

Д.Б. Бегерський, к.т.н., доц.

І.В. Вітюк, ст. викладач

А.О. Коваль, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Залежність витрати пального від аеродинаміки автопоїзда

Представлено результати аналізу впливу аеродинамічних характеристик автопоїзда на його паливну економічність. На основі аналізу відомих досліджень, рівняння балансу потужності та відомого рівняння шляхової витрати палива показано, що опір повітря суттєво впливає на показники паливної економічності. Проаналізувавши рівняння сили опору повітря з урахуванням відомих досліджень, зроблено висновки про те, що одним із ключових параметрів, які впливають на аеродинаміку автопоїзда, є відстань між кабіною і напівприцепом. Представлено результати комп'ютерного моделювання аеродинаміки дволанкового автопоїзда. Запропонована модель дає змогу показати, що відстань між кабіною та напівприцепом нелінійно впливає на сумарний опір повітря, виражений через приведений тиск. Така залежність дозволяє зробити припущення про можливість оптимізації вказаної відстані за критерієм мінімального опору повітря. Встановлено, що використання таких технологій, як аеродинамічні панелі, може суттєво покращити характеристики аеродинаміки автопоїзда, що зокрема буде позитивно впливати на паливну економічність та інші експлуатаційні характеристики автопоїзда. Наведено реальний приклад того, як зниження коефіцієнта легкості руху, який враховує зокрема і опір повітря, впливає на витрату палива. Показано, що зниження коефіцієнта легкості руху усього на 0,04 одиниці призводить до зменшення витрати палива на 11%. Доведено, що вплив геометрії автопоїзда, а саме відстані між кабіною і напівприцепом, на показники аеродинаміки та паливної економічності потребує подальшого дослідження як шляхом комп'ютерного моделювання, так і шляхом досліджень фізичних моделей автопоїздів в аеродинамічній трубі.

Ключові слова: автопоїзд; опір повітря; паливна економічність; напівприцеп; комп'ютерне моделювання.

Актуальність теми. У сучасних умовах значна частина перевезень вантажів між містами і країнами виконується за допомогою автопоїздів та вантажних автомобілів. Актуальною проблемою для вантажних автомобілів є питання зниження витрат палива, яке виникає через великий коефіцієнт лобового опору цих автомобілів. Чим вище цей коефіцієнт, тим більше потужності двигуна витрачається на подолання опору, що призводить до збільшення витрат палива та скорочення пробігу на одній заправці.

Якщо вантажні автомобілі рухаються у містах досить повільно, то на швидкісних трасах їхні швидкості наближаються до швидкостей легкових автомобілів. Тому зниження аеродинамічного опору стає важливим завданням. Порівняно з легковими автомобілями, вантажні авто мають більший поперечний переріз та менш плавні обриси через своє призначення та використання.

Під час розробки універсальних вантажних автомобілів намагаються отримати максимальний об'єм для вантажу за мінімальної площі, яку автомобіль займає на дорозі. Оскільки частина цієї площі припадає на двигун і кабіну, то сам вантажний кузов виходить високим. Тому шлях зменшення поперечного перерізу, передусім висоти, не є можливим для вантажних автомобілів.

Метою статті є виявлення залежності витрати пального від аеродинаміки автопоїзда за допомогою комп'ютерного моделювання.

Огляд проблеми. Аеродинаміка в автотранспорті відіграє важливу роль у витратах пального та інших експлуатаційних властивостях автопоїздів. Один з ключових аспектів цієї проблеми – відстань між кабіною і напівприцепом, яка значно впливає на опір повітря та паливну економічність. У цьому дослідженні розглянуто важливість аеродинамічного дизайну для зменшення витрати пального та покращення експлуатаційних характеристик автопоїздів [1].

Для чисельного опису будемо використовувати рівняння потужнісного балансу:

$$N_T = (N_D + N_B + N_H) \frac{r_D}{r_K}, \quad (1)$$

де N_T – тягова потужність;

N_D – потужність, що витрачається на подолання опору дороги;

N_B – потужність, що витрачається на подолання опору повітря;

N_H – потужність, що витрачається на розгін автомобіля [3].

Тобто, необхідна для подолання опору руху потужність витрачається на подолання опору коченню коліс, опору підйому, сили інерції автомобіля; опору повітря [2].

За рівномірного руху по горизонтальній ділянці дороги потужність витрачається тільки на подолання опору дороги і повітря. Ступінь використання потужності двигуна Ψ – це відношення потужності, необхідної для руху авто, до потужності яку може розвивати двигун, при повному навантаженні:

$$\Psi = \frac{N_d + N_e}{N_T} \quad (2)$$

Чим менший коефіцієнт Ψ і швидкість транспортного засобу, тим більше необхідне передаточне число трансмісії, тим гірше використовується потужність двигуна [3].

Як відомо [10], шляхова витрата палива прямо пропорційно залежить від сили опору повітря і визначається за формулою:

$$Q_s = \frac{g_e(P_f \pm P_h \pm P_j + P_w)}{36000 \cdot \rho_n \cdot \eta_m}, \quad (3)$$

де g_e – питома годинна витрата палива;

P_f – сила опору коченню;

P_h – сила опору при русі на підйом;

P_j – сила опору інерції;

P_w – сила опору повітря;

ρ_n – густина палива;

η_m – коефіцієнт механічних втрат у трансмісії автомобіля.

Якщо розглядати рівномірний рух автомобіля на горизонтальній ділянці дороги, то для конкретного автомобіля шляхова витрата палива буде залежати від величин сил опору коченню і опору повітря. Сила опору повітря [9] визначається за формулою (4):

$$P_w = c_x \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{V_a^2}{2}, \quad (4)$$

де c_x – коефіцієнт лобового опору (коефіцієнт обтічності);

ρ – густина повітря;

F – площа проєкції автомобіля на площину, перпендикулярну його поздовжній осі (площа лобового опору);

V_a – швидкість відносного руху повітря і автомобіля.

З аналізу наведеної формули (4) видно, що складова ρ не залежить від розробників автомобіля, складові F та V_a не можуть бути суттєво зменшені, оскільки впливають на розміри вантажу, що перевозиться, і на транспортну продуктивність автомобіля. Тому при розробці конструкцій автомобілів з точки зору зменшення аеродинамічних втрат велика увага приділяється впровадженню заходів із зниження коефіцієнта лобового опору.

Аналіз відомих публікацій за визначеною проблемою. Автори В.Б. Надобко та М.О. Скорик [2] дійшли висновків, що показники аеродинаміки автомобілів і автопоїздів суттєво впливають на їх динамічний фактор, який у свою чергу може слугувати показником для порівняння транспортної ефективності різних транспортних засобів у заданих умовах руху.

Josefsson E. у своїй магістерській роботі [5] стверджує, що точність визначення показників аеродинаміки автобуса методами комп'ютерного CFD моделювання не поступається, а іноді навіть і перевищує точність натурних досліджень в аеродинамічній трубі і доводить це на конкретних прикладах.

Опанасюк Є.Г. та інші у роботі [6], на основі аналізу відкритих джерел про різні комбінації тягачів та напівпричепів, показують, що для більшості таких комбінацій відстані від кабіни до напівпричепа лежать у дуже вузьких межах. Крім того, у цій же роботі на основі фізичної моделі дволанкового автопоїзда показано, що відстань від кабіни до напівпричепа суттєво впливає на сумарну силу опору повітря.

Таким чином, можна зробити висновки, що дослідження аеродинаміки автопоїздів та пошук нових способів зниження сил опору повітря є актуальним завданням. Крім того, можна стверджувати, що, незважаючи на значну кількість вітчизняних та закордонних досліджень аеродинамічних характеристик автопоїздів, дослідники не мають достатньо повної інформації про вплив на аеродинаміку автопоїзда його геометричних особливостей, пов'язаних із взаємним розташуванням тягача і напівпричепа. А з урахуванням щорічних обсягів перевезень, що здійснюються автопоїздами у світі, завдання економії палива виходить на провідне місце, і аеродинамічні характеристики автопоїздів можуть стати суттєвим резервом для підвищення паливної економичності.

Роль аеродинаміки у витратах пального. Опір повітря є однією з основних сил, які сприяють збільшенню витрат пального на дорозі. Високий опір повітря виникає внаслідок взаємодії між автомобілем і повітрям під час руху на великих швидкостях. Підвищення аеродинамічної ефективності автопоїзда, зменшення опору повітря та оптимізація форми кузова можуть значно знизити витрати пального та поліпшити показники паливної економичності.

Фахівці для створення аеродинамічної моделі розраховують розподіл по осях підйомної сили, що дуже важливо з урахуванням чималих швидкостей сучасних автомобілів; забезпечують доступ повітря для охолодження двигуна і гальмівних механізмів; продумують місця забору і виходу повітря для системи вентиляції салону; прагнуть знизити рівень шумів у салоні; оптимізують форму деталей кузова для зменшення забруднення стекол, дзеркал і світлотехніки [4].

Вибір типу причепа для щоденної роботи суттєво впливає на аеродинамічне обладнання та ефективність використання пального. Наприклад, моделювання показує, що поєднання дахового дефлектора та бічних дефлекторів може зменшити споживання пального на 4–5 % під час звичайних перевезень на великі відстані.

Залежно від конфігурації причепа рівень економії пального може відрізнятись. Це пов'язано з тим, що при виході повітря із задньої частини кабіни воно створює значний опір повітря, який може впливати на аеродинамічні властивості. Причому вирішення одного завдання часто суперечить виконанню іншого. Наприклад, зниження коефіцієнта лобового опору покращує обтічність, але одночасно погіршує стійкість автомобіля до поривів бічного вітру. Тому треба шукати розумний компроміс [5].

Відстань між кабіною і напівприцепом є критичним аспектом аеродинаміки автопоїзда. Велика відстань між цими двома частинами призводить до утворення великої турбулентної області позаду кабіни, що підвищує сумарний опір повітря. Це призводить до збільшення витрати пального. З іншого боку, оптимальна форма і розташування напівпричепа може допомогти зменшити цей опір, покращити аеродинаміку та знизити витрати пального.

Аналіз конструкцій засобів зниження аеродинамічного опору автопоїздів свідчить про те, що в основному автовиробниками увага приділяється покращенню показників обтічності передньої частини транспортного засобу, бічних поверхонь, задньої частини. Недостатньо уваги приділяється частині між кузовом тягача і причепом, напівприцепом і причепом (рис. 1). У результаті зазори між ними стають джерелами завихрень потоку повітря, що призводить до збільшення аеродинамічного опору. При цьому, якщо врахувати, що швидкості руху магістральних автопоїздів становлять 70...90 км/год і квадратичну залежність сили опору повітря від швидкості, то можна зробити висновок про суттєві енерговитрати на подолання сили опору повітря і необхідність проведення робіт із їх зниження [6].

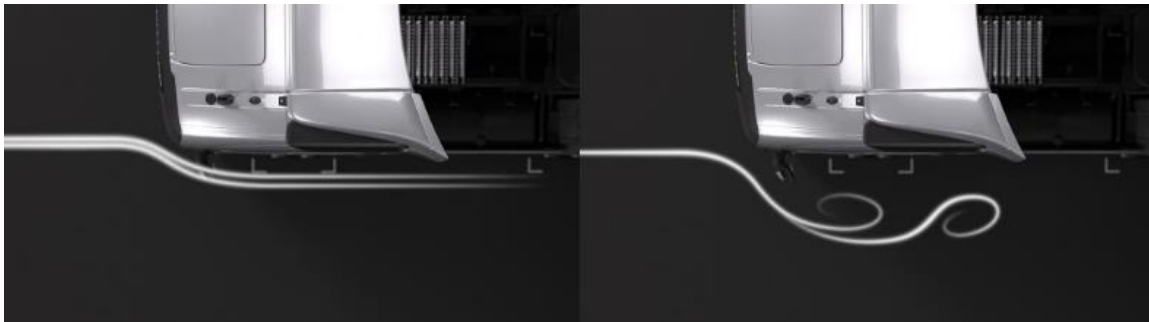


Рис. 1. Завихрення повітря у передній частині автопоїзда

Для визначення впливу цих параметрів були проведені дослідження [6–7], в результаті яких було встановлено значний вплив відстані між кабіною водія та напівприцепом автопоїзда на показники сумарного опору повітря.

Вивчення аеродинаміки автомобілів проводиться двома основними методами: аеродинамічні випробування та комп'ютерне моделювання. Під час аеродинамічних випробувань у спеціальних трубах, іноді з рухомою доріжкою та обертовими колесами, автомобілі піддаються тестуванню, щоб врахувати вплив дорожнього покриття та рухомих коліс на повітряні потоки [10]. Використання комп'ютерного моделювання дозволяє спростити, пришвидшити і зекономити витрати на процеси розрахунків і дизайну моделей. Це досягається завдяки можливості впровадження нових рішень без необхідності будувати фізичну модель та проводити експерименти в аеродинамічній трубі [11].

Експериментальні дослідження. У нашій роботі ми досліджували, як аеродинамічний опір залежить від відстані між кузовом та напівприцепом автопоїзда методами комп'ютерного моделювання. Один із методів точного визначення цього опору – це комп'ютерне моделювання, засноване на методі кінцевих елементів. Для цього використовуються програми, такі як SolidWorks Flow Simulation і Ansys Fluent. Процес моделювання містить такі етапи:

- створення твердотільної моделі;
- побудова сітки кінцевих елементів;
- інтеграція моделі у модуль обчислень;
- задання вхідних умов для розрахунків;
- обробка отриманих результатів [11].

Моделювання [7] показало, що різниця відстаней між кабіною та напівприцепом у 20 см може суттєво змінювати показники приведенного тиску повітря, причому залежність має нелінійний характер, що дає змогу говорити про можливість оптимізації цього параметра за критерієм мінімального сумарного опору повітря (табл. 1).

Залежність тиску від відстані між кабіною і напівпричепом

Відстань, м	Тиск, Pa
0	0,03406
0,2	0
0,4	0,007371
0,6	0,004652
0,8	0,0704
1	0
1,2	0,03912
1,4	0
1,6	-0,00008869
1,8	0,05371
2	0

Виходячи з результатів досліджень, можемо бачити місця найбільшого опору (рис. 2, 3).

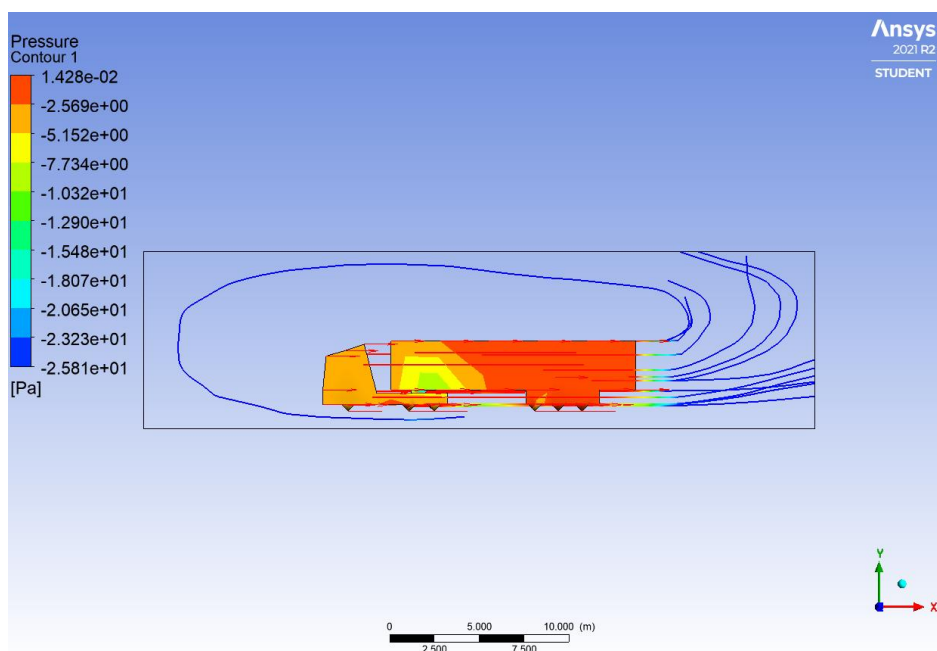


Рис. 2. Зони тиску автопоїзда з мінімальною відстанню між кабіною і напівпричепом

Виходячи з цих даних, можна стверджувати, що при загальнорічних пробігах автопоїздів у мільйони кілометрів навіть незначні зміни у аеродинаміці прямо впливають на витрату палива. При зниженні аеродинамічного опору навіть на 1–2 % ми отримуємо підвищення надійності та ресурсу транспортних засобів, зниження витрат на обслуговування та ремонт, а також зниження витрати палива.

Сучасні досягнення в галузі аеродинаміки та інновації мають ключове значення для зменшення витрат пального в транспорті. Використання обтічних дзеркал, автоматично регульованих аеродинамічних панелей та інших технологічних рішень дозволяє автомобілям та поїздам мінімізувати опір повітря. Ці інновації особливо корисні для автомобілів з поганими аеродинамічними характеристиками. Як приклад можна вказати покращення коефіцієнта легкості руху (C_x) на автомобілі «Остін Алегро ВЛ». Зменшення C_x з 0,44 до 0,40 призвело до зниження витрат пального на 11 % [8]. Ці технології розробляються, враховуючи останні принципи аеродинаміки і автоматично регулюються в реальному часі, щоб забезпечити найкращу продуктивність і ефективність споживання пального.

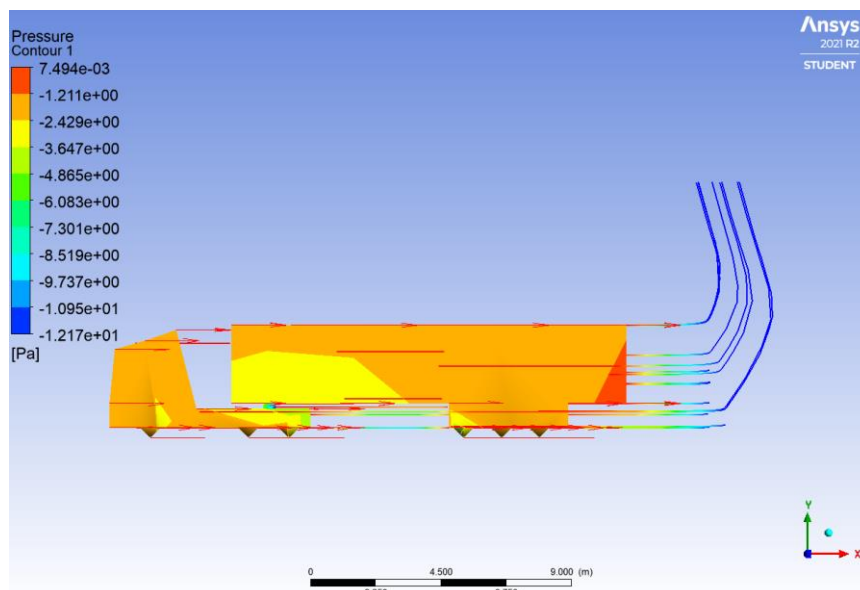


Рис. 3. Зони тиску автопоїзда з максимальною відстанню між кабіною і напівпричепом

Висновки. Аеродинаміка великого вантажного автопоїзда має велике значення для зменшення витрати пального та поліпшення експлуатаційних характеристик. Як показують результати комп'ютерного моделювання, оптимізація відстані між кабіною та напівпричепом, яка нелінійно впливає на силу опору повітря, може знизити опір повітря, що у свою чергу призведе до зменшення витрати палива. Використання сучасних технологій та інновацій, а також ретельний аналіз впливу аеродинаміки дозволяють автопоїздам стати більш економічними та екологічно стійкими. Реальні приклади показують, що зменшення коефіцієнта легкості руху, який враховує і аеродинамічний опір, усього на 0,04 одиниці призводить до зменшення витрати палива на 11 %.

Список використаної літератури:

1. Кожушко А.П. Ергономічні властивості та екологія транспортних засобів : навчальний посібник / А.П. Кожушко, Є.І. Калінін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – 352 с.
2. Надобко В.Б. Динамічний фактор як показник для порівняння різних типів автомобілів / В.Б. Надобко, М.О. Скорик // Тези 62-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, 23 квітня – 13 травня. – Т. 3. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – С. 18–20.
3. Волков В.П. Теорія руху автомобіля : підручник / В.П. Волков, Г.Б. Вільський. – Суми : Університетська книга, 2015. – 320 с.
4. Katz J. Automotive Aerodynamics / J.Katz // Bentley Publishers. – UK : Cambridge, 2015. – 561 p.
5. Josefsson E. Examination of robustness and accuracy of CFD simulations for external aerodynamics of commercial vehicles : Master's thesis 2019:12 / E.Josefsson // Department of Mechanics and Maritime Sciences Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2019. – 89 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://odr.chalmers.se/items/98b2a810-776b-4474-bc09-28043fba30a8>.
6. Дослідження аеродинамічних показників автопоїзда методом фізичного моделювання / Є.Г. Опанасюк, Д.Б. Бегерський, М.М. Можаровський, О.Є. Опанасюк // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – Вип. 1 (83). – С. 25–34. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-25-3.
7. Бегерський Д.Б. Вплив геометричних параметрів автопоїзда на його аеродинамічні характеристики / Д.Б. Бегерський, А.О. Коваль // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : Тези XV міжнародної науково-практичної конференції, 24–26 жовтня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2022. – С. 23–24.
8. Автомобільні кузови : навч. посіб. Ч. 1 / О.М. Артюх, О.В. Дударенко, В.В. Кузьмін та ін. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 292 с.
9. Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars / R.Hassan, T.Islam, M.Ali, Q.Islam // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 90. – P. 308–313.
10. Пилипенко О.М. Моделювання аеродинаміки сидельного автопотягу / О.М. Пилипенко, О.В. Батраченко, І.М. Литовченко // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Технічні науки. – 2017. – № 2. – С. 27–33.
11. Дослідження аеродинамічних характеристик автомобіля шляхом комп'ютерного моделювання / Д.Б. Бегерський, Є.Г. Опанасюк, Ю.О. Кубрак, А.О. Коваль // Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 11–15 травня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2021. – С. 3–4.

References:

1. Kozhushko, A.P. and Kalinin, Ye.I. (2022), *Erhonomichni vlastyvoli ta ekolohiia transportnykh zasobiv, navchalnyi posibnyk*, NTU «KhPI», Kharkiv, 352 p.

- Nadobko, V.B. and Skoryk, M.O. (2010), *Dynamichniy faktor yak pokaznyk dlia porivniannia riznykh typiv avtomobiliv*, PolNTU, Poltava, Vol. 3, pp. 18–20.
- Volkov, V.P. and Vil'skiy, H.B. (2015), *Teoriia rukhu avtomobilia: pidruchnyk*, Universytetska knyha, Sumy, 320 p.
- Katz, J. (2015), *Automotive Aerodynamics*, Bentley Publishers, Cambridge, UK, 561 p.
- Josefsson, E. (2019), «Examination of robustness and accuracy of CFD simulations for external aerodynamics of commercial vehicles», Master's thesis, Department of Mechanics and Maritime Sciences Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 89 p., [Online], available at: <https://odr.chalmers.se/items/98b2a810-776b-4474-bc09-28043fba30a8>
- Opanasyuk, E., Beherskiy, D., Mozharovskiy, M. and Opanasyuk, A. (2019), «Doslidzhennia aerodynamichnykh pokaznykiv avtopoizda metodom fizychnoho modeliuвання», *Visnyk ZhDTU, Seriya Tekhnichni nauky*, Vol. 1 (83), pp. 25–34, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-25-3.
- Beherskiy, D.B. and Koval, A.O. (2022), «Vplyv heometrychnykh parametriv avtopoizda na yoho aerodynamichni kharakterystyky», *Suchasni tekhnologii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu, tezy KhV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 24–26 zhovtnia, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 23–24.
- Artiukh, O.M., Dudarenko, O.V., Kuzmin, V.V. et al. (2022), *Avtomobilni kuzovy*, Part 1, navch. posib, NU «Zaporizka politekhnika», Zaporizhzhia, 292 p.
- Hassan, R., Islam, T., Ali, M. and Islam, O. (2014), «Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars», *Procedia Engineering*, Vol. 90, pp. 308–313.
- Pylypenko, O.M. (2017), «Modeliuвання aerodynamiky sidelnogo avtopotiahu», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tekhnichni nauky*, Vol. 2, pp. 27–33.
- Beherskiy, D.B., Opanasyuk, E.G., Kubrak, Yu.O. and Koval, A.O. (2021), «Doslidzhennia aerodynamichnykh kharakterystyk avtomobilia shliakhom kompiuternoho modeliuвання», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi onlain-konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoi Dniu nauky*, 11–15 travnia, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 3–4.

Бегерський Дмитро Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8357-0038>.

Наукові інтереси:

- прохідність автомобілів;
- моделювання транспортних потоків;
- аеродинаміка автопотягів.

Вітюк Іван Васильович – старший викладач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3577-8758>.

Наукові інтереси:

- транспортна логістика;
- експлуатаційні властивості автомобілів;
- аеродинаміка автопотягів.

Коваль Андрій Олегович – аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- аеродинаміка автопотягів;
- експлуатаційні властивості автомобілів.

Beherskiy D.B., Vitiuk I.V., Koval A.O.

The dependency of fuel consumption on the aerodynamics of a truck

The results of the analysis of the influence of the aerodynamic characteristics of the road train on its fuel efficiency are presented. Based on the analysis of known studies, the power balance equation and the known equation of road fuel consumption, it is shown that air resistance has a significant effect on fuel economy indicators. Through the analysis of the air resistance equation and taking into account known studies, it was concluded that one of the key parameters that affect the aerodynamics of the road train is the distance between the cab and the semi-trailer. The results of computer modeling of the aerodynamics of a two-track road train are presented. Based on the proposed model, it is shown that the distance between the cabin and the semi-trailer has a non-linear effect on the total air resistance expressed through the reduced pressure. On the basis of this, an assumption was made about the possibility of optimizing the specified distance according to the criterion of minimum air resistance. It has been established that the use of such technologies as aerodynamic panels can significantly improve the aerodynamic characteristics of a road train, which, in turn, will have a positive effect on fuel economy and other operational characteristics of the road train. A real example of how a decrease in the coefficient of ease of movement, which also takes into account air resistance, affects fuel consumption. It is shown that a decrease in the coefficient of ease of movement by only 0.04 units leads to a decrease in fuel consumption by 11%. It was concluded that the influence of the geometry of the road train, namely the distance between the cab and the semi-trailer, on the indicators of aerodynamics and fuel efficiency requires further research both by computer modeling and by researching physical models of road trains in a wind tunnel.

Keywords: road train; air resistance; fuel efficiency; semi-trailer; computer simulation.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2023.