

І.Е. Мартинов

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +38 (057) 730-10-36, E-mail: martinov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

А.В. Труфанова

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +38 (057) 730-10-35, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

В.О. Шовкун

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +38 (067) 399 6881, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

О.О. Балашов

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +38 (057) 7301035, E-mail: balashov@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ВПЛИВАЮЧИХ НА АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР УНІВЕРСАЛЬНИХ НАПІВВАГОНІВ

Опір руху є тим чинником, який впливає на економічні показники залізниць. Аеродинамічний опір повітря є одним з основних чинників, що впливають на витрати палива та електроенергії на тягу поїздів. Особливо це відчутно під час руху на високих швидкостях, де саме опір повітря є головним фактором. В статті викладені результати досліджень аеродинамічного опору універсальних напіввагонів.

Розглянуто вплив повітряних аеродинамічних потоків на вантажний залізничний поїзд. Для дослідження аеродинамічного опору використовувались характеристики універсальних напіввагонів моделі 12-9745. Відмінністю кузова даного напіввагона є гладкі бокові стіни без гофр, які характерні для переважної більшості універсальних напіввагонів різних моделей. Інші параметри розрахункової моделі відповідали геометричним параметрам кузова вагона, в тому числі наявність бічних стояків, що виступають за поверхню бокової стіни.

Під час досліджень рівень завантаження напіввагону складав 70% та 100% номінальної вантажопідйомності. Наявність візків та підвагонного

© Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Шовкун В.О., Балашов О.О., 2024

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

обладнання не враховувалась. Також виконано моделювання для порожнього стану напіввагона.

Для моделювання поведінки та взаємодії повітряних потоків з об'єктами складної геометрії, якими є вантажні вагони, використовувався програмний комплекс ANSYS Workbench. При моделюванні обтікання вагона потоком повітря при русі вздовж залізничної колії використовувалася тетрадральна сітка.

Розроблена модель дозволяє уточнити коефіцієнт аеродинамічного опору. При цьому є можливість врахувати характер повітряного потоку та експлуатаційних режимів вагона, стан завантаженості (порожній, завантажений), кількість вагонів у складі поїзда та кут атаки повітряного потоку. Розрахункова область являє собою обсяг повітря, що оточує навколишній вагон.

Для зовнішнього повітряного потоку сприяла виникненню найбільшого опору при впливі повітряного потоку на передню частину вагона у міжвагонному просторі. Також формувалися турбулентні зони за вагоном та турбулентні зони усередині порожнього вагона. Зміна кута атаки повітряного потоку збільшує площу активного перерізу рухомого складу. Це призводить до значного зростання аеродинамічного опору.

Порожні напіввагони мають значно більший аеродинамічний опір, ніж навантажені. Це призводить до збільшення споживання енергії та зниження економічності перевезень.

Стаття призначена для використання науковцями, фахівцями вагонобудування та вагонного господарства.

Ключові слова: напіввагон універсальний, кузов, аеродинамічний опір, повітряний потік, кут атаки.

Вступ. Однією з основних завдань під час створення іновативних вагонів є підвищення економічності. Відомо, що опір руху є тим чинником, який впливає на економічні показники залізниць. Облік величини опору руху дозволяє ефективно використовувати енергетичні ресурси при транспортуванні вантажів та пасажирів.

Повний опір руху вагона під час руху по рейках складається з основного опору, що діє постійно, та додаткового опору, що діє тимчасово (при рушанні з місця, від ухилу, кривих і т.п.). Основний опір є силою, яка перешкоджає руху поїзда по прямій горизонтальній колії на відкритій місцевості. Чинники, що впливають на величину основного опору, вивчені досить повно: опір від тертя кочення коліс по рейках, опір від тертя в буксових підшипниках і т.п. Сюди ж входить аеродинамічний опір від повітряного середовища. Воно також суттєво впливає на тягово-енергетичні характеристики рухомого складу.

Вплив повітряного середовища на рухомий склад багатоплановий. Умовно його можна розглядати в рамках зовнішньої, внутрішньої та прикордонної аеродинаміки. Зазвичай поїзд характеризується зовнішньою аеродинамікою. Вона визначається швидкістю руху поїзда, його складом, ступенем аеродинамічної досконалості вагонів і локомотивів, умовами руху по коліям, станом і величиною зовнішніх і внутрішніх аеродинамічних зв'язків у поїзді.

У наукових працях, присвячених опору руху поїздів, як правило більша увага приділяється уточненню загальної методики розрахунку, вивченню процесів розсіювання енергії в навколишнє середовище і втрати енергії в підшипниках. Але для вантажних поїздів, де довжина складу та складна форма вагонів створюють знач-

ний опір, аеродинамічні удосконалення можуть суттєво знизити витрату палива (електроенергії) та викиди парникових газів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Аеродинамічний опір поїздів детально досліджено у роботі [1]. Автор докладно аналізує моделі опору руху та енергоспоживання поїздів. При цьому врахована маса складу, його довжина, осьові навантаження та особливості колії. Ці дані особливо важливі для оцінки енергетичної ефективності різних типів складів.

Для розрахунків тягового опору поїздів основною залишається формула Девіса [2], запропонована ще у 1926 році. Вона враховує ключові компоненти опору, включаючи механічне тертя та аеродинамічний опір, що дозволяє проводити аналіз шляхів зменшення енергоспоживання.

Стандарти Євросоюзу [3] деталізують вимоги до аеродинамічних характеристик поїздів. У цьому документі розглянуті такі аспекти, як опір вітру, стійкість на відкритих ділянках колії та вплив погодних умов, що є важливим для забезпечення безпеки руху.

Методи оптимізації аеродинаміки контейнерних поїздів докладно описані у статті [4]. Автори вивчають конфігурації вагонів та їх розміщення зниження опору повітря. Результати показали, що раціональне використання контейнерів різної висоти може значно знизити паливні витрати.

У дослідженні [5] виконаний комплексний аналіз аеродинаміки вантажних поїздів. Автор аналізує вплив попутного та бічного вітру на стійкість поїздів, а також надає рекомендації щодо проектування вагонів для зниження аеродинамічного опору.

За результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень отримано розподіл повітряних потоків навколо вагонів для перевезення контейнерів [6]. У статті показано, що оптимізація завантаження та форм вагонів дозволить суттєво зменшити опір повітря.

Дослідження [7] присвячено вивченню методів зниження аеродинамічного опору вантажних вагонів. Автор проаналізував вплив різних форм конструкцій вагонів на загальний опір повітря. Основну увагу приділено оптимізації геометрії вагонів для підвищення їх енергоефективності. Результати дослідження стали основою проектування більш обтічних конструкцій вагонів для сприяння зменшення витрати палива. Аналіз, наведений у [8], дає можливість оцінити вплив бічного вітру на стійкість поїздів. Особливо це важливо на відкритих ділянках колії.

Авторами дослідження [9] було розглянуто питання удосконалення аеродинамічних профілів вантажних цистерн та запропоновані рішення щодо зменшення аеродинамічного опору. У статті [10] наведено результати динамічного аналізу напіввагонів при обтіканні їх потоком повітря із застосуванням CFD-моделювання. Результати розрахунків показали, що при використанні спрощеної геометрії вагонів коефіцієнт лобового опору виявляється на 20% нижче, ніж отриманий на основі деталізованої моделі.

Авторами роботи [11] розглядаються питання забезпечення довговічності елементів вагонів з урахуванням навантажень, викликаних аеродинамічними силами.

У статті [12] викладено результати дослідження щодо зниження витрати тягової енергії при зниженні ваги суцільнометалевого піввагону. Запропоновано нову форму глухої підлоги, що дозволяє знизити вагу суцільнометалевого напіввагону. Встановлено, що вагу суцільнометалевого напіввагону зі зміненою формою глухої підлоги знижено на 5,1% порівняно з типовим суцільнометалевим напіввагоном.

Автори роботи [13] стверджують, що для вантажного поїзда з 60 вагонів при

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

швидкості 90 км/год опір повітря становить близько 60% основного опору руху. Причому значення аеродинамічного опору, який створюється поїздами з різною схемою розташування вагонів у складі, різняться більш як на 400 %.

Розрахунок вітрових навантажень, виходячи з яких визначаються аеродинамічні параметри транспортного засобу, виконується на основі натурних випробувань рухомого складу, випробувань моделей, що масштабуються в аеродинамічних трубах, а також методів обчислювальної гідродинаміки. Випробування залізничних транспортних засобів бажано виконувати в аеродинамічній трубі на масштабованих моделях при нерухомій поверхні [14].

Проведений аналіз досліджень у галузі аеродинаміки вантажних поїздів свідчить, що зусилля науковців спрямовані на зниження опору повітря, підвищення стійкості та оптимізацію конфігурації поїздів. Ці аспекти мають вирішальне значення для підвищення енергоефективності залізничного транспорту. Тому дослідження шляхів зниження аеродинамічного опору вантажних вагонів залишається актуальною задачею. Особливо це важливо для універсальних напіввагонів, які складають переважну більшість парку вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця».

Мета дослідження. Побудова розрахункової моделі та дослідження аеродинамічного опору універсальних напіввагонів моделі 12-9745.

Матеріали та методи дослідження. На першому етапі у програмному комплексі ANSYS Workbench була створена модель кузова універсального напіввагона моделі 12-9745. Як відомо, відмінністю кузова даного напіввагона є гладкі стіни без гофр, які характерні для переважної більшості універсальних напіввагонів різних моделей. Інші параметри розрахункової моделі відповідали геометричним параметрам кузова вагона, в тому числі наявність бічних стояків, що виступають за поверхню бокової стіни. Рівень завантаження напіввагона складав 70% та 100% вантажо-підйомності. Наявність візків та підвагонного обладнання не враховувалась.

Під час моделювання обтікання вагона потоком повітря при русі вздовж залізничної колії використовувалася тетраедральна сітка, що включає близько 350 тис. елементів.

Аеродинамічний опір F_a розраховується за наступною формулою [2]:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

A – площа лобової поверхні вагона, м²;

v – швидкість руху, м/с.

Розроблена модель дозволяє уточнити коефіцієнт аеродинамічного опору C_x . При цьому є можливість врахувати характер повітряного потоку та експлуатаційних режимів вагона, стан завантаженості (порожній, завантажений), кількість вагонів у складі поїзда. Також при побудові моделі враховувався кут атаки повітряного потоку.

Чисельне моделювання виконувалося на підставі рішення рівняння нерозривності і середніх по Рейнольдсу рівнянь зміни кількості руху Нав'є-Стокса (метод Reynolds Averaged Navier-Stokes), для замикання яких використовувалася модель турбулентності $k - \varepsilon$ та швидкості дисипації кінетичної енергії ε . Для моделювання поведінки та взаємодії повітряних потоків з об'єктами складної геометрії викорис-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

товувався програмний комплекс ANSYS Workbench. Він має автоматизовані інструменти для моделювання впливу потоку повітря на вагон та дозволяє з високою точністю імітувати локальні зміни турбулентності та розподілення тиску на зовнішніх та внутрішніх поверхнях кузова.

Збіжність отриманого рішення перевірялася за критерієм рівня середньоквадратичних нев'язок рівняння нерозривності і моментів кількості руху, який дорівнював $10^{-4} \div 10^{-5}$.

Розрахункова область являє собою обсяг повітря, що оточує навколишній вагон (рис. 1). З неї виключено простір, що займає безпосередньо модель вагона. Значення і напрями швидкості набігаючого повітряного потоку задавалися на вхідних межах.

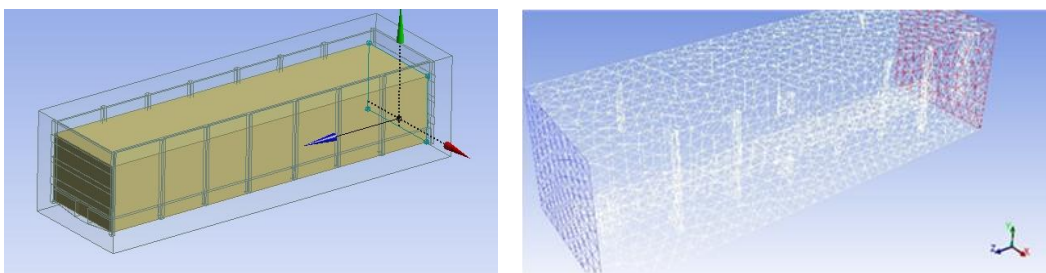


Рис. 1. Каркасне зображення розрахункової моделі

Аналіз результатів показав значну динамічність процесів обтікання. На рис. 2, 3 показано вплив повітряного потоку на кузов універсального напіввагону при швидкості 20 м/с.

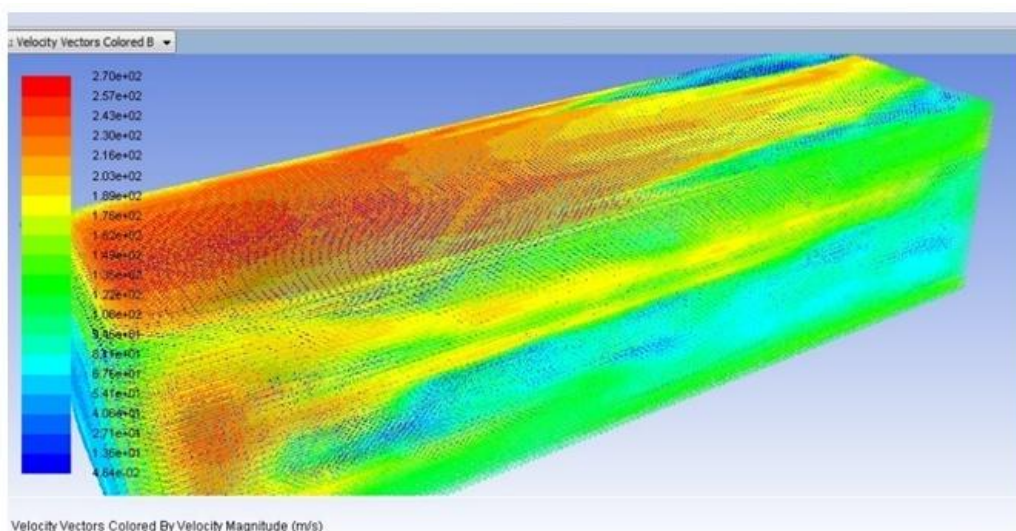


Рис. 2. Векторне уявлення опору повітряного потоку

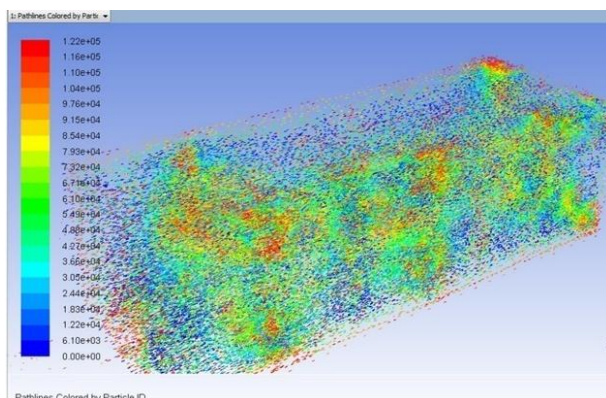


Рис. 3. Розподіл швидкостей потоку у перерізі розрахункової області

Дія зовнішнього повітряного потоку сприяла виникненню найбільшого опору при впливі повітряного потоку на передню частину вагона у міжвагонному просторі. Також формувалися турбулентні зони за вагоном та турбулентні зони усередині порожнього вагона. Також значним був вплив кута атаки повітряного потоку, що особливо важливо при бічному вітрі.

Для оцінки аеродинамічного опору універсальних напіввагонів було виконано серію розрахунків, в рамках яких проаналізовано залежність опору повітря від наступних факторів:

- швидкість руху поїзда;
- режим завантаження (завантажений чи порожній вагон);
- кут атаки повітряного потоку (вітрового навантаження).

В результаті моделювання отримано уточнені коефіцієнти аеродинамічного опору C_x . Для завантаженого вагона зазначений коефіцієнт C_x знаходиться в межах від 0,18 до 0,28. Це зумовлено тим, що внутрішні повітряні потоки у міжвагонному та бічному просторі мінімальні.

Для порожнього вагона наявність турбулентних потоків усередині кузова збільшують C_x до 0,35-0,36.

Торцева внутрішня стіна фактично створює лобовий опір потоку.

При куті атаки повітряного потоку 10° опір повітря зростає на 15-20%, що зумовлено збільшенням ефективної площі взаємодії потоку з вагоном.

На рис. 4 показана залежність опору повітря від швидкості руху напіввагонів відкритого типу, як завантажених, так і порожніх.

Очевидно, що опір повітря збільшується зі зростанням швидкості та числа вагонів. Порожні напіввагони мають опір більший у порівнянні із завантаженими. Це обумовлено більшим коефіцієнтом аеродинамічного опору.

Підтверджено, що аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату збільшення швидкості руху.

Зі збільшенням кількості вагонів у складі поїзда загальна площа опору також зростає, що призводить до лінійного збільшення загального опору повітря.

Додавання кута атаки в аналіз аеродинамічного опору вагонів відкритого типу ускладнює модель, тому що кут атаки суттєво впливає на розподіл повітряного потоку та, відповідно, на величину аеродинамічного опору. Кут атаки виникає, коли повітряний потік спрямований на вагон під кутом, а не суворо фронтально (0°).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

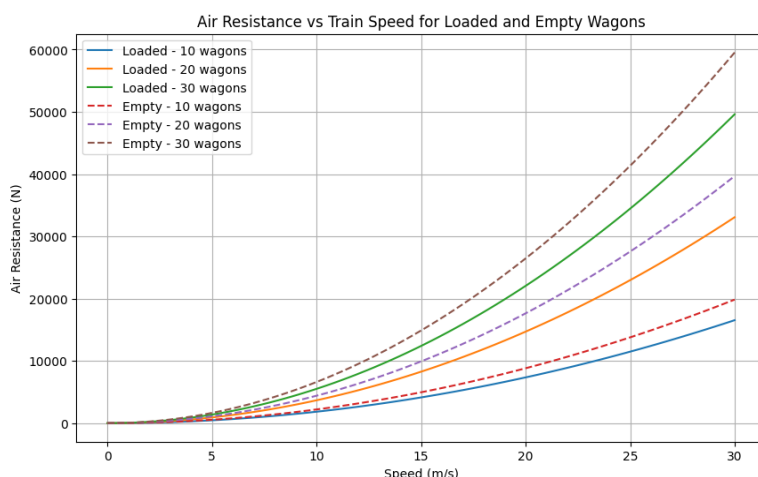


Рис. 4. Залежності аеродинамічного опору поїзду з порожніми та завантаженими вагонами

На рис. 5 представлено зміни аеродинамічного опору повітря в залежності від швидкості руху поїзда, кількості вагонів у складі та їх стану (завантажені або порожні) з урахуванням кута атаки 10° .

Очевидно, що зміна кута атаки повітряного потоку збільшує площу активного перерізу рухомого складу. Це призводить до значного зростання аеродинамічного опору.

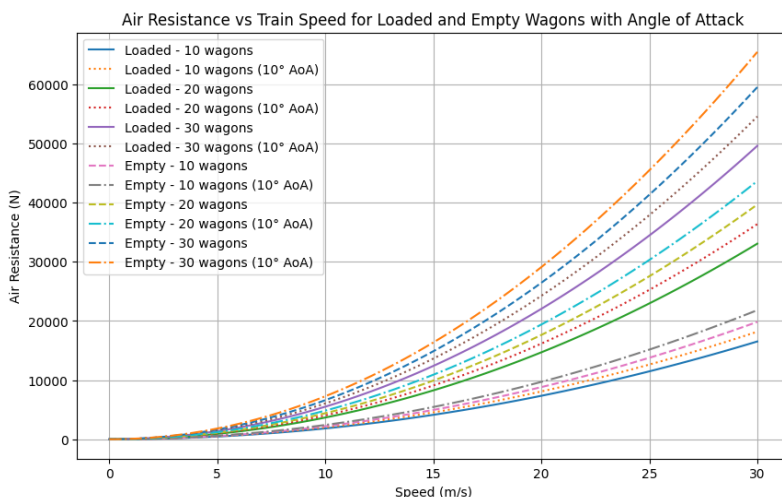


Рис. 5. Залежності аеродинамічного опору поїзду з порожніми та завантаженими вагонами з урахуванням кута атаки повітряного потоку

Знову ж таки аеродинамічний опір зростає квадратично зі зростанням швидкості для всіх сценаріїв. Графік наочно демонструє, що кут атаки 10° призводить до збі-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

льшення аеродинамічного опору, особливо для порожніх вагонів, що необхідно враховувати при оптимізації руху вантажних поїздів.

Висновки. На підставі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. За допомогою програмного комплексу ANSYS Workbench розроблено модель впливу потоку повітря на універсальний напіввагон.

2. Визначено, що при однаковій швидкості та однаковій кількості вагонів склад з порожніх вагонів має на 20% більший опір повітря, ніж завантажений. Для зменшення цього ефекту рекомендується розглядати варіанти покращення аеродинамічної форми порожніх вагонів (наприклад, використання кришок або аеродинамічних екранів).

3. На швидкостях руху понад 60 км/год вплив аеродинамічного опору стає домінуючим фактором.

4. Отримані результати можуть бути використані вагобудівниками для вдосконалення нових моделей напіввагонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lukaszewicz P., Energy Consumption and Running Time for Trains. Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:8954>.
2. Davis W. J. The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars. General Electric, Boston, 1926. 23 p.
3. EN 14067-2:2003. Railway Applications – Aerodynamics, Part 2: Aerodynamics on Open Track, Beuth Publishing, Berlin, 2003. 19 p.
4. Beagle A. E., Fletcher D. I. The Aerodynamics of Freight: Approaches to Save Fuel by Optimizing the Utilization of Container Trains. Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit. 2013. Vol. 227. pp. 635–643.
5. Soper D. The Aerodynamics of a Container Freight Train. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK. 2014. 374 p.
6. Li C., Burton D., Kost M., Sheridan J., Thompson M. C. Flow Topology of a Container Train Wagon Subjected to Varying Local Loading Configurations. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2017. Vol. 169. pp. 12–29.
7. Bendel H. Untersuchungen zur Verringerung des aerodynamischen Widerstandes von Güterwagen. Z. Eisenb. Verk. 1990. Vol. 114. pp. 124–132.
8. Nagakura K. Recent Studies on Aerodynamic Characteristics of Railway Vehicles. Quarterly Report of RTRI. 2018. Vol. 59. No. 2. pp. 81–84. URL: https://doi.org/10.2219/rtriqr.59.2_81.
9. Nayeri C. N. Aerodynamic Drag Reduction of Railroad Tank Wagons. Fluids. 2022. Vol. 7. No. 8, p. 283. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids7080283>.
10. Kedare S. B., Sharma S. C., Harsha S. P. Computational Fluid Dynamics Analysis of Empty Railway Freight Wagons. Int. J. Veh. Struct. Syst.. 2015. Vol. 7. No. 1. pp. 25–30. URL: <https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05>.
11. Hemida H., Krajnović S. The Impact of Crosswind on Freight Train Stability. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.. 2015. Vol. 145. pp. 60–70. URL: <https://www.elsevier.com/en-xm>.
12. Myamlin S., Bulakh M., Klich L., Baranovska O., Baida A. Reducing Traction Energy Consumption with a Decrease in the Weight of an All-Metal Gondola. Energies. 2023. 16(18):6733. URL: <https://doi.org/10.3390/en16186733>.
13. Чурков Н. А., Битюцкий А. А., Кручек В. А. Влияние воздушной среды на поезд. Изв. Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 2 (35). С. 20-26.
14. Baker C., Cheli F., Orellano A., Paradot N., Proppe C., Rocchi D. Cross-wind effects on road and rail vehicles. Vehicle System Dynamics. 2009. Vol. 47. iss. 8. pp. 983–1022. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>

I.E. Martynov

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +38 (057) 730-10-36, E-mail: martinov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

A.V. Trufanova

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +38 (057) 730-10-35, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

V.O. Shovkun

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +38 (067) 399 6881, E-mail: vadimshovkun62@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>

O.O. Balashov

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +38 (057) 730-10-35, E-mail: balashov@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2712-2495>

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE AERODYNAMIC DRAG OF UNIVERSAL GONDOLACARS

Moving resistance is a factor that affects the economic performance of railways. Aerodynamic drag is one of the main factors affecting fuel and electricity consumption for train traction. This is especially noticeable at high speeds, where air resistance is the primary factor. This article presents the results of studies on the aerodynamic drag of universal gondola cars.

The impact of air aerodynamic flows on freight trains is considered. The characteristics of universal gondolas of model 12-9745 were used to study aerodynamic drag. The distinguishing feature of this flat car's body is the smooth side walls without corrugations, which are characteristic of the vast majority of universal gondolas of various models. Other parameters of the calculation model corresponded to the geometric dimensions of the car's body, including the presence of side braces that extend beyond the side wall surface.

The loading level of the gondola was 70% and 100% of the nominal load capacity. The presence of bogies and undercarriage equipment was not taken into account. Modeling for the empty state of the open-top wagon has also been completed.

The ANSYS Workbench software package was used to model the behavior and interaction of air flows with objects of complex geometry, such as freight cars. A tetrahedral mesh was used to model the air flow around the car when moving along the railway track.

The developed model allows you to specify the aerodynamic drag coefficient. At the same time, it is possible to take into account the nature of the air flow and the operational modes of the car, the state of loading (empty, loaded), the number of cars in the train and the angle of attack of the air flow. The calculation area represents the volume of air surrounding the car.

The action of the external air flow resulted in the highest resistance when the air-flow impacted the front part of the car in the inter-car space. Turbulent zones were also formed behind the car and inside the empty car. Changing the angle of attack of the air flow increases the area of the active cross-section of the rolling stock. This leads to a significant increase in aerodynamic drag.

Empty gondolas have significantly greater aerodynamic resistance than loaded ones. This leads to increased energy consumption and reduced transportation efficiency.

Key words: universal gondola car, body, aerodynamic drag, airflow, angle of attack.

REFERENCES

1. Lukaszewicz, P. (2001). *Energy Consumption and Running Time for Trains* (Ph.D. Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:8954>.
2. Davis, W. J. (1926). *The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars*. General Electric, Boston.
3. EN 14067-2:2003. (2003). *Railway Applications - Aerodynamics, Part 2: Aerodynamics on Open Track*. Beuth Publishing, Berlin.
4. Beagle, A. E., & Fletcher, D. I. (2013). The aerodynamics of freight: Approaches to save fuel by optimising the utilisation of container trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227, 635-643.
5. Soper, D. (2014). *The Aerodynamics of a Container Freight Train* (Ph.D. Thesis). University of Birmingham, Birmingham, UK.
6. Li, C., Burton, D., Kost, M., Sheridan, J., & Thompson, M. C. (2017). Flow topology of a container train wagon subjected to varying local loading configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169, 12-29.
7. Bendel, H. (1990). Untersuchungen zur Verringerung des aerodynamischen Widerstandes von Güterwagen (Studies on reducing the aerodynamic resistance of freight cars). *Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik*, 114, 124-132.
8. Nagakura, K. (2018). Recent studies on aerodynamic characteristics of railway vehicles. *Quarterly Report of RTRI*, 59(2), 81-84. https://doi.org/10.2219/rtriqr.59.2_81.
9. Nayeri, C. N. (2022). Aerodynamic drag reduction of railroad tank wagons. *Fluids*, 7(8), 283. <https://doi.org/10.3390/fluids7080283>.
10. Kedare, S. B., Sharma, S. C., & Harsha, S. P. (2015). Computational fluid dynamics analysis of empty railway freight wagons. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 7(1), 25-30. <https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05>.
11. Hemida, H., & Krajnović, S. (2015). The impact of crosswinds on freight train stability. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 60-70. <https://www.elsevier.com/en-xm>.
12. Myamlin, S., Bulakh, M., Klich, L., Baranovska, O., & Baida, A. (2023). Reducing traction energy consumption with a decrease in the weight of an all-metal gondola car. *Energies*, 16(18), 6733. <https://doi.org/10.3390/en16186733>.
13. Churkov, N. A., Bityutskiy, A. A., & Kruchek, V. A. (2013). Vliyaniye vozduшной sredy na poyezd (Influence of the air environment on a train). *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya – News of the Petersburg University of Railway Engineering*, 2(35), 20-26 [in Russian].
14. Baker, C., Cheli, F., Orellano, A., Paradot, N., Proppe, C., & Rocchi, D. (2009). Cross-wind effects on road and rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 47(8), 983-1022. <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>.