

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗДІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ НА ПОКАЗНИКИ ОПОРНОЇ ПРОХІДНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Віталій Хома, аспірант

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: homa.v@hotmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.64-69>

Хома В. Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки

У статті розглянуто проблему підвищення прохідності колісних автомобілів підвищеної прохідності в умовах руху по неоднорідних опорних поверхнях із різним рівнем опору коченню та зчеплення. Показано, що ключовим регульованим фактором, який визначає ефективність взаємодії шини з ґрунтом, є тиск повітря в шинах, оскільки він безпосередньо впливає на радіальну деформацію, площу плями контакту, глибину колії, втрати енергії та максимальну швидкість руху. Обґрунтовано, що використання систем централізованого регулювання тиску не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал прохідності через різні умови роботи коліс передніх і задніх осей, які рухаються по ґрунту з різним ступенем ущільнення. Метою дослідження є експериментальне визначення швидкісних показників руху повнопривідного автомобіля УАЗ-469 при різних значеннях тиску повітря в шинах та оцінка адекватності математичної моделі руху, розробленої в середовищі MATLAB Simulink, для умов бездоріжжя. Експериментальні дослідження проведено на ділянці природного піщаного бездоріжжя з попередньою оцінкою фізико-механічних характеристик опорної поверхні за методикою визначення конусного індексу СІ відповідно до стандартів WES та MMP. У ході випробувань виконано вимірювання конусного індексу ґрунту, тиску повітря в шинах, радіальної деформації шин, максимальної швидкості руху та пройденого шляху з використанням синхронізованого вимірювального комплексу. Отримані результати показали, що роздільне регулювання тиску повітря в шинах забезпечує зростання максимальної швидкості руху бездоріжжям на 15–20 % порівняно з централізованим регулюванням, а також підвищення показників прохідності за методиками WES та MMP. Результати дослідження підтверджують доцільність індивідуального підбору тиску в шинах для кожної осі як ефективного засобу підвищення прохідності колісних транспортних засобів.

Ключові слова: прохідність автомобіля, бездоріжжя, тиск повітря в шинах, роздільне регулювання тиску, взаємодія шини з ґрунтом, конусний індекс, УАЗ-469, швидкість руху.

Khoma V. Experimental studies of the influence of separate tire pressure regulation on the bearing mobility parameters of automotive vehicles

The article addresses the problem of improving the mobility of off-road wheeled vehicles under operating conditions on non-uniform supporting surfaces characterized by varying rolling resistance and traction levels. It is shown that tire inflation pressure is a key controllable factor determining the efficiency of tire-soil interaction, as it directly affects radial deformation, contact patch area, rut depth, energy losses, and permissible vehicle speed. It is substantiated that the use of centralized tire pressure regulation systems does not allow the full mobility potential to be realized due to different operating conditions of the front and rear axle wheels, which move over soil with varying degrees of compaction.

The study aims to experimentally determine the speed performance of a four-wheel-drive UAZ-469 vehicle at various tire inflation pressures and assess the adequacy of a vehicle motion mathematical model developed in the MATLAB Simulink environment for off-road conditions. Experimental investigations were carried out on a natural sandy off-road test section with a preliminary evaluation of the physical and mechanical properties of the supporting surface using the cone index (CI) determination method in accordance with the WES and MMP standards.

During the tests, measurements of soil cone index, tire inflation pressure, tire radial deformation, maximum vehicle speed, and distance traveled were performed using a synchronized measurement system. The obtained results demonstrated that separate tire pressure regulation provides an increase in the maximum off-road speed by 15–20% compared to centralized regulation, as well as an improvement in mobility indicators according to the WES and MMP methodologies. The research results confirm the feasibility of individual tire pressure selection for each axle as an effective means of enhancing the mobility of wheeled vehicles.

Keywords: vehicle mobility, off-road conditions, tire inflation pressure, separate pressure regulation, tire-soil interaction, cone index, UAZ-469, vehicle speed.

Постановка проблеми. Прохідність повнопривідних колісних транспортних засобів є визначальною експлуатаційною властивістю, оскільки вона забезпечує можливість виконання транспортних, технологічних і спеціальних завдань в умовах бездоріжжя. Експлуатація таких транспортних засобів відбувається на неоднорідних опорних поверхнях, що характеризуються змінними значеннями опору коченню та зчеплення, внаслідок чого падають показники мобільності. Одним із ключових регульованих факторів, який безпосередньо впливає на ефективність взаємодії шини з ґрунтом, є тиск повітря в шинах, оскільки він визначає радіальну деформацію, площу плями контакту та величину питомого тиску на опорну поверхню. Застосування традиційних систем централізованого регулювання тиску не враховує відмінностей умов роботи коліс різних осей, зумовлених нерівномірним розподілом навантажень і ущільненням ґрунту після проходження попередньої осі. Це зумовлює необхідність наукового обґрунтування доцільності роздільного регулювання тиску повітря в шинах як ефективного засобу підвищення показників опорної прохідності колісних автомобілів в умовах бездоріжжя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз умов експлуатації [21] автомобілів підвищеної прохідності показує, що для останніх типовим є рух по покриттях із різним ступенем нерівномірного розподілу опору коченню та зчеплення. У зв'язку з цим виникає потреба в реалізації необхідної сили тяги в різних умовах експлуатації, для забезпечення достатнього рівня мобільності, що зумовлює необхідність застосування заходів, спрямованих на забезпечення потрібної ефективності за рахунок підвищення середніх швидкостей руху та зниження затрат енергії на подолання опору рухові. Проаналізувавши всі доступні математичні моделі [6; 8; 10; 14; 16-22] взаємодії шин з опорною поверхнею, можна констатувати, що прохідність колісних транспортних засобів залежить від конструктивних параметрів автомобіля. До таких параметрів можна віднести компоновку шасі, навантаження на осі, ширину та висоту профіля шин, їхній діаметр та радіальну деформацію. Оскільки єдиним змінним параметром є радіальна деформація, яка у свою чергу залежить від тиску в шині, то проблема покращення показників взаємодії шини з опорною зводиться до забезпечення оптимального значення

тиску в шинах автомобіля. Саме тиск у шинах є одним із небагатьох регульованих факторів, що дозволяють «адаптувати» поведінку транспортного засобу до різних ґрунтових умов і підвищити його прохідність на м'яких або нестійких поверхнях.

Більшість сучасних автомобілів підвищеної прохідності оснащені системою централізованого регулювання тиску в шинах [3; 9; 15], яка дозволяє ситуативно, в межах певного діапазону, покращити тягово-зчіпні характеристики автомобіля. При зниженні тиску повітря в шинах зменшується тиск на ґрунт, збільшується площа плями контакту, зменшується глибина утвореної колії, водночас зростає деформація шини, що зумовлює збільшення втрат на внутрішнє тертя в оболонці шини, також зменшується максимально допустима швидкість руху та знижується ресурс шини. Тому залежно від фізико-механічних характеристик опорної поверхні існують оптимальні значення тиску повітря в шинах. Через неоднорідність ґрунту та різне вертикальне навантаження на осі автомобіля умови взаємодії з опорною поверхнею для кожного колеса відрізняються і зазвичай колеса другої і наступних осей рухаються вже по зміненому колесами передньої осі ґрунту, який відрізняється більшою щільністю. У результаті цього деформація та відповідно радіуси кочення передніх і задніх коліс є різними, тож виникає певний запас по тяговому зусиллі на кожній із наступних осей, який, на жаль, нівелюється системою централізованого регулювання тиску в шинах. Тому забезпечення оптимального для кожного колеса значень тиску в шинах може бути ефективним інструментом підвищення прохідності колісних автомобілів.

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання експериментальних швидкостей руху повнопривідного автомобіля УАЗ-469 при різних тисках повітря в шинах для оцінки адекватності розробленої у програмному середовищі MATLAB Simulink моделі руху [1; 2; 13]. Вказана модель визначає максимальну швидкість руху повнопривідного автомобіля за умови руху бездоріжжям (пісок із глибиною залягання більше ніж 1,5 м) з експериментальною оцінкою фізико-механічних характеристик конкретних ділянок ОП, за методикою визначення СІ. Окрім цього, завдання дослідження – експериментальна оцінка адекватності порогових значень прохідності СІ за методикою WES та MMP [13] для ділянки бездоріжжя з попередньо визначеними експериментальними значеннями СІ.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження виконували в умовах природного бездоріжжя з оцінкою найбільш значущого з умов виконання завдань показника – максимально можливої швидкості руху конкретними типом бездоріжжя. Згідно з класифікацією типів бездоріжжя, що визначено у [13], була підібрана горизонтальна ділянка протяжністю 105 м та шириною 25 м у межах території Ясницького кар'єру, розташованого на відстані

20 км на захід від м. Львова, що є піском із природною вологістю та перепадами висот профілю $\pm 0,1$ м, (рис. 1). Випробування виконували на автомобілі УАЗ-469 (рис. 2, а), що пройшов чергове ТО і ТК (рис. 2, б). Технічний стан автомобіля перебував у межах норм, що відповідають технічним умовам заводу виробника, нормативній та експлуатаційній документації. Пробіг автомобіля на початок випробувань становив 65 105 км.



Рис. 1. Супутниковий та загальний вигляд ділянки для експериментальних досліджень.
Fig. 1. Satellite and general view of the site for conducting experimental research.



Рис. 2. Експериментальні дослідження прохідності зразків колісної автомобільної техніки:
а – загальний вигляд автомобіля УАЗ-469; б – процес зважування та ТО.

Fig. 2. Experimental studies of the mobility of wheeled vehicle samples: a – general view of the UAZ-469 vehicle; b – the process of weighing and maintenance.

Таблиця 1. Короткі технічні характеристики УАЗ-469
Table 1. Key technical specifications of the UAZ-469

Модель автомобіля	Колісна формула	Маса, кг	Розподіл маси за осями		Питома потужність, кВт/т	Кліренс, мм	Шини
			Передня вісь, кг	Задня вісь, кг			
УАЗ 469	4x4	2105	1004	1101	26,26	300	235/75R15

Для проведення випробування автомобіль було споряджено згідно з технічною документацією та встановлено вимірювальні пристрої, вагові параметри визначено послідовним зважуванням при наїзді на платформу ваги коліс передньої та задньої осі. Процедуру зважування та технічний огляд проводили на базі ТзОВ «Автотранс-ДІК» із використанням сертифікованого обладнання, відповідність якого підтверджена чинним атестатом про акредитацію № 201506. Короткі технічні характеристики та результати зважування наведено у табл. 1.

На автомобілі були встановлені пневматичні шини типорозміру 235/75R15, з універсальним рисунком протектора, без видимих зовнішніх пошкоджень, із зношенням протектора не більше ніж 5 % від початкової висоти. Тиск повітря в шинах під-час проведення випробувань змінювався в діапазоні від мінімального (0,07 МПа) до максимального (0,20 МПа). Початковим етапом випробувань був контрольний пробіг зразка по маршруту не менше ніж 30 км із середньою швидкістю 40км/год, що сприяло прогріву агрегатів до робочих температур.



Рис. 3. Складові компоненти вимірювального комплексу: а – цифровий пенетрометр Лан-М PRO; б – зовнішній GNSS-приймач G-Mouse VK-162; в – цифровий манометр SDTG-4271

Fig. 3. Components of the measurement system: a – LAN-M PRO digital penetrometer; b – G-Mouse VK-162 external GNSS receiver; c – SDTG-4271 digital manometer.

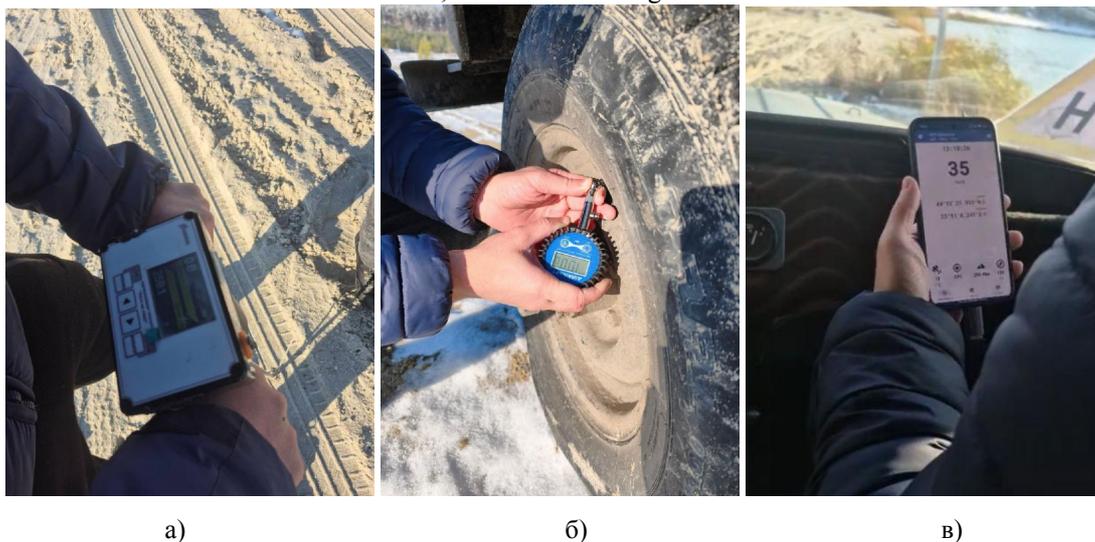


Рис. 4. Ключові етапи збору експериментальних даних: а – визначення конусного індексу ОП; б – регулювання тиску повітря в шинах; в – отримання значення максимальної швидкості руху.
Fig. 4. Key stages of experimental data collection: a – determination of the supporting surface cone index; b – regulation of tire inflation pressure; c – acquisition of the maximum vehicle speed value.

Для виконання поставлених завдань виконували заміри та реєстрацію таких параметрів: конусного індексу опорної поверхні, тиску повітря в шинах, радіальної деформації шин при різних тисках, пройденого автомобілем шляху, швидкості руху на визначеній ділянці бездоріжжя. Заміри вищевказаних параметрів виконували із синхронізацією процесу реєстрації, неперервність процесу забезпечувалася використанням вимірювального комплексу, до якого входили: портативний персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням, пенетрометр, що відповідає

стандарту ASAE S313.3 [4], зовнішній GNSS приймач із частотою вимірювань 10 Гц та цифровий манометр. Перед проїздами були визначені основні фізико механічні характеристики ОП досліджуваних ділянок, із використанням пенетрометра за методикою оцінки конусного індексу CI [5], прийнятою у стандартах із оцінки прохідності армій НАТО [17; 22].

На рис. 5 та в табл. 2 представлені результати експериментальних досліджень, що опосередковані за чотирьох-п'ятиразовим дублюванням і прокладанням першої колії.

Таблиця 2. Показники прохідності УАЗ-469 при різних значеннях тиску повітря в шинах
Table 2. Mobility indicators of the UAZ-469 at various tire inflation pressures

Показник прохідності	Розподіл тиску повітря в шинах p_1/p_2 , кПа					
	Централізований			Роздільний		
	200/200	150/150	100/100	150/200	100/150	70/100
CI, кПа	1565	1527	1200	1070	983	972
MN	11,01	11,52	12,29	11,25	11,85	12,6
MMP, кПа	370	337	302	349	313	288
V_{max} , км/год	15	23	30	33	35	36

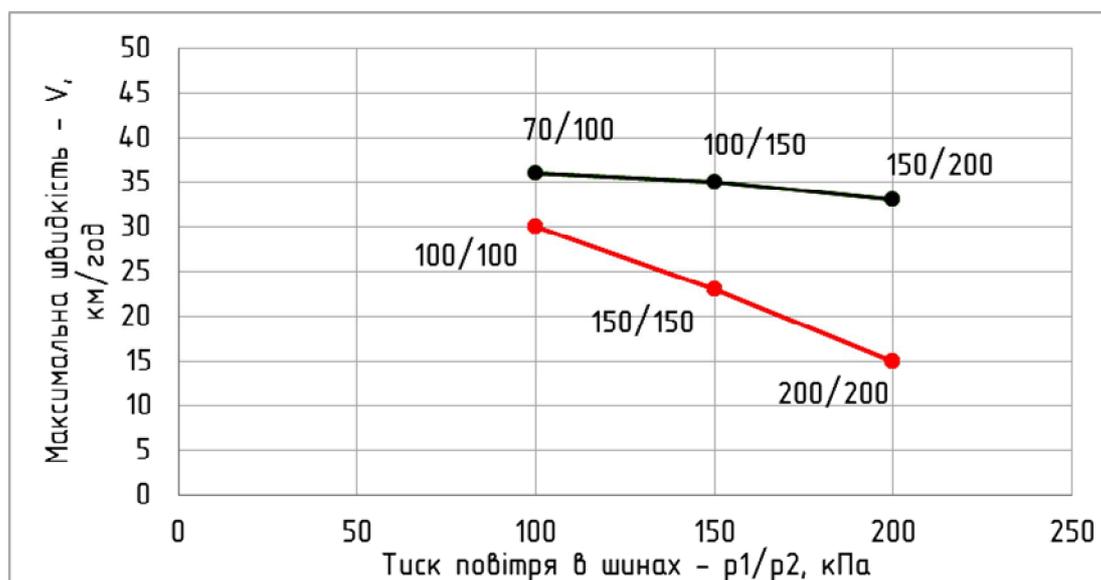


Рис. 5. Графіки отриманих результатів експериментальних значень швидкості руху бездоріжжям УАЗ-469 при різних тисках повітря в шинах.

Fig. 5. Graphs of the experimentally obtained off-road speed values of the UAZ-469 at various tire inflation pressures.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень слід констатувати підтвердження висунутої раніше гіпотези про підвищення прохідності за допомогою роздільного регулювання тиску повітря в шинах [12]. Встановлено, що підбір тиску в шинах для різних осей дозволяє повніше реалізувати тягово-зчіпний потенціал коліс, зумовлений

відмінностями у фізико-механічних характеристиках опорної поверхні та ступені її ущільнення після проходження передньої осі. Експериментально доведено, що за роздільного регулювання тиску повітря в шинах максимальна швидкість руху автомобіля УАЗ-469 бездоріжжям зростає в середньому на 15–20 % порівняно з централізованим

регулюванням. Одночасно зафіксовано покращення показників прохідності, визначених за методиками WES та MMP, що свідчить про підвищення ефективності взаємодії шини з ґрунтом та зниження питомих втрат енергії на подолання опору рухові.

Бібліографічний список

1. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22–31.
2. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Науково-виробничий журнал «Автомобілівник України»*. 2020. № 2. С. 21–28.
3. Adams B. T. Central tire inflation for agricultural vehicle, 2002. 130 p.
4. ASAE Standards. S313.3. Soil cone penetrometer. ASAE. 2002.
5. ASAE Standards. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. ASAE. 2002.
6. Bekker M. G. Theory of land locomotion. The mechanics of vehicle mobility. The Univ. Michigan Press. 1956. 522 p.
7. Bradley A.H. Testing a Central Tire Inflation System in Western Canada Log-hauling Conditions. Vancouver. Forest Engineering Research Institute of Canada. 1993. Tech. Note TN-197.
8. Brixius W. W. Traction prediction equations for bias ply tires. *ASAE Paper*. 1987. № 87. P. 1622.
9. Central Tire Inflation: Demonstration Tests in the South. New. USDA Forest Service. General Technical Report SO-78.
10. Freitag D. R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *J Terramechanics*. 1966. № 3. P. 51–68.
11. Hrubel M., Krainyk L., Mikhalieva M., Zalyпка V., Manziak M., Khoma V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A. Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 128. P. 64–72.
12. Khoma V. Efficiency of differential pressure regulation in tires under conditions of off-road passability and mobility. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*. 2024. №27. P. 22–26.
13. Khudaverdian G., Khoma V., Krainyk L. Simulation modeling of field movement of four-wheel drive vehicles in the MATLAB Simulink software environment. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*. 2022. №26. P. 164–170.
14. Maclaurin E. B. The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils. *Proceedings of the 7th European ISTVS Conference*, Ferrara, Italy, 8-10 October. 1997. P. 391–398.
15. Pletts T. A literature overview of central tyre inflation systems. Pietermaritzburg, University of KwaZulu-Natal, 2006. 25 p.
16. Rummer R., Ashmore C. Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders. *ASAE Paper*. 1985. № 85–1611. 15 p.
17. Saarilahti M. Soil interaction model. Development of protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites. 2002. 43 p.
18. Sharma A. K., Pandey K. P. Traction data analysis in reference to a unique zero condition. *J Terramechanics*. 1998. № 5. P. 179–88.
19. Turnage G. W. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations. *Proceedings of the 4th International ISTVS Conference*, Stockholm – Kiruna, Sweden, April 24–28. 1972. P. 62–82.
20. Wismer R. D., Luth H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *J Terramechanics*. 1973. № 10. P. 49–61.
21. Wong J. Theory of ground vehicles. 3rd ed. NY: John Wiley and Sons, Inc., 2001. 528 p.
22. Wong Y. C.D. An assessment of land vehicles trafficability. *DSTA HORIZONS*. 2016. P. 54–63.

Стаття надійшла 10.02.2025