

Незважаючи на переваги, існують певні обмеження присутні висока вартість впровадження; складність електронних компонентів; необхідність кібербезпеки; потреба у резервних системах.

Висновки

Електропневматичні гальмівні системи є перспективним напрямом розвитку вантажного автомобілебудування. Вони забезпечують високий рівень безпеки, точності керування та інтеграції з сучасними електронними системами.

Основними тенденціями є перехід до повністю електронних систем керування (brake-by-wire), інтеграція з автономними технологіями та підвищення інтелектуальності систем. У майбутньому такі системи стануть базовим стандартом для вантажних автомобілів.

Література

1. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. — Warrendale: SAE International, 1992. — 495 p.
2. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. — 4th ed. — Hoboken: Wiley, 2008. — 488 p.
3. Electronic Braking Systems (EBS) // Bendix Commercial Vehicle Systems. — URL: <https://www.bendix.com> (дата звернення: 27.03.2026).
4. Electronic Braking System // ZF Friedrichshafen AG. — URL: <https://www.zf.com> (дата звернення: 27.03.2026).
5. Electronic braking control systems // Knorr-Bremse. — URL: <https://www.knorr-bremse.com> (дата звернення: 27.03.2026).

Науковий керівник Альокса М.М., професор кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, канд.техн.наук

Грабар Антон, ст. гр АА-31-23

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФОРМИ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ НА КОЕФІЦІЄНТ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ

Сучасний етап розвитку автомобілебудування визначається глобальним переходом до екологічно чистого транспорту, посиленням норм щодо викидів та масовою електрифікацією. Зі збільшенням середньої швидкості руху на автомагістралях на перший план виходить проблема оптимізації енергозатрат. Для легкових автомобілів (категорія М1) саме подолання опору повітря стає головним фактором витрати енергії при русі на швидкостях понад 80 км/год, залишаючи позаду витрати на тертя кочення шин та механічні втрати у трансмісії [1].

У контексті електромобілів значення коефіцієнта аеродинамічного опору набуває критичної ваги. Оскільки нарощування ємності тягових батарей неминуче призводить до суттєвого збільшення маси та вартості транспортного засобу, найбільш раціональним шляхом збільшення запасу ходу є покращення

обтічності. Зниження навіть на кілька сотих часток дозволяє відчутно підвищити загальну енергоефективність автомобіля, що робить аеродинаміку одним із ключових інструментів у конкурентній боротьбі автовиробників.

Метою даної статті є комплексний аналіз впливу загальної форми кузова, а також його окремих конструктивних елементів на формування повітряних потоків і підсумковий показник аеродинамічного опору автомобіля.

Науковий підхід до аеродинаміки автомобіля пройшов тривалий шлях еволюції, початково запозичивши базові принципи з авіабудування. Перші серйозні спроби створити аеродинамічно ефективні кузова припадають на 1930-ті роки. У цей період інженери, ще не маючи досконалих інструментів моделювання, інтуїтивно тяжіли до природних еталонів обтічності — зокрема, до форми краплі води, яка має найменший опір у повітряному середовищі. Знаковим представником цієї епохи стала чехословацька Tatra 77 (1934 рік) — один із перших серійних автомобілів, спроектованих з урахуванням законів аеродинаміки. Завдяки витягнутому, звуженому задньому звису та плавним лініям, автомобіль демонстрував видатні швидкісні характеристики навіть за умови використання відносно малопотужного двигуна.



Рисунок 1 – Легенда 1930-х — Tatra 77

Наступний фундаментальний зсув в автомобільному дизайні відбувся у 1980-х роках, які увійшли в історію як «ера клина». Саме в цей час провідні автовиробники почали масово застосовувати повномасштабні аеродинамічні труби для доведення форм серійних легкових автомобілів. Кузови набули характерних клиноподібних силуетів із сильно нахиленими лобовими склами та завищеною лінією багажника (так званий «хвіст Камма»). Еталоном цього підходу стала модель Audi 100 (у кузові С3, 1982 рік), яка встановила новий галузевий стандарт для масових седанів, досягнувши рекордного на той час коефіцієнта аеродинамічного опору $C_x = 0.30$ [2].



Рисунок 2 – Еталон 1980-х — Audi 100 C3

Сучасний етап розвитку (від початку 2010-х років і донині) характеризується переходом від виключно емпіричних випробувань до масового використання обчислювальної гідродинаміки (CFD — Computational Fluid Dynamics). Застосування суперкомп'ютерів дозволяє інженерам віртуально моделювати поведінку мікропотоків повітря та турбулентність ще на етапі раннього 3D-проекування. Цей інструментарій, стимульований жорсткими вимогами до енергоефективності та запасу ходу електромобілів, дозволив сучасній індустрії досягти нових рекордів обтічності. Сьогодні передові електромобілі преміум-сегмента (наприклад, Mercedes-Benz EQS, Lucid Air) демонструють безпрецедентні показники C_x на рівні 0.20–0.21, що робить їх найбільш аеродинамічно досконалими серійними транспортними засобами в історії [3,4].

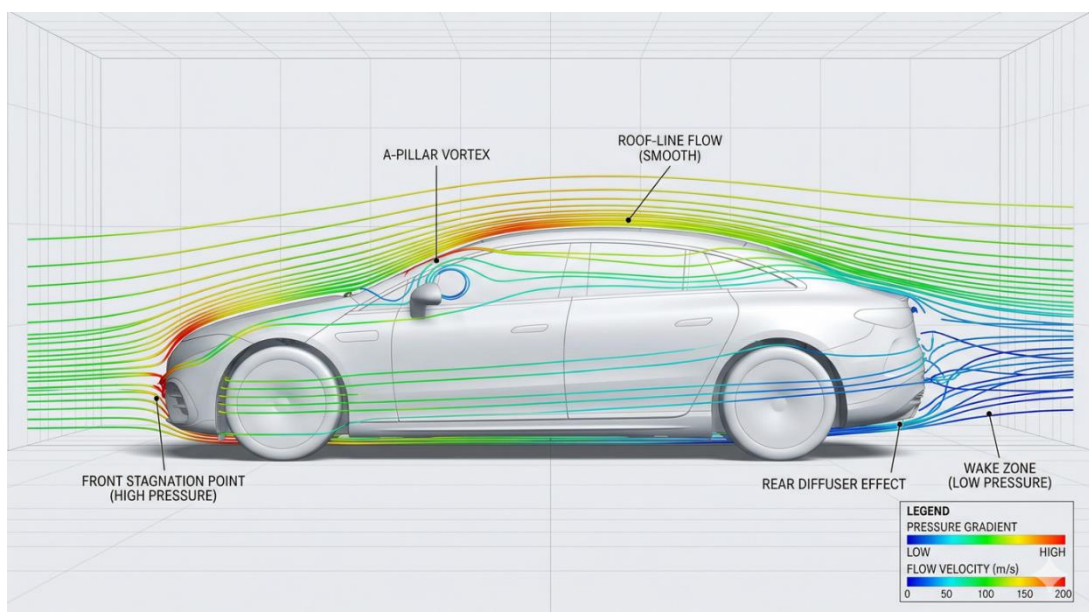


Рисунок 3 – Сучасний рекордсмен — Mercedes-Benz EQS

Фізика проблеми та енергетичні втрати

Коефіцієнт аеродинамічного опору (позначається як C_x або C_d) — це безрозмірна величина, яка характеризує ступінь обтічності твердого тіла під час його руху в газоподібному середовищі. Значення C_x не залежить від абсолютних габаритів автомобіля чи його маси, а визначається виключно його геометричною формою, пропорціями, якістю поверхонь (шорсткістю) та наявністю виступаючих деталей, що провокують відрив повітряного потоку та утворення турбулентних завихрень.

Для розрахунку сили, з якою повітряне середовище протидіє руху транспортного засобу, використовується базова формула аеродинамічного опору:

$$F_w = \frac{1}{2} * \rho * C_x * A * v^2$$

де:

F_w — сила аеродинамічного опору (вимірюється в Ньютонах);

ρ — щільність повітря (приблизно $1,225 \text{ кг/м}^3$ за нормальних умов);

C_x — коефіцієнт аеродинамічного опору;

A — площа максимального поперечного перерізу автомобіля (фронтальна площа або мідель);

v — швидкість руху транспортного засобу відносно повітря.

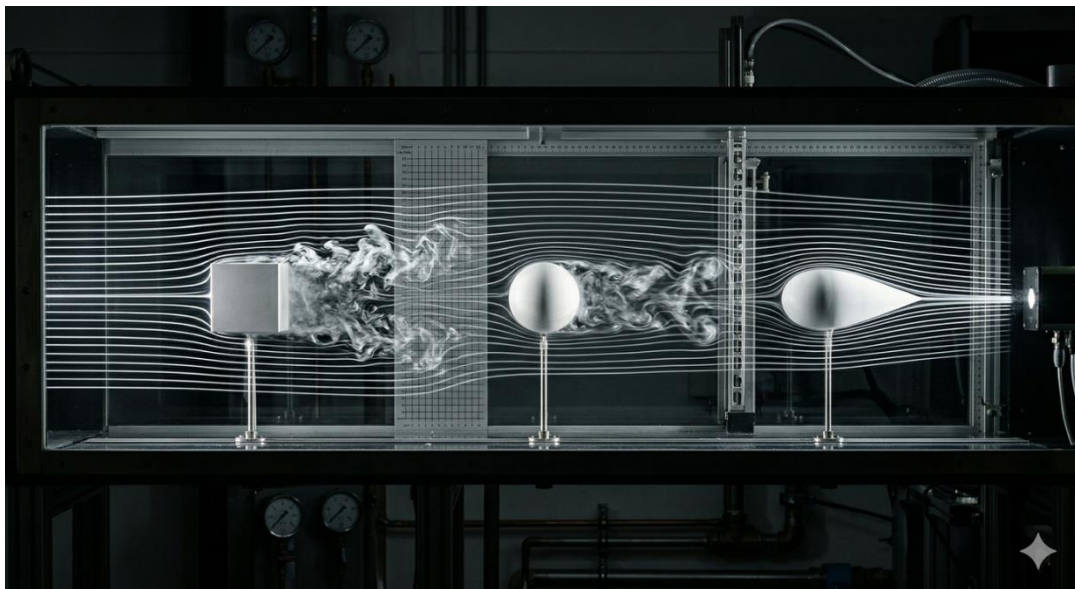


Рисунок 4 - Порівняння обтічності різних форм

Аналіз наведеної формули демонструє критичну залежність: сила опору повітря зростає пропорційно квадрату швидкості (v^2). Крім того, потужність, яку двигун має витратити на подолання цієї сили, зростає пропорційно кубу швидкості.

З точки зору енергетичних втрат ця фізична закономірність формує чітку статистику розподілу витрат енергії (палива в автомобілях з ДВЗ або заряду тягової батареї в електромобілях). Під час руху в умовах щільного міського трафіку (до 50 км/год) основна частка енергії витрачається на подолання опору

кочення шин та механічні втрати. Однак, при досягненні швидкостей 80–100 км/год аеродинамічний опір стає домінуючим фактором, і частка енергії, що витрачається виключно на «розштовхування» повітря, перетинає позначку в 50%. На автомагістральних швидкостях (понад 120 км/год) цей показник сягає 70–80%. Саме тому зниження коефіцієнта C_x є найефективнішим інженерним рішенням для збільшення запасу ходу та покращення енергоефективності без фізичного збільшення ємності джерел енергії.

Головні зони кузова, що впливають на аеродинаміку

Автомобіль під час руху взаємодіє з повітряним середовищем як складний тривимірний об'єкт. Підсумковий коефіцієнт C_x є результатом балансу між фронтальним тиском повітря та зоною розрідження позаду. Для досягнення максимальної енергоефективності інженери детально опрацьовують чотири ключові макрозони кузова.

Фронтальна частина: розподіл потоку та точка гальмування

Передня частина автомобіля першою зустрічає незбурений потік повітря, формуючи так звану «точку гальмування» (stagnation point) — місце, де швидкість потоку падає до нуля, а тиск є максимальним. Від розташування цієї точки залежить, як повітря буде розподілятися: над дахом, під днищем чи вздовж боковин. Головна мета при проектуванні фронтальної зони — забезпечити максимально плавний перехід ліній [5]. Кут нахилу капота та лобового скла має бути достатньо пологим, щоб уникнути різкого відриву потоку (утворення локальних мікрозавихрень на стиках). Форма переднього бампера проектується таким чином, щоб мінімізувати потрапляння повітря під днище автомобіля, оскільки це не лише збільшує опір, але й створює небажану підймальну силу на високих швидкостях.

Днище автомобіля: приховане джерело турбулентності Історично днище автомобіля залишалося найбільш аеродинамічно «брудною» зоною. Нагромадження елементів вихлопної системи, карданних валів, важелів підвіски та піддонів картера створює колосальний опір. Повітря, потрапляючи у цей лабіринт, різко гальмується, утворюючи хаотичну турбулентність. У сучасних автомобілях, особливо електромобілях (де відсутня вихлопна система), ця проблема вирішується встановленням повністю плоского аеродинамічного днища. Гладка поверхня дозволяє повітрю проходити під машиною без перешкод і з високою швидкістю. Згідно із законом Бернуллі, прискорення потоку призводить до падіння тиску під автомобілем. Це не лише суттєво знижує загальний опір повітря (на 10–15%), але й генерує корисну притиску силу, що покращує стабільність авто на автомагістралі.

Задня частина: критична зона формування аеродинамічного сліду

Всупереч інтуїтивному сприйняттю, найбільший аеродинамічний опір створює не передня частина автомобіля (яка «розрізає» повітря), а його задня частина. Коли повітряний потік огинає дах і починає спускатися до багажника, він має тенденцію до відриву від поверхні. У місці відриву позаду автомобіля утворюється величезна зона низького тиску — так званий аеродинамічний слід (wake). Цей вакуум буквально працює як парашут, засмоктуючи автомобіль назад (це явище називається опором тиску). Ідеальною формою для мінімізації

сліду є видовжена крапля, але такий довгий хвіст є непрактичним для повсякденної експлуатації. Геніальним інженерним компромісом стало використання «хвоста Камма» (**Kammback**) — рішення, названого на честь німецького аеродинаміка Вунібальда Камма. Суть концепції полягає в тому, що задня частина даху плавно спускається вниз, а потім різко і вертикально обривається. Такий різкий зріз «обманює» повітряний потік, змушуючи його поводитися так, ніби краплеподібний хвіст продовжується далі, що кардинально зменшує об'єм турбулентної зони позаду автомобіля



Рисунок 5 - Плоске днище електромобіля



Рисунок 6 - Хвіст Камма (Kammback) на прикладі Toyota Prius

Колісні арки та колеса: генератори хаосу Оберткові колеса, розміщені у відкритих колісних арках, є одним із найскладніших елементів для аеродинамічної оптимізації. За даними досліджень у сучасних аеродинамічних

трубах, на колеса припадає від 20% до 30% загального опору автомобіля. Проблема полягає в тому, що колесо працює як потужний міксер: воно захоплює повітря, закручує його і викидає назовні з-під арки. Це порушує ламінарний (рівний) потік повітря, що йде вздовж боковин кузова. Саме тому дизайнери прагнуть мінімізувати зазори між шиною та крилом, а також впроваджують спеціальні аеродинамічні колісні диски з максимально закритою і пласкою поверхнею, які зменшують ефект «захоплення» повітря всередину арки.

Сучасні технологічні рішення (Active Aero та віртуальні елементи)

Традиційна (пасивна) оптимізація форми кузова має свої фізичні та компонувальні межі. Тому для досягнення екстремально низьких значень коефіцієнта C_x (нижче 0.25) сучасні автовиробники переходять від статичного дизайну до динамічного керування повітряними потоками. Цей підхід реалізується через системи активної аеродинаміки (Active Aero) та максимальне усунення виступаючих елементів кузова.

Активна аеродинаміка: адаптація до умов руху Ідеальна аеродинамічна форма для швидкості 50 км/год та 150 км/год суттєво відрізняється. Крім того, автомобілю потрібен баланс між обтічністю та ефективним охолодженням агрегатів.

Керовані жалюзі радіатора (Active Grille Shutters): Радіаторна решітка є одним із найбільших джерел аеродинамічних втрат, оскільки повітря, потрапляючи у моторний відсік, стикається з масивом деталей і гальмується. Сучасні системи оснащені моторизованими заслінками. На високих швидкостях, коли інтенсивне охолодження двигуна чи тягової батареї не потрібне, жалюзі закриваються. Це змушує повітряний потік плавно огинати передню частину кузова, знижуючи загальний опір на 3–5%.

Висувні спойлери та антикрила: Для збереження «чистого» краплеподібного силуету на малих швидкостях ці елементи повністю сховані в кузов. При досягненні певної швидкості (зазвичай понад 90-110 км/год) вони автоматично висувуються або змінюють кут атаки (наприклад, у Porsche Panamera). Це дозволяє змістити точку відриву повітряного потоку далі від кузова, зменшуючи аеродинамічний слід, та за необхідності згенерувати додаткову притискну силу на задній осі для стабільності.

Керування потоками: «повітряні штори» (Air Curtains) Як було зазначено раніше, колісні арки генерують величезну кількість хаотичної турбулентності. Щоб ізолювати цю зону без використання фізичних кришок на колеса (що псує зовнішній вигляд), інженери розробили технологію «повітряних штор». У передньому бампері розташовуються спеціальні вертикальні повітрозабірники. Вони захоплюють повітря з фронтальної зони і під тиском випускають його через вузькі щілини безпосередньо перед передніми колесами. Цей високошвидкісний струмінь утворює невидиму аеродинамічну «завісу», яка перекриває зовнішню площину колеса. В результаті основний потік повітря, що йде вздовж боковини автомобіля, не змішується з турбулентністю всередині колісної арки, а плавно ковзає поверх неї [7].



Рисунок 7 - Повітряні штори (Air Curtains) на передньому бампері

Усунення перешкод: віртуальні елементи кузова На високих швидкостях навіть найменші виступаючі деталі стають значними перешкодами.

Віртуальні дзеркала (Virtual Mirrors): Традиційні бічні дзеркала заднього виду є масивними об'єктами, які не лише збільшують лобову площу (мідель) автомобіля, але й створюють позаду себе сильні завихрення та аеродинамічний шум. Заміна їх на тонкі кронштейни з мініатюрними камерами (як це реалізовано в Audi e-tron або Lexus ES) дозволяє знизити загальний C_x приблизно на 0.01–0.02, що дає відчутну надбавку до запасу ходу.

Приховані дверні ручки: Ще одним стандартом для сучасних енергоефективних автомобілів стали дверні ручки, що повністю ховаються врівень з панеллю дверей. Це забезпечує абсолютно гладку бокову поверхню, виключаючи виникнення локальних мікрозавихрень на кожних дверцятах.



Рисунок 8 - Віртуальні дзеркала-камери (Virtual Mirrors)

Висновки

Аналіз впливу форми кузова на коефіцієнт аеродинамічного опору доводить, що аеродинаміка перетворилася з інструменту досягнення максимальних швидкостей спортивних авто на головний засіб підвищення загальної енергоефективності масового транспорту. На автомагістральних швидкостях саме аеродинамічно вивірена форма кузова є основним інструментом зниження витрат енергії. Для сучасних автомобілів категорії М1, і особливо для електромобілів, мінімізація показника C_x є найбільш раціональним шляхом збільшення запасу ходу без додаткового нарощування маси та вартості акумуляторних батарей.

Перспективи розвитку автомобільного дизайну вказують на неминучий глобальний перехід до максимально «чистих» та цілісних силуетів. Майбутнє належить біонічним, краплеподібним формам, де традиційні виступаючі елементи повністю зникнуть. Фізичні дзеркала, масивні дверні ручки, антени та відкриті решітки радіаторів масово замінюватимуться прихованими компонентами та віртуальними цифровими аналогами. У поєднанні з інтелектуальними системами активної аеродинаміки (Active Aero), які здатні змінювати геометрію кузова в режимі реального часу залежно від умов руху, це дозволить наблизити аеродинамічні показники серійних автомобілів до їхніх абсолютних фізичних оптимумів. Завдяки цьому індустрія зможе забезпечити новий рівень екологічності, акустичного комфорту та економічності транспортних засобів.



Рисунок 9 - Автомобіль майбутнього (Абсолютна обтічність)

Література

1. Кац, Дж. Аеродинаміка гоночних і легкових автомобілів: теорія та практика. *Автомобільна інженерія*, Київ, 2015. С. 45–60.
2. Іванов, О. П., Сидоренко, В. М. Проектування кузовів легкових автомобілів: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2019. 210 с.

3. Петренко, В. М. Дослідження впливу активних аеродинамічних елементів на енергоефективність електромобілів. *Автомобільний транспорт*, 2021. Вип. 48. С. 112–119.
4. Hucho, W. H. (Ed.). *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering*. SAE International, 1998. 936 p.
5. Müller, A., & Schmidt, F. Active Aerodynamics in Modern Electric Vehicles. *Journal of Automotive Engineering*, 2022. Vol. 14. P. 88–104.
6. Katz, J. Aerodynamics of race cars and passenger vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006. Vol. 38. P. 27–63.

Науковий консультант: Писарцов О.С., доцент кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, канд. техн. наук

Дехтяр Антон, ст. гр. АА-41-22

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИСКОВИХ І БАРАБАННИХ ГАЛЬМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Залежно від конструкції фрикційної частини розрізняють барабанні та дискові гальмівні механізми. Гальмівний механізм складається з обертової та нерухомої частин. В якості частини, що не обертається, гальмівні колодки або стрічки в якості обертової частини барабанного механізму використовується гальмівний барабан, конструкція якого представлена на рисунку 1. [1, 2]

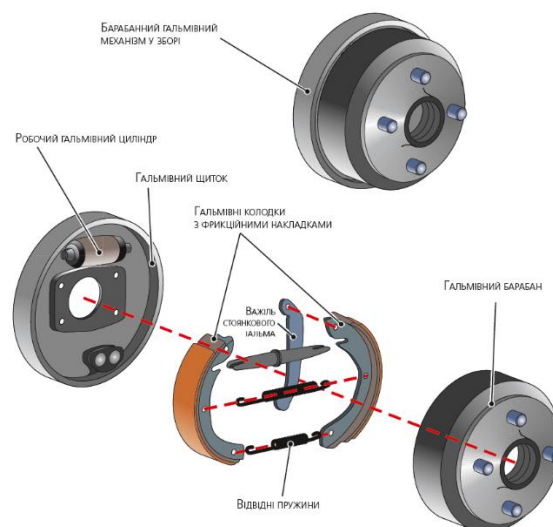


Рисунок 1 – Конструкція барабанного механізму