to establish the limits of safe operation of specialized machines operating on a rough surface with a slope to the horizon.

The methods of determining safe slopes for the above-described equipment in the conditions of its non-stationary interaction with the subject of work are considered in the work. In particular, dangerous slopes that can cause the car to overturn or roll sideways are identified. The realization of this goal is achieved by building a mathematical model and appropriate calculation schemes that cover both possibilities of loss of stability. Graphs are plotted to display the maximum slopes due to the overturning and sliding of the machine on the slope for the specified operating loads. The integral characteristic of the slope limit value covers both of the above risks.

The application of the proposed methods is illustrated by the calculation of the safe slope for firing tanks for different angles of deviation of the gun from the surface of the movement on the slope and the type of ground surface of the movement. The following results were obtained: methods for calculating the allowable slopes for the possibility of operating specialized machines on them, taking into account soil conditions, and demonstrated the application of the approach to the case of military equipment.

The use of these results is a necessary factor for the implementation in the design of technological processes for specialized machines in order to minimize operational risks.

Keywords: technological risks, safe operation of machines, dangerous slopes, tanks firing.