

Д. Б. Бегерський<sup>1</sup>  
С. В. Цимбал<sup>2</sup>  
І. В. Вітюк<sup>1</sup>  
А. О. Коваль<sup>1</sup>

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОПОЇЗДА НА ЙОГО АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

<sup>1</sup>Державний університет «Житомирська політехніка»

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

У статті автори проаналізували актуальність теми дослідження, визначили мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження. Також надали аналіз відомих досліджень, які пов'язані із вивченням особливостей формування сили опору повітря при русі автотранспортних засобів. На основі аналізу відомих досліджень щодо факторів впливу геометричних параметрів автопоїздів на аеродинамічний опір обґрунтовано актуальність досліджень, сформульовано їх мету і завдання.

Метою статті є визначення впливу геометричних параметрів автопоїздів на їх аеродинамічні характеристики і, як наслідок, на витрату палива, а отже, і на вартість транспортної роботи. Інструментом дослідження цього питання є програмне забезпечення, за допомогою якого буде проводитися низка дослідів. Магістральними автопоїздами щороку здійснюються переміщення різних вантажів на мільйони кілометрів, і за таких масштабів ціна кожного окремого кілометра відіграє дуже важливу роль. На основі аналізу рівняння потужнісного балансу можна зробити висновки про те, що значна частка потужності двигуна витрачається на подолання опору повітря, і чим більша швидкість автопоїзда, тим більший цей опір.

Актуальність досліджень полягає у можливості зменшення витрат через прийняття низки рішень щодо зниження аеродинамічного опору автопоїздів.

Розглянуто механізм виникнення опору повітря. Встановлено, що зниження аеродинамічного опору є дуже важливим завданням, адже кожні 2% зниження лобового опору автомобіля приносять 1% покращення паливної економічності. Порівняно з легковими автомобілями вантажні мають значно більший поперечний переріз і більш незграбні обриси. Це викликано особливостями їх призначення та використання. Під час створення універсального вантажного автомобіля намагаються отримати якомога більший обсяг для розміщення вантажу при мінімальній площі, яку займає автомобіль на дорозі, а оскільки частина цієї площі припадає на двигун і кабіну, то природно, що кузов виходить високим. Отже, якщо одним зі шляхів зниження аеродинамічного опору легкового автомобіля є зменшення його поперечного перерізу, насамперед висоти, то для магістрального вантажного автомобіля або автопоїзда потрібно шукати інший варіант.

**Ключові слова:** автопоїзд; повітряний потік; сила опору повітря; завихрення потоку повітря.

### Постановка проблеми

Головною метою дослідження є зменшення аеродинамічного опору транспортних засобів (ТЗ). Це значною мірою впливає на такі характеристики ТЗ:

- зменшення витрати палива;
- підвищення ресурсу деталей та механізмів внаслідок зменшення опору, який необхідно подолати;
- покращення керованості ТЗ;
- підвищення інтервалів обслуговування;
- покращення екологічних показників;
- загальне зниження вартості перевезень внаслідок п1–п4.

Аеродинамічний опір автомобіля зумовлюється його рухом у навколишньому повітряному середовищі з деякою відносною швидкістю. Сила опору повітря – основна складова силового балансу автомобіля, вона має найбільш важливе значення через останні тенденції, а саме – зростання швидкостей пересування транспортних засобів.

Проблему аеродинаміки автомобілів необхідно вирішувати незалежно від типу і розмірів транспортного засобу. Зменшення аеродинамічного опору критичне як для легкових автомобілів, так і для вантажних, спортивних тощо. Опір повітря утворюється в процесі тертя повітряних шарів по поверхні автомобіля; зоною низького тиску позаду авто; при стисканні повітря машиною під час руху; завихреннями у шарах повітря, що оточують автомобіль. У разі зростання швидкості транспортного засобу сила аеродинамічного опору повітря зростає у квадратичній залежності до швидкості руху, тому

питання зменшення опору повітря є нагальним. У разі швидкості руху авто 60 км/год сила опору повітря є більшою за будь-яку іншу силу опору руху транспортного засобу, а у разі зростання швидкості до 110–130 км/год вона перевищує сили інерції та силу супротиву дороги разом узятих [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більша частина всього опору повітря складається з опору форми (лобового опору та опору тиску). Він може досягати 60 % від загального значення. Механізм виникнення цього виду опору такий: при русі проти зустрічного потоку повітря передня частина автомобіля стискає його та утворює попереду зону підвищеного тиску; саме тоді потік повітря обтікає контури кузова ТЗ, після чого повністю відривається від кузова й утворює зону низького тиску позаду нього з подальшими завихреннями повітря, що надходить із навколишнього середовища. Через нерівномірність покриття поверхні транспортного засобу утворюється так званий опір тертя. У цьому разі повітряний шар контактує з мікросчілинами на поверхні кузова ТЗ і внаслідок цього сповільнюється. Частка цього виду опору становить 10–20 % усіх аеродинамічних витрат. 10–15 % загального опору створюють рухомі та висувні частини кузова ТЗ. На цей фактор впливають об'ємні частини авто, які виступають за межі контуру його кузова, та отвори і порожнини в суцільній поверхні, наприклад: на 10 % сила опору повітря зростає через підняті вночі висувні фари; на 5 % – при відчинених вікнах та на 2–5 % – при відчиненому люкові в даху; при встановленні на всі колеса брудозахисних фартухів – на 3 %; зовнішні дзеркала заднього виду збільшують опір на 5–7 %, а багажник на даху – на 10–12 %; широкопрофільні шини збільшують опір повітря на 2–4 %; антена – на 2 % [1].

Сила опору повітря визначається за формулою:

$$P_w = c_x \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{v_a^2}{2} = k_w \cdot F \cdot v_a^2, \text{ Н}$$

де  $c_x$  – коефіцієнт обтічності;  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – площа лобового опору, м<sup>2</sup>;  $v_a$  – швидкість відносного руху повітря й автомобіля, м/с;  $k_w$  – коефіцієнт опору повітря, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup> [2].

З аналізу цієї формули бачимо, що основну увагу необхідно приділяти опору повітря, а саме заходам, спрямованим на зменшення коефіцієнта лобового опору.

У сучасних умовах значна частина вантажообігу між містами та країнами забезпечується автопоїздами, і якщо вантажні автомобілі в містах пересуваються відносно повільно, то на магістралях їхня швидкість співвимірні з швидкістю легкових автомобілів. Тому зниження аеродинамічного опору – дуже важливе завдання, адже кожні 2 % зниження лобового опору автомобіля приносять 1 % покращення паливної економічності. Порівняно з легковими автомобілями вантажні мають значно більший поперечний переріз і більш незграбні обриси. Це пояснюється особливостями їх призначення та використання. Під час створення універсального вантажного автомобіля намагаються отримати якомога більший обсяг для розміщення вантажу при мінімальній площі, яку займає автомобіль на дорозі, а оскільки частина цієї площі припадає на двигун і кабінку, то природно, що кузов виходить високим (йдеться саме про вантажний кузов, закритий тентом або обмежений твердими стінками). Отже, якщо одним зі шляхів зниження аеродинамічного опору легкового автомобіля є зменшення його поперечного перерізу, насамперед висоти, то для магістрального вантажного автомобіля або автопоїзда цей варіант відпадає. Можливості покращення аеродинаміки вантажного автомобіля та автопоїзда, призначеного для руху з великою швидкістю, обмежені оптимізацією деталей та застосуванням різних накладних елементів [3].

Тягачі магістральних автопоїздів найчастіше мають безкапотне компонування, тобто передня стінка кабіни в нижній частині розташована майже вертикально, а у верхній – із деяким нахилом назад. Передня стінка кузова-фургона вертикальна, плоска, що суттєво виступає вгору над дахом кабіни. Ширина цієї стінки більша за ширину кабіни. Особливо у разі безкапотного компонування під час руху потік повітря піднімається лобовою частиною кабіни, утворює завихрення та зону зниженого тиску над її дахом, потім наштовхується на передню стінку кузова, на якій створюється підвищений тиск, піднімається над дахом кузова, де так само, як над дахом кабіни, утворюються вихори та зона розрідження. Великий вплив на формування процесу обтікання повітрям автопоїзда має величина зазорів між кабіною та кузовом та між автомобілем-тягачем і причепом, якщо автопоїзд багатоланковий. Картина ускладнюється, якщо рух відбувається за бокового вітру, коли потік повітря набігає під деяким кутом до поздовжньої осі автопоїзда.

Основним напрямом поліпшення аеродинаміки магістральних автопоїздів є вдосконалювання їхніх аеродинамічних характеристик шляхом оптимізації конструктивних параметрів, що впливають на обтічність, до яких входять:

- відпрацьовування форми кабіни загалом та її лобової панелі з усуненням невеликих виступаючих елементів;
- зменшення величини перевищення кузова над кабіною;
- збільшення кута нахилу лобового скла кабіни;
- застосування вкороченої, обтічної, високої кабіни з розміщенням у її верхній частині спального місця водія;
- використання гладких суцільнометалевих кузовів та зменшення на них кількості невеликих конструктивних елементів;
- збільшення радіуса закруглення фронтальних крайок кабіни (збільшеної висоти – до 75...150 мм, високих обтічних – до 150...450 мм);
- зменшення відстані між кабіною і кузовом (для сидільних автопоїздів) і між тягачем і причепом (для причіпних) до мінімально необхідного для забезпечення кінематики повороту автопоїзда;
- оптимізація сполучення кабіни й кузова з урахуванням їхньої форми і взаємного впливу при роботі у складі автопоїзда;
- зменшення відстані від переднього бампера до дороги і використання елементів плоского днища на тягачі для зниження аеродинамічних втрат у зоні під днищем;
- відпрацьовування систем забору і випуску повітря для охолодження двигуна та вентиляції кабіни;
- поліпшення характеру обтікання кормової частини автопоїзда для зменшення зони негативних тисків на задній стінці кузова та супутнього за ним сліду;
- застосування замість здвоєних коліс одинарних із широкопрофільними або низькопрофільними шинами, закритих нижніми бічними щитками [4].

Серед перерахованих конструктивних заходів, які стосуються вдосконалення аеродинаміки магістральних автопоїздів, найефективнішим є покращення обтічності головної їхньої частини, що залежить від форми і типу кабіни.

На сьогоднішній день спостерігається тенденція до використання на магістральних автопоїздах кабіни збільшеної висоти, чий показник обтічності значно кращі, ніж серійних низьких. Причина цього полягає у досконалішій формі їхньої лобової панелі, а також у наданні фронтальним крайкам більших радіусів закруглення. Для закруглення нижньої фронтальної крайки під переднім бампером встановлюють нижній обтікач.

За умови правильно спроектованої лобової панелі висока обтічна кабіна може мати безвідривне обтікання, а враховуючи, що така кабіна має однакову ширину і висоту з кузовом, то при мінімізації зазору між ними будуть створюватись умови для перетікання повітряного потоку з поверхні кабіни безпосередньо на дах та бічні стінки кузова. Висока кабіна ТЗ сприяє помітному зменшенню аеродинамічного опору автопоїзда порівняно з машинами із низькою кабіною у всьому діапазоні зміни кута набігання потоку. Водночас найбільше зниженню коефіцієнта  $C_x$  аеродинамічного опору автопоїзда сприяє встановлення високої кабіни з еліптичною лобовою поверхнею та значними радіусами закруглення на бічних фронтальних крайках.

Використання зовнішніх аеродинамічних пристроїв є ще одним напрямом поліпшення обтічності магістральних автопоїздів. Встановлення навісних аеродинамічних елементів дає змогу без зміни основних формоутворюючих елементів кабіни та кузова і без збільшення капіталовкладень суттєво покращити аеродинамічні характеристики магістральних автопоїздів. Рівень ефективності застосування на ТЗ зовнішніх аеродинамічних пристроїв загалом визначається доцільністю їхнього встановлення на будь-який автопоїзд, а також правильністю вибору типу пристрою та місця його розташування.

### Результати досліджень

Для вивчення аеродинаміки автомобілів користуються двома основними методами: комп'ютерним моделюванням та випробуваннями в аеродинамічній трубі. Аеродинамічні труби для випробування транспортних засобів часом оснащують рухомою доріжкою, яка імітує рухоме дорожнє полотно. Крім того, колеса автомобіля, який проходить випробування, також обертаються. Ці заходи вживають для того, щоб якомога повніше врахувати вплив дорожнього полотна та обертання коліс на рух потоків повітря [5].

Нами було проведено дослідження залежності аеродинамічного опору від відстані між кабіною та напівпричепом автопоїзда [6].

Одним із варіантів точного визначення величини сили опору повітря є засноване на системі кінцевих елементів комп'ютерне моделювання.

Для розрахунку потоків повітря використовується, наприклад, таке програмне забезпечення, як SolidWorksFlowSimulation та AnsysFluent.

Розрахунок складається з таких етапів: побудова твердотільної моделі (рис. 1); побудова сітки кінцевих елементів; додавання моделі до модуля розрахунку; задавання вхідних умов для розрахунку; обробка результатів [6].

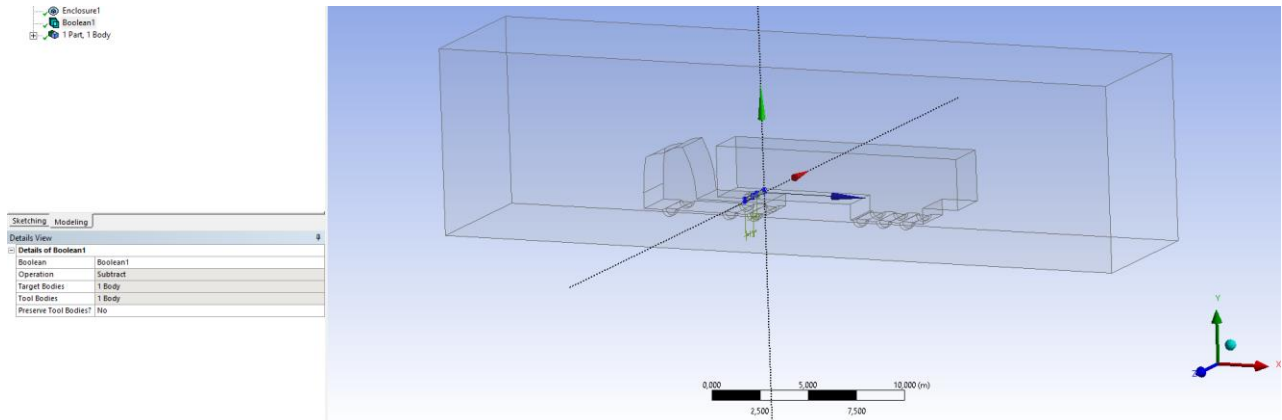


Рис. 1. Тривимірна твердотільна модель автопоїзда

Комп'ютерне моделювання дає змогу спростити, прискорити та здешевити процес розрахунків і проектування моделей завдяки можливості застосування нових рішень, не потребуючи побудови фізичних моделей та їхньої перевірки в аеродинамічній трубі [6].

Отже, з наших досліджень можна бачити місця найбільшого опору (рис. 2).

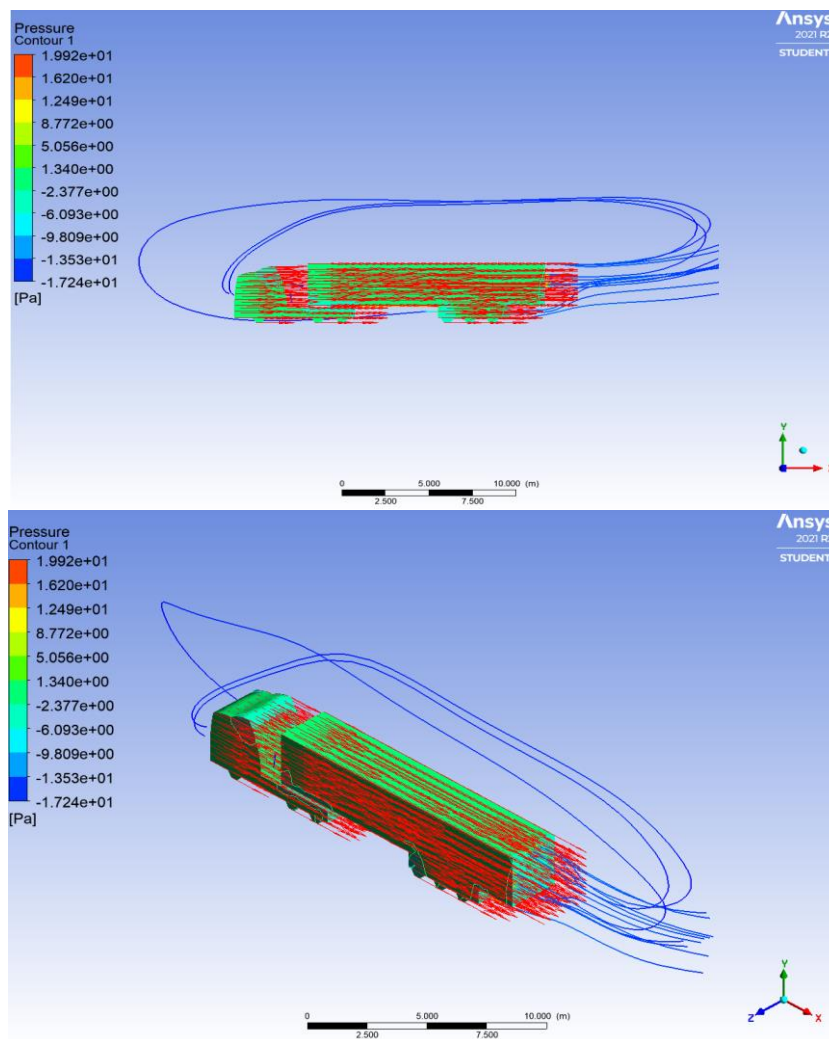


Рис. 2. Зони найвищого тиску

З рис. 2, видно, що місцями найбільшого опору є область між кабіною і напівпричепом та область коліс. Окрім цього, через таку геометрію напівпричепа створюється повітряний потік, який тягне за собою сильні завихрення, які теж значно впливають на аеродинамічний опір автопоїзда.

Під час виконання роботи було проведено дослідження тиску при відстані між кабіною і напівпричепом від 0 до 2 метрів із кроком 20 см. Результати дослідження представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність тиску від відстані між кабіною і напівпричепом

Відстань	Значення тиску, Pa	Тиск, Pa
0	3,406e-02	0,03406
0,2	0	0
0,4	7,371e-03	0,007371
0,6	4,652e-03	0,004652
0,8	7,040e-02	0,0704
1	0,000e+00	0
1,2	3,912e-02	0,03912
1,4	0,000e+00	0
1,6	-8,869e-05	-0,00008869
1,8	5,371e-02	0,05371
2	0	0

Графічно ця залежність проілюстрована на рисунку 3.

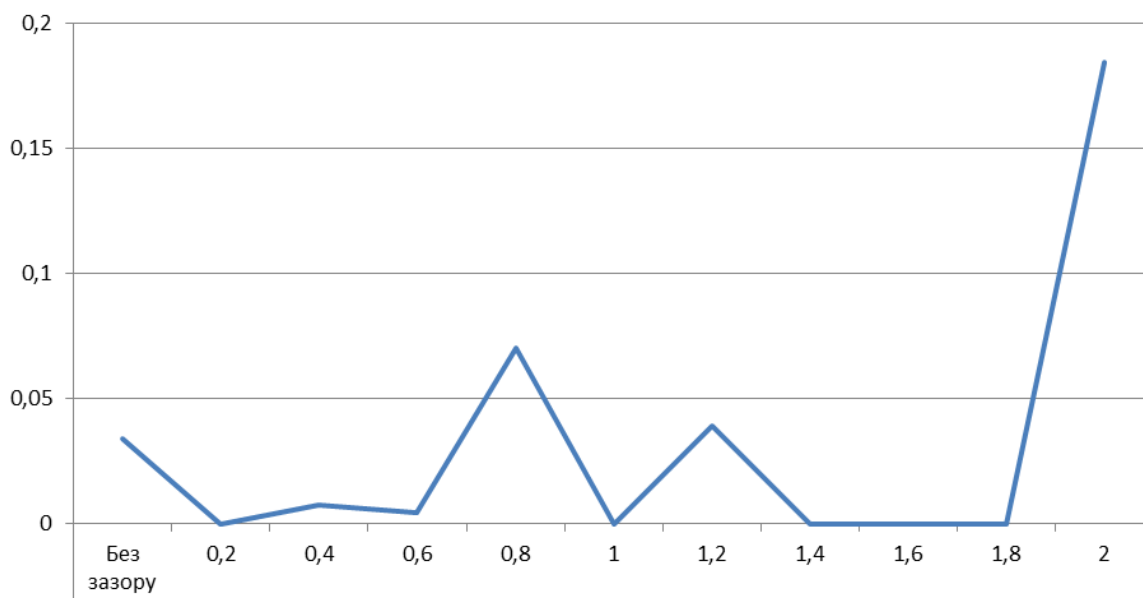


Рис. 3. Залежність тиску від відстані між кабіною і напівпричепом

З огляду на проведені дослідження, пропонуються такі варіанти покращення конструкції магістральних автопоїздів, а саме:

- скорочення відстані між кабіною водія та напівпричепом;
- встановлення аеродинамічного обвісу для зменшення опору повітря в області коліс;
- встановлення обтічників на кабіні автопоїзда;
- встановлення спойлерів для кращого зрізання завихрень за автопоїздом [6].

### Висновки

На основі представлених досліджень визначено, що оптимальною відстанню між кабіною та напівпричепом вважається проміжок від 0,2 до 0,6 м та проміжок від 1,4 до 1,8 м, що дасть змогу зменшити аеродинамічний опір автопоїздів. Практична цінність цього дослідження полягає у підвищенні експлуатаційних характеристик автопоїздів, підвищенні надійності рухомого складу та збільшення інтервалів технічного обслуговування, що сприяє зниженню витрат на перевезення вантажів, а також покращує екологічні характеристики.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мелхіседеків Т. І. Устрої, що забезпечують покращення аеродинаміки транспортних засобів категорії М2. *Збірка наукових праць студентів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2019. С. 46–50.
- [2] Дослідження аеродинамічних показників автопоїзда методом фізичного моделювання / Опанасюк Є. Г., Бегерський Д. Б., Можаровський М. М., Опанасюк О. Є. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2019. № 1(83). С. 25–34.
- [3] Пилипенко О. М., Батраченко О. В., Литовченко І. М. Моделювання аеродинаміки сідельного автопоїзда. *Вісник Хмельницького національного університету: науковий журнал. Технічні науки*. 2017. № 2. С. 27–33.
- [4] Бегерський Д. Б., Коваль А. О. Вплив геометричних параметрів автопоїзда на його аеродинамічні характеристики. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези XV міжнародної науково-практичної конференції, 24–26 жовтня 2022 року*. Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 23–24.
- [5] Дослідження аеродинамічних характеристик автомобіля шляхом комп'ютерного моделювання / Бегерський Д. Б., Опанасюк Є. Г., Кубрак Ю. О., Коваль А. О. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки, 11–15 травня 2021 року*. Житомир: Житомирська політехніка, 2021. С. 3–4.
- [6] Авершин А. Г. Вдосконалення аеродинамічних характеристик автомобілів для спорту методами чисельного і натурального експерименту: дис. канд. техн. наук : 05.22.02 / М-во освіти і науки України, ХНАДУ. Харків, 2018. 182 с.

**Бегерський Дмитро Богданович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, e-mail: [amts\\_bdb@ztu.edu.ua](mailto:amts_bdb@ztu.edu.ua)

**Вітюк Іван Васильович** – старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій, e-mail: [amts\\_viv@ztu.edu.ua](mailto:amts_viv@ztu.edu.ua)

**Коваль Андрій Олегович** – здобувач, e-mail: [asp\\_kao@student.ztu.edu.ua](mailto:asp_kao@student.ztu.edu.ua)

Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир

**Цимбал Сергій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: [tsymbal\\_s\\_v@ukr.net](mailto:tsymbal_s_v@ukr.net)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**D. Begerskyi<sup>1</sup>**  
**S. Tsymbal<sup>2</sup>**  
**I. Vityk<sup>1</sup>**  
**A. Koval<sup>1</sup>**

## Influence of the geometric parameters of the vehicle on its aerodynamic characteristics

<sup>1</sup>Zhytomyr Polytechnic State University  
<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*In the article, the authors analyzed the relevance of the research topic, defined the goal, task, subject and object of the research. They also provided an analysis of well-known studies related to the study of the peculiarities of the formation of air resistance during the movement of motor vehicles. On the basis of the analysis of known studies on the factors affecting the geometric parameters of road trains on aerodynamic resistance, the relevance of the studies is substantiated, and their purpose and tasks are formulated.*

*The purpose of the article is to determine the influence of geometric parameters of road trains on their aerodynamic characteristics and, as a result, on fuel consumption, and therefore on the cost of transport work. The tool for researching this issue is software, which will be used to conduct a number of experiments. Every year, road trains move millions of kilometers of various goods, and on such a scale, the price of each individual kilometer plays a very important role. Based on the analysis of the power balance equation, it can be concluded that a significant part of the engine power is spent on overcoming air resistance, and the higher the speed of the road train, the greater this resistance.*

*The relevance of research lies in the possibility of reducing costs through the adoption of a number of decisions to reduce the aerodynamic resistance of road trains.*

*The mechanism of air resistance is considered. It has been found that reducing aerodynamic drag is a very important task, as every 2% reduction in vehicle drag results in a 1% improvement in fuel economy. Compared to passenger cars, trucks have a much larger cross-section and more clumsy outlines. This is caused by the specifics of their purpose and use. When creating a universal truck, they try to get as much volume as possible to accommodate cargo with the minimum area occupied by the car on the road, and since part of this area is the engine and cabin, it is natural that the body is high. So, if one of the ways to reduce the aerodynamic resistance of a passenger car is to reduce its cross-section, first of all, its height, then another option should be found for a highway truck or road train.*

**Key words:** road train; air resistance; air flow; swirling air flow.

**Dmytro Begerskyi** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, e-mail: [amts\\_bdb@ztu.edu.ua](mailto:amts_bdb@ztu.edu.ua)

**Serhii Tsymbal** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automobiles and Transport Management, e-mail: [tsymbal\\_s\\_v@ukr.net](mailto:tsymbal_s_v@ukr.net)

**Ivan Vityk** – Senior lecturer at the Department of Automobiles and Transport Technologies, e-mail: [amts\\_viv@ztu.edu.ua](mailto:amts_viv@ztu.edu.ua)

**Andriy Koval** – postgraduate, e-mail: [asp\\_kao@student.ztu.edu.ua](mailto:asp_kao@student.ztu.edu.ua)