

**А. В. Бохонко<sup>1</sup>,  
Р. В. Зінько<sup>1</sup>  
І. Б. Демчук<sup>1</sup>  
А. П. Поляков<sup>2</sup>**

## **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ НА ПОВІТРЯНІЙ ПОДУШЦІ**

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*Прохідність автомобілів в умовах бездоріжжя можна покращити, зменшивши вертикальне навантаження на опорну поверхню. Реалізувати це можна поєднавши колісний рушій і аеродинамічний компенсатор (повітряний вентилятор направленої дії).*

*Автомобіль з аеродинамічним компенсатором використовує підйомний вентилятор, який нагнітає повітря в камеру тиску (яка розташована всередині кузова автомобіля), а потім повітря спрямовується до подушки. Повітря, яке надуває подушку, піднімає автомобіль над землею.*

*Було проведено за допомогою програмного забезпечення Solidworks аналіз впливу аеродинамічного компенсатора на питомий тиск автомобіля на опорну поверхню, звукові навантаження при роботі аеродинамічного компенсатора, навантаження на лопаті вентилятора, а також аналіз внутрішнього потоку у аеродинамічному компенсаторі. Розглядалися два варіанти конструктивної схеми автомобіля з аеродинамічним компенсатором: компенсатор містив два і три вентилятори.*

*На основі проведеного моделювання для багі з двома і трьома вентиляторами, що складають систему аеродинамічної компенсації, встановлено: основна швидкість потоку повітря при двох вентиляторах досягає близько 60 км/год, в зоні вентилятора 130 км/год, та локально на краях лопаток більше 200 км/год; основна швидкість потоку повітря при трьох вентиляторах досягає близько 80 км/год, в зоні вентилятора 160 км/год, та локально на краях лопаток більше 250 км/год; загальна акустична потужність в основному тримається на рівні 30 дБл, максимальна акустична потужність виникає при трьох вентиляторах в зоні обертання вентилятора та становить від 78 дБл, до 86 дБл; основна швидкість потоку повітря в шахті пропелера повітряної подушки досягає близько 60 км/год, в зоні вентилятора 130 км/год та локально на краях лопаток більше 200 км/год.*

**Ключові слова:** автомобіль, повітряна подушка, аеродинамічний компенсатор, прохідність, вентилятор.

### **Вступ**

Існують різні способи покращення прохідності транспортних засобів при русі по бездоріжжю: потужність двигуна; масо-габаритні характеристики автомобіля; питомий тиск на поверхню; характеристики шин; тип трансмісії; кліренс; кінематика підвіски. Зменшення тиску на опорну поверхню дозволяє забезпечити не руйнування опорного шару в місці дотику з рушієм.

### **Аналіз публікацій**

Варіантом технічної реалізації такого підходу є використання повітряної подушки.

Судна на повітряній подушці є універсальними транспортними засобами, здатними пересуватися практично по будь-якій поверхні (наприклад, по землі, воді, грязюці, льоду тощо). Завдяки своїй амфібійній характеристиці вони особливо підходять для проведення рятувальних операцій і транспортування важких вантажів по нетипових поверхнях [1].

Рух уперед у суднах на повітряній подушці забезпечується вентиляторами для повітряної тяги. Для глісування над поверхнею використовуються вентилятори підйому. Були проведені дослідження стійкості і керованості руху малих суден на повітряній подушці над різними поверхнях [2-6].

Попри численні переваги, судна на повітряній подушці мають суттєвий недолік: їх високе споживання енергії, що обмежує тривалість їх експлуатації та здатність проводити операції на великій відстані. Існує обмежена кількість досліджень щодо енергоефективності суден на повітряній подушці. Одне з таких досліджень розглядає енергоспоживання автономної моделі судна на повітряній подушці та аналізує практичні результати тестів і механічні характеристики конструкції для зменшення енергоспоживання [7]. Проте, хоча це дослідження заслуговує на увагу, воно не

враховує важливість симуляції потоку та різних методів управління для підвищення енергоефективності.

Іншим варіантом покращення прохідності наземних транспортних засобів є застосування на них повітряної подушки як компенсатора навантаження на опорну поверхню [8,9].

### Мета статті

Метою цього дослідження є створення автомобіля покращеної прохідності з використанням повітряної подушки (аеродинамічного компенсатора).

### Виклад основного матеріалу

Автомобіль з аеродинамічним компенсатором використовує підйомний вентилятор, який нагнітає повітря в камеру тиску (яка розташована всередині кузова автомобіля), а потім повітря спрямовується до подушки. Повітря, яке надуває подушку, піднімає автомобіль над землею. Повітря, яке виходить із подушки, створює бар'єр, що зменшує тертя й дозволяє автомобілю рухатися з меншим навантаженням на опорну поверхню.

Для вибору необхідного підйомного двигуна слід розрахувати необхідний манометричний тиск на дні повітряної подушки. Необхідна інформація може бути отримана за допомогою наступного рівняння [10]:

$$P_r = \frac{m \cdot g}{A},$$

де  $m$  - це загальна маса автомобіля (включаючи вантаж);  $g$  - прискорення вільного падіння;  $A$  - площа повітряної подушки.

Слід зазначити, що наведена формула надає лише грубу оцінку й не враховує різноманітні втрати енергії, які можуть виникати під час роботи.

Сила підйому на схилі пов'язана з рухом автомобіля на похилій площині й може бути обчислена за формулою [11]:

$$F_{cl} = m \cdot g \cdot \sin\varphi,$$

де  $F_{cl}$  - необхідна сила підйому на схилі;  $\varphi$  - кут нахилу.

Сила аеродинамічного опору — це сила, що створюється цими молекулами при русі твердого об'єкта вперед. Цю силу потрібно подолати, оскільки вона діє як сила тертя й уповільнює рух. Вона залежить від багатьох змінних, таких як площа поперечного перерізу судна, щільність повітря й геометричні параметри, і може бути розрахована за формулою [11]:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot F_A \cdot C_d \cdot V^2,$$

де  $F_D$  - сила аеродинамічного опору, що діє на судно;  $\rho$  - щільність повітря;  $F_A$  - площа поперечного перерізу автомобіля;  $C_d$  - коефіцієнт опору;  $V$  - швидкість автомобіля.

Необхідну силу прискорення можна визначити за формулою [11,12]:

$$F_a = m \cdot a,$$

де  $F_a$  — сила прискорення.

Також слід враховувати кінематичні формули для більш детального аналізу сили прискорення:

$$v = v_0 + a \cdot t,$$

де  $v$  — кінцева швидкість автомобіля;  $v_0$  — початкова швидкість автомобіля;  $t$  — час для досягнення необхідної швидкості.

Ураховуючи необхідні й діючі сили на судно, загальна необхідна тяга може бути розрахована так:

$$F_t = F_d + F_{cl} + F_a.$$

Було проведено за допомогою програмного забезпечення Solidworks аналіз впливу аеродинамічного компенсатора на питомий тиск автомобіля на опорну поверхню, звукові навантаження при роботі аеродинамічного компенсатора, навантаження на лопаті вентилятора, а також аналіз внутрішнього потоку у аеродинамічному компенсаторі. Розглядалися два варіанти конструктивної схеми автомобіля з аеродинамічним компенсатором: компенсатор містив два і три вентилятори (рис. 1). На рис. 2 показано основні елементи автомобіля з аеродинамічним компенсатором. Параметри для розрахунків наведені в таблиці 1.

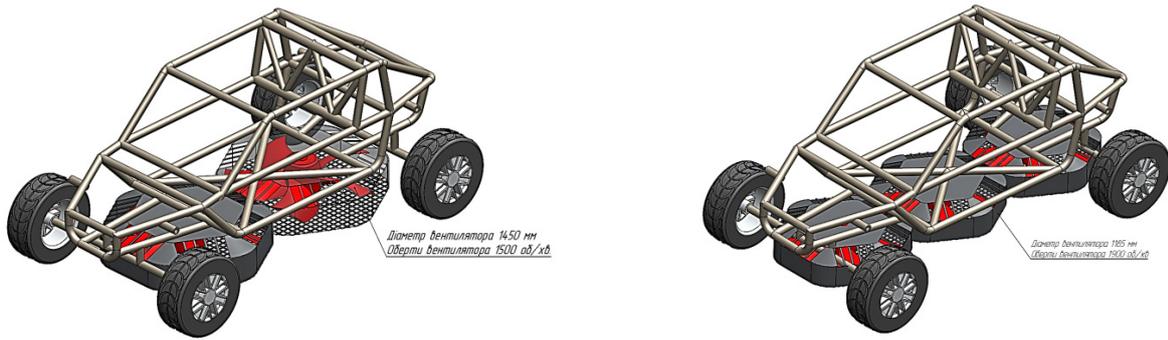
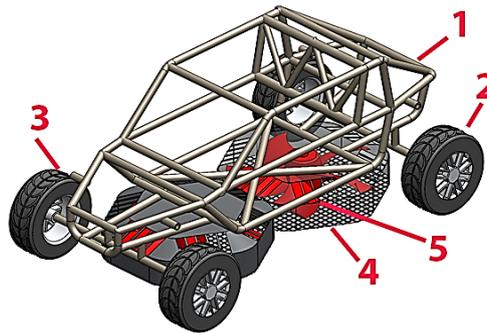


Рис. 1. Варіанти багі з вентиляторами аеродинамічного компенсатора



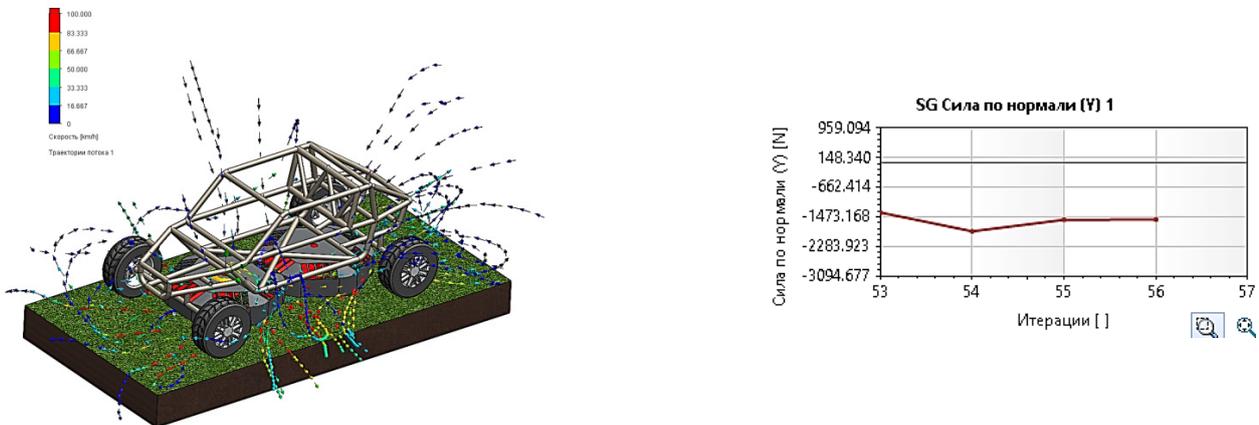
1 – каркас; 2 – задні тягові колеса; 3 – передні тягові колеса; 4 – спідниця аеродинамічного компенсатора; 5 – вентилятор аеродинамічного компенсатора

Рис. 2. Основні елементи автомобіля з аеродинамічним компенсатором.

Таблиця 1.

Параметри для розрахунків	
Параметр моделі	Значення
Максимальні розміри	4000x2300x1700 см
Маса багі	900 кг
Швидкість потоку у аеродинамічному компенсаторі	200 км/год.
Тиск атмосферний	101325 Па
Температура повітря	293,2 К

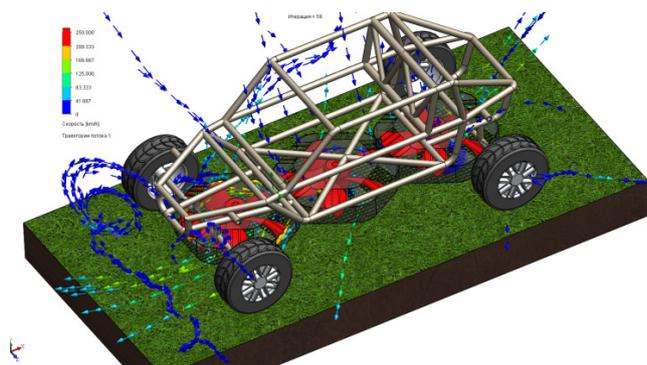
На рис. 3 і рис. 4 показано результати моделювання руху повітряного потоку навколо корпусу і величину зменшення навантаження на опорну поверхню при двох і трьох вентиляторах. На графіках (рис. 3, рис. 4) показано середню загальну силу, яка діє на поверхню. На рис. 5 і рис. 6 показано результати моделювання рівня акустичної потужності при двох вентиляторах.



Матеріал лопатей вентиляторів - титан VT6, 1500 об/хв, діаметр 1450 мм, середня підйомна сила -1473 Н.

Рис. 3. Моделювання повітряного потоку навколо корпусу при двох вентиляторах.

З графіку видно що основна швидкість потоку повітря досягає близько 60 км/год, (голубий колір стрілок), в зоні вентилятора 130 км/год (зелений колір стрілок), та локально на краях лопаток більше 200 км/год (червоний колір стрілок).



Матеріал лопатей вентиляторів - титан ВТ6, 1900 об/хв, 1185 мм діаметр, середня підйомна сила -2092 Н

Рис. 4. Моделювання повітряного потоку навколо корпусу при трьох вентиляторах.

З графіку видно що основна швидкість потоку повітря досягає близько 80 км/год, (голубий колір стрілок), в зоні вентилятора 160 км/год (зелений колір стрілок), та локально на краях лопаток більше 250 км/год (червоний колір стрілок).

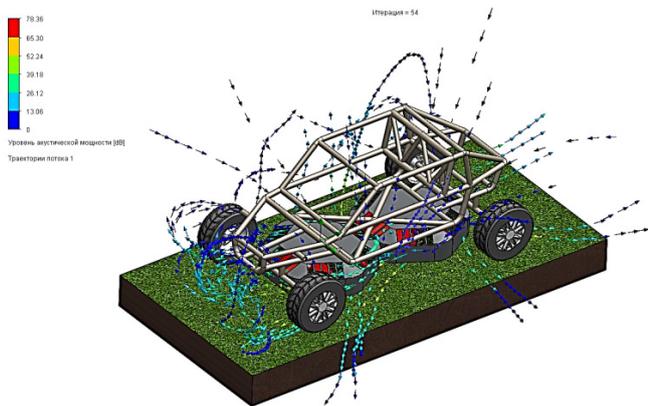


Рис. 5. Моделювання рівня акустичної потужності при двох вентиляторах на швидкості 1500 об/хв. – 78 дБл

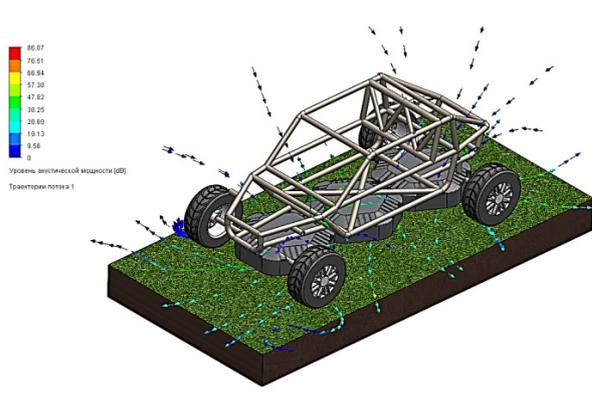


Рис. 6. Моделювання рівня акустичної потужності при трьох вентиляторах на швидкості 1900 об/хв. – 86 дБл

З графіків видно що загальна акустична потужність в основному тримається на рівні 30 дБл, максимальна акустична потужність виникає в зоні обертання вентилятора та становить для рис.5 – 78 дБл, рис.6 – 86 дБл.

Використовуючи середовище Solidworks, був проведений статичний аналіз пропелера на міцність.

Кожен пропелер піддається дії відцентрової сили, що створюється двигуном і прикладається до пропелера. Ця сила діє в центрі пропелера, що змушує його обертатися. Режими руху та матеріал пропелера наведені в таблиці 2. Максимальне кутове прискорення двигуна у всі дослідженнях приймалося 500 об/хв<sup>2</sup>.

Таблиця 2.

Режими руху та матеріал пропелера

Матеріал пропелера	Гранична міцність, МПа	Максимальні оберти пропелера, об/хв	Підйомна сила, Н	Кількість пропелерів
Титан ВТ6 ГОСТ19806-74	1050	1500	933 МПа	два
		1900	1026 МПа	три
Сталь 65Г ДСТУ 7809:2015	785	1000	728 МПа	два
		1200	730 МПа	три

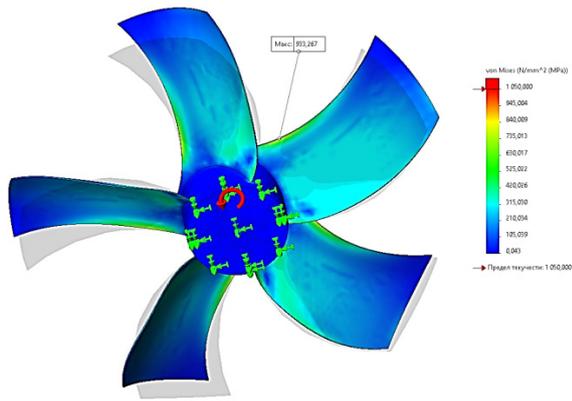


Рис. 7. Розподіл напружень на лопатях пропелера 1450 мм, 1500 об/хв. Титан ВТ6

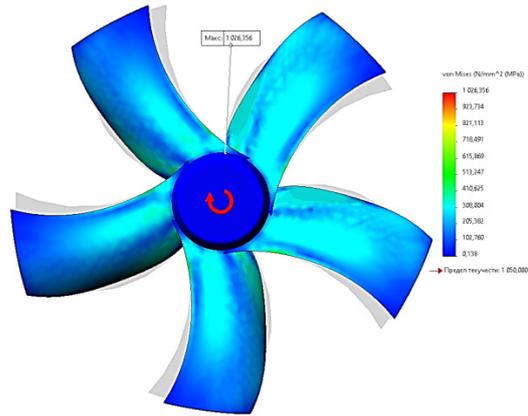


Рис. 8. Розподіл напружень на лопатях пропелера діаметром 1185 мм, 1900 об/хв. Титан ВТ6

З графіків видно що основні напруження які виникають на лопатях вентилятора становлять близько 300 МПа (синій колір), в невеликих зонах близько 600 МПа (зелений колір), та локально 950-1000 МПа (червоний колір) при межі текучості в 1050 МПа.

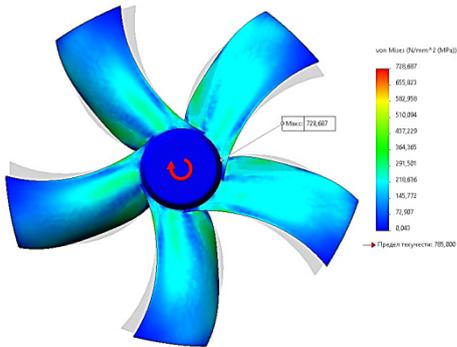


Рис. 9. Розподіл напружень на лопатях пропелера 1450 мм, 1000 об/хв. Сталь 65Г

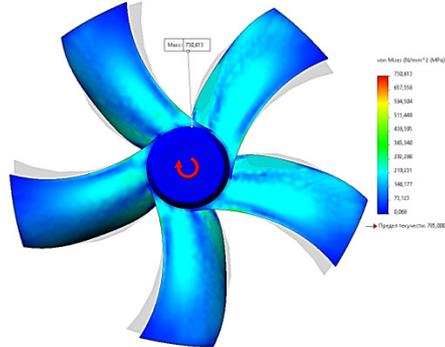


Рис. 10. Розподіл напружень на лопатях пропелера діаметром 1185 мм, 1200 об/хв. Сталь 65Г

З графіків видно що основні напруження які виникають на лопатях вентилятора становлять близько 200 МПа (синій колір), в невеликих зонах близько 400 МПа (зелений колір), та локально 730 МПа (червоний колір) при межі текучості в 785 МПа.

Моделювання та аналіз внутрішнього потоку в повітряній подушці були проведена для перевірки умови забезпечення достатньої потужність для підйому корпусу автомобіля, а також оцінки стабільністю потоку повітря у повітряній подушці. Моделювання проводилося за стандартними умовами STP (тиск атмосферний 101325 Па, температура повітря 293,2 К) у програмі Solidworks.

На рис. 11 показана конструкція шахти пропелера повітряної подушки. На рис. 12 стрілками показані напрямки потоку повітря, яке подається пропелером вентилятора.

З графіку видно що основна швидкість потоку повітря досягає близько 60 км/год, (голубий колір стрілок), в зоні вентилятора 130 км/год (зелений колір стрілок), та локально на краях лопаток більше 200 км/год (червоний колір стрілок).

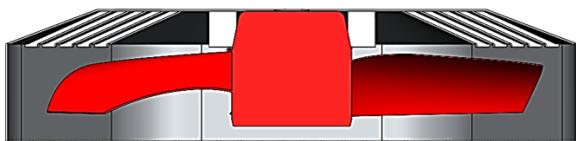


Рис. 11. Поперечний розріз камери тиску повітряної подушки

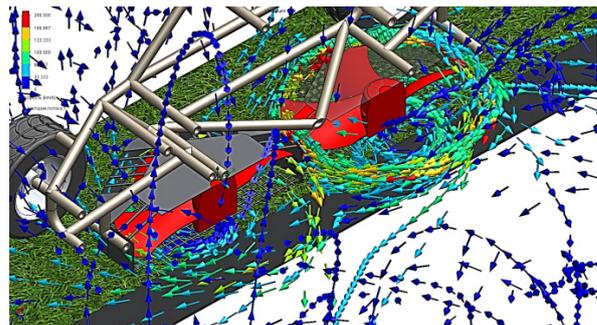


Рис. 12. Моделювання внутрішнього потоку

## Висновок

Прохідність автомобілів в умовах бездоріжжя можна покращити, зменшивши вертикальне навантаження на опорну поверхню. Реалізувати це можна поєднавши колісний рушій і аеродинамічних компенсатор (повітряний вентилятор направленої дії).

На основі проведеного моделювання для багі з двома і трьома вентиляторами, що складають систему аеродинамічної компенсації, встановлено:

- основна швидкість потоку повітря при двох вентиляторах досягає близько 60 км/год, в зоні вентилятора 130 км/год, та локально на краях лопаток більше 200 км/год;
- основна швидкість потоку повітря при трьох вентиляторах досягає близько 80 км/год, в зоні вентилятора 160 км/год, та локально на краях лопаток більше 250 км/год;
- загальна акустична потужність в основному тримається на рівні 30 дБл, максимальна акустична потужність виникає при трьох вентиляторах в зоні обертання вентилятора та становить від 78 дБл, до 86 дБл;
- основна швидкість потоку повітря в шахті пропелера повітряної подушки досягає близько 60 км/год, в зоні вентилятора 130 км/год та локально на краях лопаток більше 200 км/год.

## Література

1. J. R. Amyot, *Hovercraft Technology Economics and Applications*, 1st ed., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands: 1989.
2. A. Wang, H. Liu, S. Gao, C. Wu, "Analysis on Motion Stability and Safety of hovercraft in ice region," The 6th International Conference on Transportation Information and Safety., Oct. 2021.
3. M. M. El-khatib, W. M. Hussein, "Stabilization and Design of a Hovercraft Intelligent Fuzzy Controller," IJSRSET., vol .2, Dec. 2013.
4. M. Riyadi, L. Rohmando, A. Triwiyatno, "Development of hovercraft prototype with stability control system using PID controller," Int. Conf. on Information Tech., Computer, and Electrical Engineering., Oct.2016.
5. C. Wang, H. Zhang, M. Fu, Motion control of an amphibious hovercraft based on fuzzy weighting," IEEE 14th International Conference on Communication Technology., May. 2013.
6. L. Yun and A. Bliault, *Theory and Design of Air Cushion Craft*, 1st ed, London, UK: 2000.
7. House of Commons Debates: Hovercraft Bill, Parliamentary Debates (Hansard), vol. 764, cc1479-522, 16 May 1968, archived from the original on 27 November 2012, retrieved 26 May 2012.
8. Бохонко А. В., Зінько Р. В. Зменшення вертикального навантаження автомобіля як спосіб підвищення його прохідності // Сучасні технології промислового комплексу – 2024: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 17–19 вересня 2024 року, Херсон – Хмельницький. – 2024. – С. 163–164.
9. Бохонко А. В., Зінько Р. В. Застосування автомобілів з частковим розвантаженням ваги у військовій справі // Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності (за досвідом забезпечення національної безпеки складовими сектору безпеки і оборони у ході російсько-української війни): збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції (Львів, 28–29 листопада, 2024 р.). – 2024. – С. 334–335.
10. N. Saaid, E. Yunus, O. Fei, "CFD simulation of air flow around a hovercraft," VICET 2014., Nov.2014.
11. Матейчик В.П. Особливості моделювання руху автомобіля підвищеної прохідності в експлуатаційних умовах / В.П.Матейчик, Д.В.Савенок // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2018. – №6(112). – С. 27 – 33.
12. J. Anderson, "Fundamentals of Aerodynamics", 6th ed., McGraw Hill, New York, USA: 2016.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту

Стаття надійшла до редакції \_12.10.2025 р.\_

**Бохонко Андрій Віталійович** – аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, спеціальність Галузеве машинобудування, Національний університет «Львівська Політехніка», e-mail: [andrii.v.bokhonko@lpnu.ua](mailto:andrii.v.bokhonko@lpnu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4754-6348>

**Зінько Роман Володимирович**<sup>1</sup> – д-р техн. наук, проф. каф. Проектування машин та автомобільного інжинірингу, e-mail: [rzinko@gmail.com](mailto:rzinko@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>

**Демчук Ігор Богданович** – магістр кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, спеціальність Галузеве машинобудування, Національний університет "Львівська Політехніка", e-mail: [saduwez@gmail.com](mailto:saduwez@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6799-3605>

Національний університет «Львівська політехніка», вул. Професорська 1а, 79013, м. Львів; 14-й корпус, к. 75.

**Поляков Андрій Павлович**<sup>2</sup> – д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: [poliakovap61@gmail.com](mailto:poliakovap61@gmail.com) Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>

**A. Bokhonko<sup>1</sup>**  
**R. Zinko<sup>1</sup>**  
**I. Demchuk<sup>1</sup>**  
**A. Polyakov<sup>2</sup>**

## ANALYSIS OF AN EFFICIENT AIR CUSHION VEHICLE

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University  
<sup>2</sup>Vinnitsa National Technical University

Off-road vehicle performance can be improved by reducing the vertical load on the supporting surface. This can be achieved by combining a wheel drive and an aerodynamic compensator (directional air fan).

A car with an aerodynamic compensator uses a lift fan that forces air into a pressure chamber (located inside the car body), which then directs the air to the airbag. The air that inflates the airbag lifts the car off the ground.

An analysis of the impact of the aerodynamic compensator on the specific pressure of the vehicle on the supporting surface, sound loads during the operation of the aerodynamic compensator, loads on the fan blades, as well as an analysis of the internal flow in the aerodynamic compensator was carried out using Solidworks software. Two variants of the design scheme of a car with an aerodynamic compensator were considered: the compensator contained two and three fans.

Based on the simulation conducted for a buggy with two and three fans, which make up the aerodynamic compensation system, it was established: the main air flow speed with two fans reaches about 60 km/h, in the fan zone 130 km/h, and locally at the edges of the blades more than 200 km/h; the main air flow speed with three fans reaches about 80 km/h, in the fan zone 160 km/h, and locally at the edges of the blades more than 250 km/h; the total acoustic power is mainly kept at 30 dBI, the maximum acoustic power occurs with three fans in the fan rotation zone and ranges from 78 dBI to 86 dBI; The main air flow speed in the air cushion propeller shaft reaches about 60 km/h, in the fan zone 130 km/h and locally at the edges of the blades more than 200 km/h.

**Key words:** car, airbag, aerodynamic compensator, cross-country ability, fan.

**Bokhonko Andrii** – graduate student Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [andrii.v.bokhonko@lpnu.ua](mailto:andrii.v.bokhonko@lpnu.ua)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4754-6348>

**Zinko Roman<sup>1</sup>**, PhD, Professor, Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [rzinko@gmail.com](mailto:rzinko@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>

**Demchuk Ihor** – master's degree Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [saduwez@gmail.com](mailto:saduwez@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6799-3605>

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University, Professorska str. 1a, Lviv, Ukraine, 79013

**Polyakov Andriy<sup>2</sup>**, doctor of technical sciences, prof., prof. Department of Automobile and Transport Management, Vinnitsa National Technical University, e-mail: [poliakovap61@gmail.com](mailto:poliakovap61@gmail.com)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>