

Є.Г. Опанасюк, к.т.н., доц.
Д.Б. Бегерський, к.т.н., доц.
М.М. Можаровський, ст. викл.
О.Є. Опанасюк, здобувач

Державний університет «Житомирська політехніка»

Дослідження аеродинамічних показників автопоїзда методом фізичного моделювання

Проаналізовано актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, предмет та об'єкт дослідження. Наведено аналіз відомих досліджень, що пов'язані із вивченням особливостей формування сили опору повітря при русі таких автотранспортних засобів, як магістральні автопоїзди. На основі аналізу стану вивченості питання про фактори впливу геометричних параметрів автопоїздів на аеродинамічний опір обґрунтовано актуальність досліджень, сформульовано їх мету і завдання.

В результаті аналізу методів і засобів відомих досліджень визначено, що найбільш доцільним з точки зору вартості і трудомісткості є використання методу фізичного моделювання. Створено експериментальну установку у складі вентилятора, вирівнювача потоку повітря і масштабної моделі автопоїзда, змонтованих на пристосованій для цього рамі, а також пристрій для вимірювання сили опору повітря. Проведені аналітичні дослідження показали, що наявність зазорів між елементами автопоїзда (напівпричепи і причепа, тягача і причепа) суттєво впливають на величину сили опору повітря, а значить і на енерговитрати для їх подолання. Зазначено, що існуючі методи розрахунку величини сили опору повітря не враховують цієї особливості. Отримані результати експериментальних досліджень підтвердили необхідність усунення цих проміжків. Запропоновано заходи зі зниження сили опору повітря автопоїздів.

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

Серед основних пріоритетів розвитку світового автомобілебудування знаходиться зниження енерговитрат на переміщення автомобіля, залежних від умов експлуатації і конструкції автомобіля та його складових частин, в тому числі і від аеродинамічних показників транспортного засобу. Однією із складових витрат енергії є енерговитрата на подолання сили опору повітря, яка суттєво впливає на витрату палива магістральними автопоїздами, яка, в свою чергу, знаходиться в залежності від коефіцієнта аеродинамічного опору.

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 частині між кузовом тягача і причепом, напівпричепом і причепом. 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 складають 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.

Актуальність роботи полягає в тому, що покращення аеродинамічних показників автопоїздів дозволить енерговитрати на рух магістральних автопоїздів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу зазорів між кузовом тягача і причепом, напівпричепом і причепом на величину сили опору повітря автопоїзда. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначення та дослідження конструктивних факторів впливу на величину аеродинамічного опору руху автопоїзда;
- аналіз відомих конструкцій створення експериментальної установки для визначення сили опору повітря руху транспортного засобу методом фізичного моделювання;
- проведення експериментальних досліджень з визначення впливу зазорів між кузовом тягача і причепом, напівпричепом і причепом на величину сили опору повітря автопоїзда методом фізичного моделювання;
- обробка і аналіз результатів експериментальних досліджень, формування висновків і рекомендацій із покращення аеродинамічних показників автопоїзда.

Огляд відомих досліджень. Як відомо [4], шляхова витрата палива прямо пропорційно залежить від сили опору повітря і визначається за формулою:

$$Q_s = \frac{ge(P_f \pm P_h \pm P_j + P_w)}{36000 \rho_p \eta_T}, \quad (1)$$

де ge – 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_p – густина палива;

η_T – 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 [2, 3, 9] визначається за формулою (2), що була запозичена з галузі аеродинаміки.

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

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;

k_w – емпіричний коефіцієнт опору повітря, Н·с²/м⁴.

З аналізу наведеної формули (2) 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, величина якого, в свою чергу, залежить від таких факторів [3, 5]:

- величини і конфігурації фронтальної, задньої і бічної поверхонь;
- виступів і западин на зовнішній поверхні автомобіля;
- щілин та каналів внутрішньогабаритних потоків;
- шорсткості зовнішньої поверхні;
- конфігурації верхньої та нижньої частин автомобіля.

Огляд наукових досліджень закладів, які займаються питаннями аеродинаміки автомобілів, показує, що поліпшення аеродинамічних характеристик автомобілів є важливим напрямком в автомобілебудуванні. Перелік деяких робіт представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Огляд наукових досліджень

| Напрями досліджень | Назва навчального закладу |
|---|--|
| 1 | 2 |
| Високошвидкісні автомобілі для спорту та їх аеродинаміка | Харківський національний автомобільно-дорожній університет |
| Визначення сил опору кочення та опору повітря експериментальним методом | Харківський національний автомобільно-дорожній університет |
| Параметри турбулентного потоку в аеродинамічній трубі | Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба |
| Вплив параметрів та форм автомобілів на їх аеродинаміку | Московський державний індустріальний університет |
| Аеродинамічні характеристики автомобілів, що визначаються методом фізичного моделювання | Нижньгородський державний технічний університет ім. Р.С. Алексєєва |
| Фізичне моделювання легкових автомобілів | University of Sarajevo |
| Математичні методи дослідження коефіцієнта опору повітря | Bangladesh University of Engineering and Technology |

Перші зразки автомобілів будувалися на основі карет, які не вирізнялися аеродинамічною довершеністю. Одні з перших дослідників форм автомобілів П.Джерей, В.Клемперер, В.Камм, Е.Еверлінг, А.Геллер, Е.Румплер [3, 5] займалися пошуком і впровадженням нових ефективних форм, що дали можливість зменшити опір повітря.

Необхідно окремо виділити роботу В.-Г. Гухо [3], який в своїй книзі «Аеродинаміка автомобіля» зумів зібрати і систематизувати відомості в цій галузі.

В Україні Харківський національний автомобільно-дорожній університет у складі кафедри «Автомобілі» має лабораторію швидкісних автомобілів. Вона була заснована в 1953 році тогочасним ректором Б.В. Решетніковим. На кафедрі займаються створенням автомобіля для встановлення рекордів швидкості в заїздах на кільцевих перегонах.

Так А.Г. Авершин в своїй роботі [1] займався дослідженням швидкості потоку в окремих точках днища гоночного автомобіля Х-31. Виконаний ним експеримент дозволив визначити відповідність даних, отриманих розрахунковим способом, даним, що отримані внаслідок натурного дослідження.

Питання обтічності підднищевої зони легкового автомобіля розглядається в іншій роботі [6]. Окрім проблеми з ростом сили опору повітря при невідповідній конструкції, виникає збільшення підйомної сили на автомобіль. Це призводить до погіршення керованості, стійкості і підвищеної витрати палива. Автор займається як математичним моделюванням обтікання в підднищевій зоні автомобіля, так і експериментальним. Експериментальне дослідження в свою чергу було 2 видів:

- натурне;
- модель в аеродинамічній трубі.

Всебічне дослідження згаданої вище зони автомобіля пояснюється складністю форми днища. До того ж науковий інтерес становить відповідність даних різних видів досліджень одне одному.

У роботі [7] запропонований метод визначення характеристик повітряного потоку за допомогою термоанемометра. Цей пристрій забезпечує вимірювання турбулентних пульсацій у потоці без значного впливу на сам потік. До переваг методу автори зараховують меншу похибку вимірювання, наочність процесу обтікання.

Метод визначення опору руху автомобіля описаний в [4]. Його використання дозволяє розділити аеродинамічний опір та опір коченню за результатами дорожніх випробувань. Основа методу – інтеграція рівняння вибігу автомобіля, в якому функція сумарного опору руху описується повним поліномом другого ступеня швидкості у змінних «шлях-час», за винятком швидкості руху за рахунок введення параметра «повний час вибігу». В результаті була отримана формула шляху-вибігу в функції повного часу, в яку не входить швидкість. При цьому відпала необхідність вимірювання швидкості або уповільнення вибігу, а отже виключена велика група істотних джерел помилок вимірів.

Подібна робота проводилася також в інших дослідженнях на основі методу двократного вибігу: з мінімальним і максимальним завантаженням автомобіля. Результат отриманий після випробувань відповідав даним більш складних методів. Експеримент доступний пересічним водіям, а його обробку за наведеною методикою може виконати будь-який інженер або технік. Для розглянутого методу необхідно підвищувати точність вимірювань часу, оскільки від цього залежить результат всього дослідження.

Визначення впливу типу кузова автомобіля на обтічність описано в [2]. Моделі автомобіля обдуваються в аеродинамічній трубі. Для дослідження було створено три різні передні частини автомобіля і три задні (седан, хетчбек, універсал).

У статті [10] проведена робота з визначення коефіцієнта опору повітря. Для випробувань використовувалася масштабна модель автомобіля Alfa Romeo GT. Такий вид дослідження рекомендується авторами для оптимізації форм автомобілів на ранніх етапах розробки, щоб скоротити фінансові витрати. В статті показана відповідність значення коефіцієнта опору повітря масштабної моделі автомобіля дійсному зразку.

Питання взаємодії зовнішньої й внутрішньої аеродинаміки розглянуто в статті [11]. Також приділена увага зокрема системі охолодження. Розглянуто особливості повітряних потоків у підднищевій зоні та підкапотному просторі. Встановлено механізм утворення прикордонного шару повітря на днищі і його вплив на аеродинамічний опір автомобіля. Результати дають можливість визначити найкращі розташування вхідних перетинів повітрязабірників у мужах обмежень по компонованню.

У [9] описано декілька досліджень, які спрямовані на зменшення сили опору повітря. В одному з розділів розглядаються способи заповнення області низького тиску, що утворюється ззаду автомобіля під час руху.

Зменшити область низького тиску пропонується за допомогою перенаправлення потоку відпрацьованих газів, оскільки її зменшення призведе до зменшення опору повітря, що діє на автомобіль. Також розглядається варіант із модифікацією автомобіля в районі задньої нижньої частини.

Загальні рекомендації для зменшення коефіцієнта опору повітря: підтримувати сталу форму потоку повітря, зменшувати шорсткість поверхонь автомобіля, уникати гострих кромки у формі корпусу автомобіля та по можливості виготовляти поверхні суцільними.

В іншому розділі наведено розрахункове вивчення потоків повітря за допомогою k-ε моделі, що описує рух повітря в ламінарному і турбулентному режимах, а також моменти переходу одного режиму руху в інший.

У [6, 9] наведені приклади математичного моделювання для визначення характеристик повітряного потоку за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса. Ця система диференціальних рівнянь може використовуватися для опису руху газів або в'язкої ньютонівської рідини. Система складається з двох рівнянь:

- рівняння руху;
- рівняння нерозривності.

Система Нав'є-Стокса має таку залежність від числа Рейнольдса (Re):

– при перевищенні значення числа Рейнольдса вище деякого критичного числа, аналітично точне рішення для просторового або плоского потоку матиме хаотичний вигляд (потік набуває турбулентних характеристик). В окремому випадку воно пов'язане з теорією Фейгенбаума або іншими сценаріями переходу до хаосу. При поверненні числа Рейнольдса до значень нижчих критичного рішення знову прийматиме нехаотичний вигляд;

– виняткова чутливість до зміни коефіцієнтів рівняння при турбулентному режимі: при зміні числа Рейнольдса на 0,05 % рішення повністю різнитимуться.

З наведеного аналізу відомих досліджень видно, що в основному дослідниками приділена увага покращенню аеродинамічних властивостей автомобіля за рахунок зміни величини і конфігурації фронтальної, задньої і бічної поверхонь, оптимізації виступів і западин на зовнішній поверхні автомобіля, зменшення шорсткості зовнішньої поверхні, зміни конфігурації верхньої та нижньої частин автомобіля та визначення впливу щілин та каналів внутрішньогабаритних (в основному у підкапотному просторі) протоків, але питанню впливу зазорів між елементами автопоїзда (напівпричепи і причепа, тягача і причепа), що впливають на величину сили опору повітря уваги не приділено.

Аналітичні дослідження аеродинаміки автомобіля пов'язане зі складними розрахунками, а натурні експериментальні – зі значними матеріальними витратами. Тому при проведенні досліджень доцільно використати метод фізичного моделювання, який полягає в експериментальному дослідженні фізичних явищ, що відтворюються в лабораторних умовах. Для цього модель явища зазвичай копіюється у зменшеному масштабі, а якщо необхідно – у збільшеному. До переваг фізичного моделювання можна зарахувати:

- вивчення явища, не складаючи його математичний опис;
- наочність явища, що моделюється;
- зменшення фінансових затрат на досліди порівняно з натурним зразком об'єкта, що досліджується;
- зміна параметрів, що досліджуються, в широких межах.

Розглянемо відомі дослідження з використанням методу фізичного моделювання та їх інструментальне забезпечення.

Обтікання автомобіля зовнішнім потоком повітря – складний процес, який важко описати математичними формулами. Дорожні випробування використовуються конструкторами та дизайнерами автомобілів на останньому етапі конструювання – доведенні. В дорожніх умовах на транспортний засіб, що рухається, діють два поля потоків:

- одне виникає в результаті руху автомобіля вперед;
- друге виникає через природний вітер.

Постійна взаємодія двох потоків призводить до складних процесів обтікання, які важко проаналізувати. Тому при створенні аеродинамічних форм автомобілів для спрощення робіт доцільно замінити дійсний рух по дорозі імітацією руху в аеродинамічній трубі.

Аеродинамічні труби за способом подачі повітря розділяють на два типи конструкцій (рис. 1).

Закритий тип конструкції в загальному випадку потребує меншу потужність приводу вентилятора порівняно з конструкцією відкритого типу. З цієї причини аеродинамічна труба використовує менше електроенергії при своїй роботі. Повітря циркулює по закритій системі. Це надає можливість використовувати аеродинамічну трубу як кліматичний канал, тобто дозволяє задавати певні значення температури і вологості повітря. До недоліків системи належать вартість покупки та встановлення обладнання, яке потрібне для побудови аеродинамічної труби.

Конструкція відкритого типу вимагає менших затрат при побудові установки. Через робочу частину в кожний момент часу проходить нова порція повітря. З цієї причини вентилятор, який створює повітряний потік, має розвивати більшу потужність, ніж в аеродинамічній трубці закритого типу. Це приводить до підвищення експлуатаційних витрат. Крім того, при встановленні такої установки на відкритому повітрі виникає залежність від атмосферних умов.

У роботі [9] використовувалася аеродинамічна труба відкритого типу, яка знаходиться на факультеті інженерної механіки Сараєвського університету (Боснія і Герцеговина).

У роботах [2,7,8] та в дослідженнях Харківського національного автомобільно-дорожнього університету використовувалася аеродинамічна труба закритого типу (знаходиться в Харківському національному університеті Повітряних Сил).

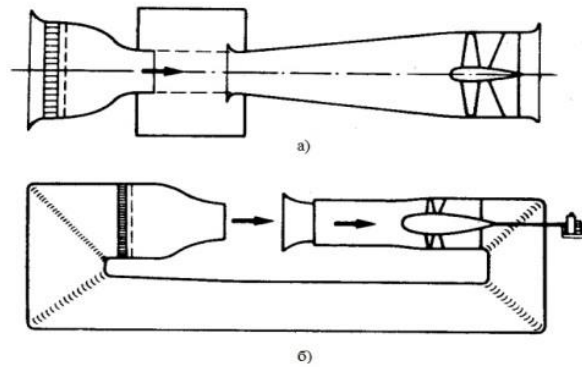


Рис. 1. Типи конструкцій аеродинамічних труб за способом подачі повітря:
а) закритого типу (конструкція Ейфеля); б) відкритого типу (Геттінгенська конструкція)

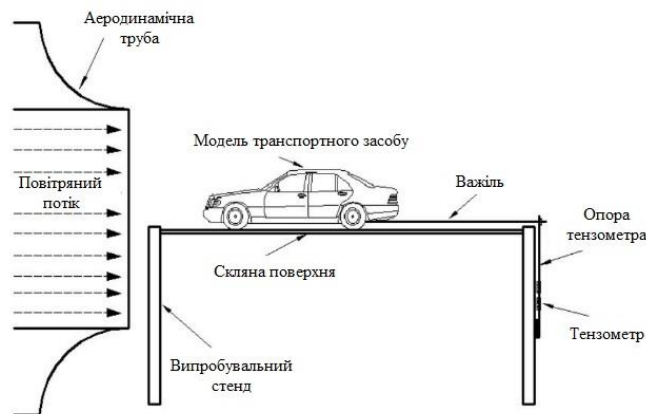


Рис. 2. Установка Сараєвського університету

Експериментальні дослідження. Для проведення експериментальних досліджень аеродинамічних властивостей автопоїзда методом фізичного моделювання спроектована і створена експериментальна установка [8], схема якої представлена на рисунку 3, загальний вигляд – на рисунку 4

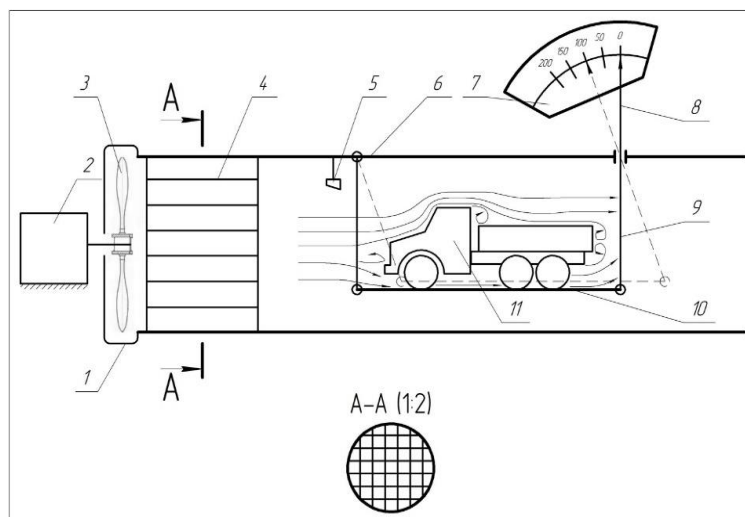


Рис. 3. Схема експериментальної установки
1 – кожух вентилятора; 2 – електродвигун; 3 – вентилятор; 4 – випрямляч потоку повітря;
5 – пристрій для вимірювання швидкості потоку повітря; 6 – прозора оболонка;
7 – вимірювальна шкала; 8 – стрілка вимірювальної шкали;
9 – підвіс; 10 – платформа; 11 – модель автомобіля

До складу експериментальної установки входять такі елементи:

- рама конструкції;
- вентилятор;
- випрямляч потоку повітря;
- платформа для установки моделі автомобіля;
- модель автомобіля;
- акумуляторна батарея для живлення двигуна вентилятора.



Рис. 4. Загальний вигляд установки

До складу експериментальної установки входять такі елементи:

- рама конструкції;
- вентилятор;
- випрямляч потоку повітря;
- платформа для установки моделі автомобіля;
- модель автомобіля;
- акумуляторна батарея для живлення двигуна вентилятора.

Рама установки виготовлена із металевої трубки квадратного перерізу. Вона складається із горизонтально розташованої основи та вертикально приварених до неї стійок.

Для створення потоку повітря було використано вентилятор радіатора Daewoo Lanos 96259175-FORCEONE. Вентилятор кріпиться до стійок рами. До роз'єму вентилятора підключається електричний кабель живлення.

До буртика вентилятора прикріплений випрямляч потоку повітря. Конструкція цього вузла в зборі показана на рисунку 5.



Рис. 5. Вентилятор у зборі з випрямлячем потоку повітря

Випрямляч потоку повітря складається з запаяної труби діаметром 315 мм і довжиною 300 мм та набору пластин з листової сталі, які зібрані таким чином, що б забезпечувати ламінарний рух потоку повітря. Загальна кількість пластин становить 18 штук. Основні характеристики пластин наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні характеристики пластин

| | | | | | |
|-----------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|
| Кількість пластин, шт | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Висота пластини, мм | 315 | 308 | 289 | 252 | 189 |
| Довжина пластини, мм | 260 | | | | |
| Матеріал пластини | Сталь оцинкована | | | | |

Модель автомобіля, що встановлюється на платформі, була виготовлена із пінопласту. Прототипом моделі слугував автомобіль МАЗ-6310. Масштаб моделі становить 1:25. Автомобіль складається з тягача на який встановлено платформу, та причепа. Загальна довжина моделі автомобіля складає 750 мм. Масштабна модель автомобіля зображена на рисунку 6.

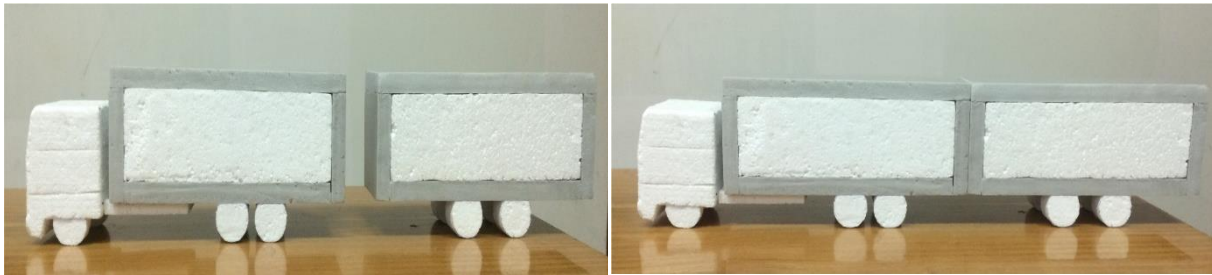


Рис. 6. Фізична модель автомобіля

Для вимірювання швидкості потоку повітря міні-анемометр фірми Uni-T, призначений для вимірювання швидкості і температури потоку повітря.



Рис. 7. Анемометр UT363

Технічні характеристики анемометр-термометра Uni-T UT363 передбачають вимірювання швидкості потоку повітря в діапазоні від 0 до 30 м/с, з кроком вимірювання 0,1 м/с, похибка вимірювань $\pm 5\%$.

Перед початком експериментальних досліджень із визначення сили опору повітря визначено залежність зміни його швидкості по довжині розташування моделі автопоїзда, графік якої наведено на рисунку 8, а також здійснено перевірку характеру руху повітря в зазначеній зоні (рис.9).

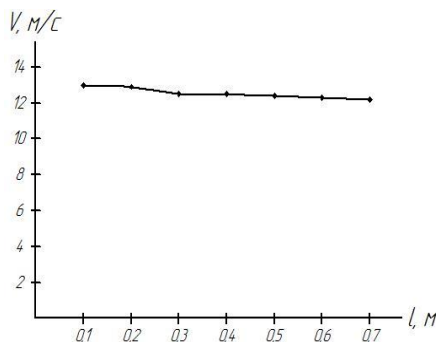


Рис. 8. Залежність швидкості руху потоку повітря від відстані



Рис. 9. Визначення характеру потоку повітря

Характер розташування струменів повітря (рисунок 9) свідчить про те, що використання вентилятора разом із пристроєм для направлення потоку забезпечує ламінарність потоку повітря. Як можна побачити на цьому рисунку, між нитками по всій довжині відсутні взаємні переплетіння і завихрення. Нахил стрічок відносно горизонталі пояснюється силою тяжіння.

Визначення сили опору повітря визначалось за формулою:

$$P_w = (G_o + G_m) \cdot \sin \alpha - G_o \cdot \sin \alpha_o, \text{ Н} \quad (3)$$

де G_o – вага основи, на якій встановлено модель автопоїзда;

G_m – вага моделі автопоїзда;

α – кут відхилення ниток підвісу від вертикалі при «обдуві» моделі, встановленої на основі;

α_o – кут відхилення ниток підвісу від вертикалі при «обдуві» основи.

Положення ниток підвісу при нульовій швидкості повітря та при включеному вентиляторі показано на рисунку 10.



Рис. 10. Положення ниток підвісу при визначенні сили опору повітря
а – при нульовій швидкості повітря; б – при включеному вентиляторі

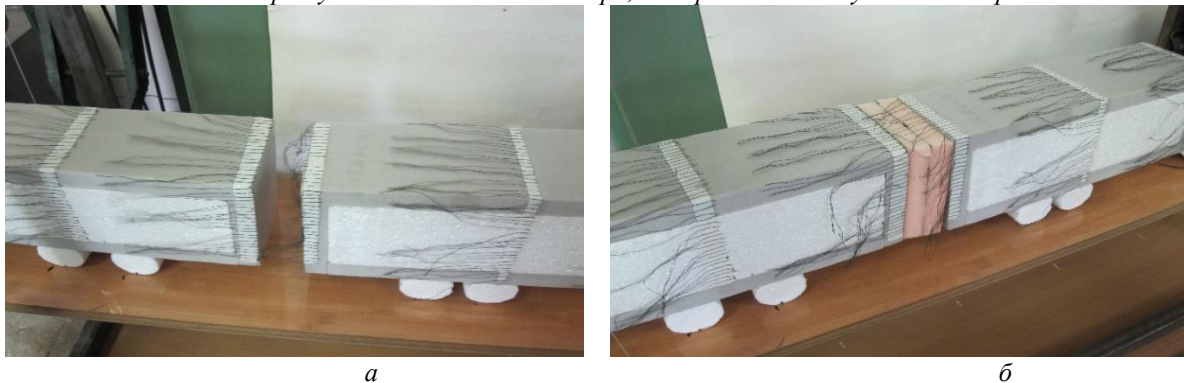


Рис. 11. Характер потоку повітря в зоні між кузовами тягача і причепа
а – при наявності зазору між ними; б – при відсутності зазору

Аналізуючи наведені рисунки (рис.11 а, б) видно, що потік повітря різко змінює свою форму в місці між кузовами тягача і причепа, де зіштовхується з передньою стінкою причепа. Такий характер обтікання означає те, що при наявності зазору виникають збільшені сили опору повітря. За відсутності цього зазору завихрення потоку повітря відсутні.

Як вже зазначалося, при ефекті завихрення повітря для будь-якого автомобіля збільшується сила опору повітря, а відповідно – витрата палива.

Проведені розрахунки за результатами досліджень аеродинаміки автопоїзда методом фізичного моделювання показали, що при всіх інших незмінних геометричних параметрах автопоїзда усунення зазору між кузовами-фургонами тягача і причепа позитивно впливає на паливну економічність автопоїзда (рис. 12).

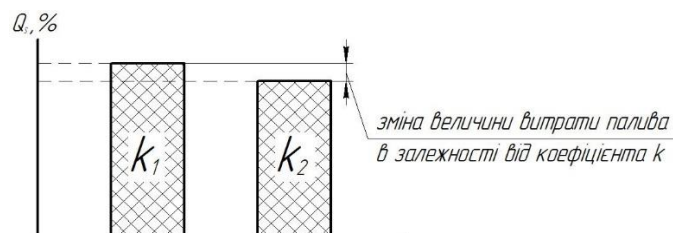


Рис. 12. Діаграма витрати палива, залежно від значення коефіцієнта опору повітря

В проведеному досліді закриття проміжку між причепом і напівприцепом призвело до зміни коефіцієнта опору повітря. Коефіцієнтом k_1 позначено значення коефіцієнта опору в момент, який зображено на рисунку. 11. а, тобто при наявному зазорі між причепом і напівприцепом. Коефіцієнтом k_2 позначено значення коефіцієнта опору при відсутньому зазорі (рис. 11. б).

Висновки:

1. Проведений аналіз впливу геометричних параметрів автопоїзда у складі тягача і причепа на показники його аеродинамічних властивостей.
2. Створено експериментальну установку для досліджень аеродинаміки автопоїзда методом фізичного моделювання.
3. Проведені експериментальні дослідження показали, що при всіх інших незмінних геометричних параметрах автопоїзда усунення зазору між кузовами-фургонками тягача і причепа позитивно впливає на паливну економічність автопоїзда за рахунок зниження коефіцієнту опору повітря.
4. Запропоновано використання гнучкого спойлера для усунення зазору між кузовами тягача і причепа, який буде складатися при поворотах.

Список використаної літератури:

1. Авершин А.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических характеристик гоночного автомобиля ХАДИ-31 / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов // Автомобильный транспорт. Сб. науч. пр. – Х. : ХНАДУ. – 2005. – № 16. – С. 228–231.
2. Анучин И.Е. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик масштабных макетов автомобилей / И.Е. Анучин, В.В. Беляков, В.И. Егоров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (103). – С. 130–135.
3. Аэродинамика автомобиля / под ред. В.Г. Гухо. – М. : Машиностроение, 1987. – 420 с.
4. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспор-та) / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. – Харьков : РИО ХГАДТУ, 1999. – 468 с.
5. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля : учебное пособие / А.Н. Евграфов. – М. : МГИУ, 2010. – 356 с.
6. Ильин Е.В. Совершенствование аэродинамики подднищевой зоны легкового автомобиля : Дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Ильин. – М., 2003. – 182 с.
7. Экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей / Е.А. Украинец, В.В. Василенко, И.В. Романенко, И.О. Коломиец // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1. – С. 242–247.
8. Kravchenko S. Method of physical simulation in determining an automobile erodynamic indicators / S.Kravchenko, L.Mohelnyska, Je.G. Opanasjuk // Current Trends in Young Scientists' Research V All Ukrainian Scientific and Practical Conference. – Zhytomyr : ZSTU, 2018. – P. 21–22.
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. Pikula B. Determination of air drag coefficient of vehicle models / B.Pikula, E.Mešić, M.Hodžić // International Congress Motor Vehicles & Motors. – 2008 [Electronic resource]. – Access mode : www.researchgate.net/publication/235988524.
11. Walker T. Some Aspects of the Aerodynamic and Thermodynamic Development of the new Volvo XC90 / T.Walker // International Stuttgart Symposium, Automotive and Engine Technology.

References:

1. Avershin, A.G. and Solodov, V.G. (2005), «Komp'yuternoe modelirovanie aerodinamicheskikh kharakteristik gonochnogo avtomobilya KhADI-31» Avtomobil'nyy transport. Sb. nauk. pr., No. 16, HNADU, H., pp. 228–231.
2. Anuchin, I.E., Belyakov, V.V. and Egorov, V.I. (2014), «Eksperymental'noe yssledovanye aэrodynamicheskyykh kharakterystyk masshtabnykh maketov avtomobylej», *Tруды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, No. 1 (103), pp. 130–135.
3. Gukho, V.G. (ed) (1987), *Aэродинамика avtomobilya*, Mashinostroenie, Moscow 420 p.
4. Govorushchenko, N.Ya. and Turenko, A.N. (1999), *Sistemotekhnika transporta (na primere avto-mobil'nogo transporta)*, RIO KhGADTU, Kharkiv, 468 p.
5. Evgrafov, A.N. (2010), *Aэродинамика avtomobylja*, учебное posobye, MGYU, M., 356 p.
6. Il'in, E.V. (2003), «Sovershenstvovanye aerodinamiki poddnishchevoy zony legkovogo avtomobilya. dissertation, Moscow» Abstract of kand. tehn. nauk, M., 182 p.
7. Ukrainets, E.A., Vasilenko, V.V., Romanenko, I.V. and Kolomiets, I.O. (2014), «Ekspress-metodika izmereniya mestnoy skorosti potoka v aerodinamicheskoy trube malyykh dozvukovykh skorostey», *Sistemi ozbroennya i viys'kova tekhnika*, No 1, pp. 24–247.
8. Kravchenko, S., Mohelnyska, L. and Opanasjuk, Je.G. (2018), «Method of physical simulation in determining an automobile erodynamic indicators», *Current Trends in Young Scientists' Research V All Ukrainian Scientific and Practical Conference*, ZSTU, Zhytomyr, pp. 21–22.
9. Hassan, R., Islam, T., Ali, M. and Islam. Q. (2014), «Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars», *Procedia Engineering*, Vol. 90, pp. 308–313.
10. Pikula, B., Mešić, E. and Hodžić M. (2008), «Determination of air drag coefficient of vehicle models», *International Congress Motor Vehicles & Motors*, [Online], available at: www.researchgate.net/publication/235988524

11. Walker, T., «Some Aspects of the Aerodynamic and Thermodynamic Development of the new Volvo XC90», *International Stuttgart Symposium, Automotive and Engine Technology*.

Опанасюк Євгеній Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Житомирський державний технологічний університет.

Наукові інтереси:

- прохідність автомобілів;
 - експлуатаційні властивості автомобілів;
 - перспективні методи дослідження надійності та експлуатаційних властивостей автомобілів.
- Тел.: +38 (067) 647–09–77.

Бегерський Дмитро Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Житомирського державного технологічного університету.

ORCID: 0000-0002-8357-0038

Наукові інтереси:

- прохідність автомобілів;
- моделювання транспортних потоків;
- моделювання технологічних процесів автомобільного транспорту.

Тел.: +38 (093) 600–10–67.

E-mail: begerskiy@gmail.com.

Можаровський Микола Мар'янович – старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка і міцність машин;
- експлуатаційні властивості автомобілів.

Тел.: +38 (097) 261–31–77.

Опанасюк Олександр Євгенович – здобувач кафедри автомобілів і транспортних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- прохідність автомобілів;
- експлуатаційні властивості автомобілів;
- перспективні методи дослідження надійності та експлуатаційних властивостей автомобілів.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2019.