

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ  
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**«Дослідження впливу геометричної форми кузова легкового автомобіля  
на його аеродинамічні властивості»**

Виконав: студент групи Маш-62

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

Роман ПАШКО

(Ім'я та прізвище)

Керівник: Ігор СТУКАЛЕЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

Освітній ступінь «Бакалавр»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»  
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри машинобудування

\_\_\_\_\_  
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу студенту

Пашку Роману Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження впливу геометричної форми кузова легкового автомобіля на його аеродинамічні властивості»

Керівник роботи: Стукалець Ігор Геннадійович, к. т. н., доцент

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 5.12.2025 року

3. Вихідні дані: кузови автомобілів: седан, хетчбек, універсал, позашляховик, фургон, мінівен; швидкість руху автомобіля: 90...140 км/год.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Вивчити питання стосовно впливу форми та параметрів кузова на аеродинамічні характеристики автомобіля.
2. Змодельовати тривимірні макети кузовів легкових автомобілів.
3. Виконати аеродинамічний аналіз руху легкового автомобіля з різним виконанням кузовів.
4. Проаналізувати одержані результати.
5. Запропонувати заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час робіт, пов'язаних з виконанням аеродинамічних досліджень.
6. Розробити висновки і пропозиції.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу та графічної частини кваліфікаційної роботи

1. Ілюстраційна частина – презентація результатів роботи з висвітленням таких питань:

Історія автомобільної аеродинаміки; класифікація легкових автомобілів за типом кузова; особливості обтікання легкового автомобіля; розроблені тривимірні моделі кузовів автомобілів; методика проведення досліджень; аналіз одержаних результатів; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта                           | Підпис, дата   |                  | Відмітка про виконання |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------|
|        |                                                                     | завдання видав | завдання прийняв |                        |
| 1-3    | Стукалець І. Г. к.т.н.,<br>доцент кафедри<br>машинобудування        |                |                  |                        |
| 4      | Городецький І. М., к.т.н.,<br>доцент кафедри<br>інженерної механіки |                |                  |                        |

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Поз. № | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                | Термін виконання етапів роботи | Відмітка про виконання |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1.     | Виконання 1-го розділу                                                                             | 28.02.2025-4.04.2025           |                        |
| 2.     | Виконання 2-го розділу                                                                             | 7.04.2025-2.05.2025            |                        |
| 3.     | Виконання 3-го розділу                                                                             | 5.05.2025-10.10.2025           |                        |
| 4.     | Виконання 5-го розділу                                                                             | 13.10.2025-21.11.2025          |                        |
| 5      | Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та ілюстраційної частини. Завершення роботи в цілому | 24.11.2025-5.12.2025           |                        |

Студент \_\_\_\_\_ Роман ПАШКО  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Ігор СТУКАЛЕЦЬ  
(підпис)

Дослідження впливу геометричної форми кузова легкового автомобіля на його аеродинамічні властивості.

Пашко Роман Сергійович – Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025. 69 с.

Кваліфікаційна робота: 69 с. текст. част., 48 рис., 3 табл., 27 бібліогр. джерел, презентаційний матеріал у форматі \*.ppsx.

В роботі проаналізовано історію автомобільної аеродинаміки та еволюцію кузовів автомобілів з точки зору аеродинамічних процесів. Виконано аналіз класифікації автомобілів за типом кузова. Вивчено підходи до проєктування сучасних автомобілів з точки зору аеродинаміки.

Розроблено та описано методику проведення аеродинамічного дослідження кузовів легкових автомобілів з використанням модуля *SolidWorks Flow Simulation*, що ґрунтується на методі скінченних об'ємів.

Виконано тривимірне моделювання кузовів автомобіля та проведено аеродинамічний аналіз легкового автомобіля з різним виконанням кузова, а саме: седан, хетчбек, універсал, позашляховик, фургон та мінівен. За результатами моделювання визначено значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$  для кожного кузова. Побудовано залежності значень сили лобового опору від швидкості руху в діапазоні  $V=90\ldots140$  км/год., що дало змогу оцінити вплив форми кузова на силу лобового опору.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                       | <b>7</b>  |
| <b>1. СТАН ПИТАННЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>                                                                 | <b>10</b> |
| 1.1. Історія автомобільної аеродинаміки та еволюція форми автомобільного кузова.....                                    | 10        |
| 1.2. Класифікація легкових автомобілів за типом кузова .....                                                            | 17        |
| 1.3. Сучасні підходи до проектування кузовів автомобілів з точки зору аеродинаміки.....                                 | 24        |
| 1.3. Вплив форми та параметрів кузова на аеродинамічні характеристики пасажирських автомобілів.....                     | 27        |
| 1.4. Особливості обтікання легкового автомобіля з кузовами різного типу ..                                              | 37        |
| <b>2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>                                                                                  | <b>42</b> |
| 2.1. Вибір типів кузовів легкових автомобілів для досліджень .....                                                      | 42        |
| 2.2. Методика тривимірного моделювання макету кузова легкового автомобіля .....                                         | 43        |
| 2.3. Методика проведення аеродинамічного дослідження кузовів легкових автомобілів .....                                 | 47        |
| <b>3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>                                                                            | <b>51</b> |
| 3.1. Аналіз результатів аеродинамічного дослідження легкових автомобілів.....                                           | 51        |
| 3.2. Аналіз результатів параметричного аеродинамічного дослідження легкових автомобілів за різних швидкостей руху ..... | 55        |
| <b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>                                                        | <b>57</b> |
| 4.1. Загальні положення.....                                                                                            | 57        |

|                                     |                                               |           |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------|
| 4.2.                                | Вимоги безпеки перед початком роботи.....     | 61        |
| 4.3.                                | Вимоги безпеки під час виконання роботи ..... | 61        |
| 4.4.                                | Вимоги безпеки після закінчення роботи.....   | 63        |
| 4.5.                                | Вимоги безпеки в аварійній ситуації .....     | 63        |
| <b>ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ .....</b>  |                                               | <b>65</b> |
| <b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....</b> |                                               | <b>67</b> |

## ВСТУП

Сучасний технічний рівень виробництва відкриває широкі перспективи проєктування автомобіля. Технології, а отже, і можливості формоутворення, безпосередньо впливають на дизайнерське проєктування кузова.

Сьогодні все більшої актуальності набуває проблема розвитку методів художнього конструювання автомобіля. Еволюція інженерних технологій призвела до зміни принципів проєктування високотехнологічних промислових виробів та взаємодії фахівців, які беруть участь у цьому процесі.

Основним завданням автомобільного дизайну є підвищення технічного рівня та конкурентоспроможності проєктованих автомобілів.

При цьому є можливість безпосереднього впливу на технічний рівень та конкурентоспроможність швидкісних автотранспортних засобів шляхом вдосконалення їх аеродинамічних властивостей, що досягається за рахунок відпрацювання форми та параметрів кузова в процесі художнього конструювання автомобіля.

Аеродинаміка значною мірою впливає на такі важливі показники автомобіля як: паливна економічність, динаміка, безпека, продуктивність, екологічність, а також на рівень його споживчих якостей. Оскільки вплив аеродинаміки проявляється за високих швидкостей руху, то основна увага приділяється дослідженню та покращенню аеродинамічних характеристик швидкісних автотранспортних засобів.

В даний час спостерігається підвищений інтерес до аеродинаміки автомобіля. На сьогодні налічується понад двадцять складних аеродинамічних та аерокліматичних комплексів, які стали невід'ємною частиною деяких автомобільних фірм або науково-технічних центрів, що займаються автомобілебудуванням та доведенням автомобілів. Витрати на будівництво таких комплексів та вартість проведення дослідження у них значні.

Так, наприклад, вартість аеродинамічного комплексу на фірмі «Порше» складає близько 19 млн. євро, а одна година випробувань в аеродинамічній

трубі там коштує 1500 євро. Однак, незважаючи на високу вартість, будівництво подібних комплексів розширюється, оскільки сьогодні автомобільна техніка стала показником технічного рівня як фірми, а й держави загалом. Автомобільне обладнання базується на складній електронній техніці, до розробки автомобіля залучаються фахівці з різних галузей науки та техніки. Одним з найважливіших напрямів цієї роботи стало аеродинамічне проектування автомобіля, засноване на системній оптимізації його аеродинамічних властивостей, що дозволяє суттєво підвищити паливну економічність, продуктивність автомобіля, знизити забруднюваність та рівень шуму. При цьому досягнення мінімального значення коефіцієнта аеродинамічного опору не є єдиним завданням аеродинамічного проектування автомобіля.

Поряд з використанням аеродинамічних труб в автомобілебудуванні широко використовують комп'ютерне імітаційне моделювання руху автомобіля для визначення його аеродинамічних характеристик.

Дослідженнями встановлено, що зниження аеродинамічного опору на 4% забезпечує зменшення витрат палива автотранспортним засобом приблизно на 1%. Враховуючи наявну в даний час необхідність підвищення рівня аеродинамічних якостей вітчизняних легкових і вантажних автомобілів, а також автопоїздів, очікується, що вдосконалення їх дозволить забезпечити зниження витрати палива на 4-5%. При цьому за рахунок розробки, постановки на виробництво та накопичення в автомобільному парку країни автотранспортних засобів зі зниженим на 15-20% аеродинамічним опором орієнтовно може бути досягнуто економії палива близько 2 млн. т.

Дослідженнями встановлено, що аеродинамічні характеристики автомобілів значною мірою залежать від типу кузова та його геометричної форми. На підставі вищенаведеного сформульовано мету, об'єкт, та предмет досліджень [1, 2, 7, 12].

**Мета досліджень** кваліфікаційної роботи – дослідити вплив геометричної форми кузова легкового автомобіля на його аеродинамічні властивості, зокрема на значення коефіцієнта лобового опору.

**Об'єкт досліджень** – аеродинамічні характеристики кузова автомобіля; типи кузовів автомобілів: седан, хетчбек, універсал, позашляховик, фургон, мінівен.

**Предмет досліджень** – залежності значень коефіцієнта лобового опору від геометричної форми кузова автомобіля.

# 1. СТАН ПИТАННЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1. Історія автомобільної аеродинаміки та еволюція форми автомобільного кузова

Перші легкові автомобілі, які випускалися на початку ХХ століття, мали кузови каретоподібної форми, що робило їх поганообтічними. Значення коефіцієнта аеродинамічного опору цих автомобілів становило 0,7-0,8. Це, враховуючи малу потужність двигунів, що встановлювалися на них, було однією з перешкод у досягненні високих швидкостей руху, що і послужило основною причиною розгортання робіт з удосконалення аеродинаміки автомобільного кузова. Цікавою є історія розвитку та становлення автомобільної аеродинаміки з точки зору вдосконалення форми та обтічності кузова.

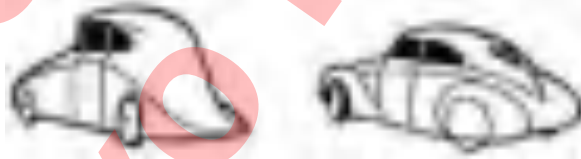
У розвитку автомобільної аеродинаміки можна виділити чотири основні етапи (табл. 1.1). Перші три стосуються переважно експериментального відпрацювання форми кузовів легкових автомобілів.

Перший етап (1900-1920 рр.) був характерний запозиченням і прямим перенесенням в кузовобудування тіл обертання та обтічних форм з інших областей техніки: дирижаблебудування, суднобудування та ін. До перших обтічних автомобілів слід віднести автомобіль, що мав електричний привід, – автомобіль Дженатца (рис 1.1, а). Його кузов у формі торпеди з відношенням довжини до діаметра, рівний 4, мав хорошу обтічність, що дозволило автомобілю досягти дуже високої на ті часи (1899 р.) швидкості в 106 км/год. Іншим прикладом використання обтічних форм є автомобіль Альфа Ромео (рис. 1.1, б), кузов якого був запозичений з дирижаблебудування (1912 р.). Були також розроблені обтічні кузови, задня частина яких була виконана у вигляді «остова корабля».

Другий етап (1921-1960 рр.) – це період розробки та створення автомобільних кузовів обтічних форм. Усі досягнення в аеромеханіці в частині

поліпшення обтічності, в тому числі в літакобудуванні, застосовувалися при створенні обтічних автомобілів.

Таблиця 1.1 – Етапи розвитку автомобільної аеродинаміки

| Роки      | Принципи зниження коефіцієнта $C_x$ легкових автомобілів | Приклади розроблених кузовів                                                                                                               |
|-----------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1900-1920 | Запозичення обтічних форм з інших галузей техніки        | <br><i>Торпеда</i>                                      |
|           |                                                          | <br><i>Остов корабля      Дирижабль</i>                  |
| 1921-1923 | Створення обтічних кузовів                               | <br><i>Румплер      Бугатті</i>                         |
| 1922-1939 |                                                          | <br><i>Джерей</i>                                      |
| 1934-1939 |                                                          | <br><i>Камм      Шлер</i>                              |
| з 1955 р. |                                                          | <br><i>Сітроен ДС-90      НСУ R0 80</i>                |
| з 1975 р. | Поелементна оптимізація форми кузова                     | <br><i>Фольксваген Сцирокко      Фольксваген Гольф</i> |

Після Першої світової війни створення обтічних кузовів почалося одночасно у низці країн. При цьому широко використовувалися літакові аеродинамічні праці, що залишилися бездіяльними, і інформація з аеродинаміки літаків. Особливо інтенсивні розробки в галузі автомобільної

аеродинаміки велися в цей період у Німеччині. Відомий авіаконструктор Румплер розробив кузов автомобіля, який мав форму профілю крила. Щоб корисно використовувати завужену задню частину кузова, двигун у цього автомобіля був розміщений ззаду. За результатами випробувань, виконаних в 1979 р. в аеродинамічній трубі фірми «Фольксваген» (Німеччина) на представленому німецьким автомобільним музеєм оригіналі цього автомобіля, його коефіцієнт  $C_x=0,28$ . Показаний у табл. 1.1 гоночний автомобіль «Бугатті» був розроблений в 1923 р. Кузов цього автомобіля був також профіль крила, але розташованого горизонтально.



Рисунок 1.1 – Перші автомобілі з кузовами, що обтікають:

а) «Дженагца»; б) «Альфа Ромео»; в) «Адлер-Тріумф»; г) «Тагра-87»

Кузова, розроблені Джереєм, містять елементи крилоподібних профілів та тіл обертання. В основу його ідеї формоутворення кузова покладена комбінація з двох добре обтічних тіл: нижнє являло собою крилоподібний профіль, на який перпендикулярно встановлювався симетричний обтічний профіль, або напівтіло обертання. Запропонована Джереєм концепція формоутворення кузова була в 1934 реалізована в спортивному автомобілі «АдлерТріумф» (рис. 1.1, в). Він мав привід на передні колеса, а об'єм двигуна становив 1,5 л. Серійний автомобіль, які мали форму кузова «Джерея», була розроблена в 1940 р. в Чехословаччині «Татра-87» (рис. 1.1, г). Відносне подовження кузова було менше, ніж у Адлер-Тріумф: 2,9 проти 3,3.

Восьмициліндровий двигун розміщувався ззаду. За результатами випробувань в аеродинамічній трубі фірми Фольксваген значення коефіцієнта  $C_x$ , для цього автомобіля склало 0,36.

У цей час ряд розробок у сфері обтічних кузовів було виконано американськими дослідниками: Фішлаєм, Хилдом, Леєм, Рейдом. Подані в табл. 1.2 моделі автомобілів з розробленими ними на базі напівтіл обертання кузовами з втопленими в них колесами мали більш ніж у три рази менший, ніж моделі серійних автомобілів, що випускалися в США в 1922-1933 рр. Серед цих робіт слід виділити результати досліджень співробітника Мічиганського університету Лея. Системно змінюючи форму автомобіля спереду та ззаду, Лей показав її вплив на коефіцієнт аеродинамічного опору. У цей час для зниження аеродинамічного опору автомобіля значно подовжували хвостову частину кузова, що забезпечувало покращення обтічності за рахунок зменшення супутнього сліду. Однак при цьому зростали габарити автомобіля, що негативно позначалося на його маневреності.

Найважливіший результат виконаних Леєм досліджень висновок про те, що для автомобіля, що має в цілому обтічну форму, форма задка, що різко опускається, в порівнянні з витягнутою дає порівняно невелике збільшення аеродинамічного опору. Теоретичне обґрунтування цього явища було зроблено німецьким ученим Каммом, який став розробником обтічного кузова зі зрізаною задньою частиною. Форма такого кузова називається формою Камма або скорочено «К-форма». Перевагою таких кузовів була наявність значно більшого простору над головою в зоні заднього сидіння за збереження малого значення коефіцієнта  $C_x$ . Низький коефіцієнт, у автомобіля «Камма» досягається за рахунок того, що при хорошому обтіканні його носової частини повітряний потік щільно прилягає до даху і, завдяки його оптимальній формі, а також крутому зрізу задка, плавно перетікає для відриву на значно менший поперечний переріз кузова. Це різко зменшує поперечний переріз вихрового сліду та зону розрідження за автомобілем. На рис. 1,3, а показаний автомобіль Кама і характер його обтікання при випробуваннях в аеродинамічній трубі

Фольксваген, за результатами яких значення коефіцієнта  $C_x$  склало 0,37. На рис. 1.3, б показано порівняння силуетів кузовів автомобілів «Камма», «Адлер-Тріумф» та «Татра-87».



Рисунок 1.2 – Характер обтікання автомобіля «Камма» (а) та порівняння силуетів кузовів трьох автомобілів (б):

1 – «Татра 87»; 2 – «Камма»; 3 – «Адлер-Тріумф»

У таблиці 1.1 показаний обтічний автомобіль «Шлера», кузов якого мав форму напівтіла обертання. Такий прийом побудови обтічного кузова був широко поширений у період його формоутворення. Поздовжнє середнє переріз кузова «Шлера» утворювалося двома крилоподібними профілями, що мали однаковий коефіцієнт аеродинамічного опору  $C_x = 0,125$ . Колеса були закриті кузовом, що через необхідність забезпечення кінематики повороту передніх коліс призвело до збільшення ширини носової частини до 2100 мм.

Висота та довжина автомобіля «Шлера» становили: 1275 і 4328 мм відповідно, а його лобова площа – 2,54 м. Значення коефіцієнта, цього автомобіля дорівнювало 0,19. Автомобілем «Шлера» завершився напрям створення кузовів у формі напівтіл обертання. Така форма не знайшла застосування на серійних автомобілях.

До розробки обтічних серійних кузовів, перерваної Другою світовою війною, повернулися на початку 50-х років. При цьому поряд із удосконаленням форми та дизайну автомобіля зменшувалася його лобова

площа. У цілому сьогодні така еволюція форми кузова та її лобової площі наочно видно з прикладу автомобілів фірми «Сітроен» (Франція) (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Еволюція форми кузова автомобілів фірми «Сітроен»

| Форма кузова автомобіля                                                             | Модель, рік випуску    | Коефіцієнт аеродинамічного опору |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
|    | Сітроен В2, 1921       | 1,437                            |
|    | Сітроен 7CV, 1934      | 1,230                            |
|    | Сітроен DS 19, 1956    | 0,817                            |
|   | Сітроен GSA-X3, 1980   | 0,575                            |
|  | Сітроен ECO 2000, 1986 | 0,307                            |

Видно, що величина фактора  $C_x$ , що характеризує аеродинамічний опір автомобіля, знизилася більш ніж у чотири рази. Поштовхом до різкої активізації робіт зі створення обтічних кузовів послужила відома світова нафтова криза 1974 р., що вимагала зниження витрати палива автомобілів. У 80-х роках практично всі провідні автомобільні фірми Європи, США та Японії за спеціальними програмами розробляли прототипи економічних легкових автомобілів з обтічними формами кузова.

Це позначилося і формі кузовів серійних легкових автомобілів, значення коефіцієнта  $C_x$  яких до 1990 р. було доведено до 0,3, а 2000 р. – до 0,2. Таким чином, починаючи з післявоєнного періоду, значення коефіцієнта  $C_x$  легкових автомобілів знизилося втричі.

Третій період розвитку автомобільної аеродинаміки характеризується іншими підходами до вдосконалення аеродинаміки кузова, оскільки поряд з

обтічністю велику увагу стали приділяти компонування кузова, його безпеки та ергономічності. Під час проектування кузова ці питання ставали пріоритетними.

Починаючи з 1975 р. широкого поширення набув вперше випробуваний фірмою «Фольксваген» метод поелементної аеродинамічної оптимізації автомобіля, що проектується. При цьому вихідним для аеродинамічного відпрацювання автомобіля в аеродинамічній трубі є дизайнерський проект зовнішньої форми і зміни в форму кузова, що вносяться за результатами аеродинамічних випробувань, не повинні змінити його дизайнерську концепцію в цілому.

В даний час спостерігається четвертий етап розвитку аеродинаміки автомобіля. Він характеризується широким використанням розрахункових досліджень, можливістю проведення комп'ютерного моделювання аеродинамічної форми, високоточними параметричними дослідженнями в малих і великих аеродинамічних трубах, а також застосуванням дорожніх методів аеродинамічних випробувань натурних автомобілів.

На рис. 1.3 показано аеродинамічну еволюцію форми кузова легкових автомобілів. Характерним, у тому числі з міркувань поліпшення обтічності, є перехід на двооб'ємні кузови, а також певний інтерес до однооб'ємних кузовів, застосування яких дозволяє проводити проектування автомобілів зі значеннями коефіцієнта  $C_x$ , менше 0,2. Наведена на рис. 1.3 діаграма показує, що до 2010 р. очікуване значення коефіцієнта  $C_x$  легкових автомобілів з обтічними кузовами може становити близько 0,15. Поряд зі зниженням  $C_x$  зменшуватиметься і лобова площа автомобілів, тому величина їхнього фактора обтічності може бути доведена до 0,25. Таке значне зниження аеродинамічного опору дозволить суттєво підвищити паливну економічність та швидкісні характеристики автомобілів [13, 14-17, 21, 23].



Рисунок 1.3 – Аеродинамічна еволюція форми кузова легкового автомобіля

## 1.2. Класифікація легкових автомобілів за типом кузова

Сучасний автомобільний ринок пропонує нам широкий спектр різних типів кузова. І розібратися в цьому різноманітті буває непросто. До звичних хетчбеків та універсалів за останні роки додалися купе-кросовери, шутинг-брейки, мінівени і навіть кабриолети-кросовери. Кожен із них має унікальні риси і часом дуже відрізняються від інших.

Типи кузовів легкових автомобілів:

- седан;
- хетчбек;
- універсал;
- купе;
- кабриолет;
- мінівен;
- позашляховик;
- кросовер та інші.

Розглянемо кожен тип кузова окремо.

**Седан** (рис. 1.4). Седани бувають різних розмірів і форм. Їх часто називають автомобілями «з трьома відсіками», де один «відсік» відведений під двигун, другий – це салон, а третій – багажник.

До популярних моделей відносяться, наприклад, *Geely Emgrand* та *Audi A4* із сегмента компактних седанів, а також флагманські розкішні автомобілі на кшталт *Mercedes S-Class*. Подовжена колісна база робить седани комфортнішими, пропонуючи більше простору для ніг у салоні. Однак з практичністю вони поступаються хетчбекам – багажники у седанів не відкриваються так широко і не надають достатньо вертикального простору для вантажу.

**Кросовер (SUV)** (рис. 1.5). Аббревіатура SUV розшифровується як *sports utility vehicle* – спортивно-утилітарний автомобіль. Цей клас включає машини всіх розмірів та стилів, від компактних міських кросоверів на зразок *SEAT Arona* до великих позашляховиків з акцентом на прохідність, таких як *Jeep Wrangler*. Головна особливість кросоверів – збільшена висота кузова в порівнянні з хетчбеками та седанами, що забезпечує кращу оглядовість та зручність посадки. Ще одна характерна риса – багажник у стилі хетчбека, що відкривається вверх, хоча в деяких моделях можна зустріти бічні двері багажника.



Рисунок 1.4 – Автомобіль з типом кузова «седан»



Рисунок 1.5 – Автомобіль з типом кузова «кросовер»

**Шутінг-брейк** (рис. 1.6) На перший погляд, *shooting brake* може здатися лише варіацією універсала, що відрізняється трохи похилою кришкою багажника. Назва *shooting brake* бере своє коріння з епохи кінних екіпажів, які

використовувалися для перевезення мисливських партій заміськими маєтками. Згодом ця назва перейшла до унікального кузова автомобіля, який поєднує практичність універсала з вишуканістю купе. Сьогодні такі моделі, як *Volkswagen Arteon Shooting Brake*, *Mercedes CLA Shooting Brake* та *Genesis G70 Shooting Brake* є рідкісними, але привабливими представниками цього класу.

**Позашляховик** (рис. 1.7) Позашляховик – це автомобіль, призначений для пересування по складних і важкопрохідних маршрутах, включаючи бездоріжжя, бруд, пісок і сніг. Ці автомобілі оснащені покращеною підвіскою, підвищеною прохідністю і часто повним приводом, що дозволяє їм справлятися з будь-якими природними перешкодами. Позашляховики можуть бути як компактними, так і великими, з різними характеристиками від спортивних до сімейних моделей, таких як *Toyota Land Cruiser* або *Jeep Wrangler*.



Рисунок 1.6 – Автомобіль з типом кузова «шутінг-брейк»



Рисунок 1.7 – Автомобіль з типом кузова «позашляховик»

**Мінівен** (рис. 1.8). Мінівен або MPV – цей тип машин ідеально підходить для сімей, яким потрібно максимум простору та практичності. Відмінні риси MPV – високі дахи, просторі салони та часто семимісна конфігурація. Деякі моделі оснащені зсувними дверима, що додає зручності при посадці пасажирів. Незважаючи на великі габарити, мінівени все ще непогано управляються і нерідко перевершують кросовери практичності. Першим подібним автомобілем прийнято вважати *Renault Espace* 1984 року. Сьогодні,

хоча їх поступово витісняють позашляховики, такі моделі як *Volkswagen Touran* і *Ford Galaxy* залишаються затребуваними серед покупців.

**Лімузин** (1.9). Лімузин – це подовжений автомобіль, призначений для перевезення кількох людей у максимальному комфорті. Ці автомобілі часто асоціюються з розкішшю, які часто використовуються для урочистих заходів, таких як весілля або великі ділові зустрічі. Лімузини можуть бути додатковими зручностями, такими як шкіряні сидіння, міні-бари, системи мультимедіа і навіть вбудовані телевізори.



Рисунок 1.8 – Автомобіль з типом кузова «мінівен»



Рисунок 1.9 – Автомобіль з типом кузова «лімузин»

**Пікап** (рис. 1.10). Пікап – це автомобіль з відкритим вантажним відсіком за кабіною, призначений для транспортування вантажів. Пікапи поєднують зручність для перевезення речей з можливістю комфортного пересування на дорогах. Вони популярні серед тих, хто часто стикається з необхідністю перевозити великі чи важкі предмети, а також серед любителів активного відпочинку та позашляхових пригод.

Пікапи не завжди були асоційовані із вантажоперевезеннями. Спочатку пікапи з'явилися як легкі автомобілі з відкритим кузовом для перевезення людей, і лише у 1920-х роках почали активно використовуватись для перевезення вантажів.

**Хетчбек** (рис. 1.11). Хетчбек, мабуть, найпопулярніший і відомий тип кузова після седанів та кросоверів. Його відмінна риса – задні двері, поєднані з вікном, які відкриваються разом на петлях, закріплених на даху. Класичні

представники – *Ford Focus*, *Volkswagen Golf* та *Mercedes A-Class*. Також сюди входять і компактніші моделі, наприклад, суперміні *Ford Fiesta* або міські автомобілі на зразок *Volkswagen Up*.



Рисунок 1.10 – Автомобіль з типом кузова «пикап»



Рисунок 1.11 – Автомобіль з типом кузова «хетчбек»

**Універсал** (рис. 1.12). Універсали, як правило, створюються на базі седанів або хетчбеків, відрізняючись подовженим кузовом. Їхня візитна картка – місткий багажник прямокутної форми з вертикальним або майже вертикальним заднім вікном. Класичні приклади – *Volvo V90* та *Audi A6 Avant*. Головна перевага універсалів – збільшений багажний простір порівняно з аналогічними седанами. Мінусів у таких автомобілів небагато, лише деякі моделі в кузові седан можуть виглядати естетичніше.

**Ліфтбек** (рис. 1.13). Ліфтбек – це тип кузова, який поєднує в собі особливості седана та хетчбека. У таких автомобілів багажник відкривається через велику кришку, як у хетчбека, але в іншому вони зберігають форму седана. Ліфтбеки забезпечують зручніший доступ до багажника в порівнянні з традиційними седанами і пропонують велику вантажопідйомність, але при цьому зберігають елегантний і вишуканий зовнішній вигляд.

**Купе** (рис. 1.14). Купе – це дводверні автомобілі, які жертвують практичністю заради дизайну та спортивного духу. Їх відрізняють похила лінія даху і відсутність задніх дверей. Зазвичай купе є сусідами з седанами в модельних лінійках виробників. Наприклад, *Mercedes C-Class Coupe* та *E-Class Coupe* пропонуються поряд з їхніми седанами та універсалами.



Рисунок 1.12 – Автомобіль з типом кузова «універсал»



Рисунок 1.13 – Автомобіль з типом кузова «ліфтбек»



Рисунок 1.14 – Автомобіль з типом кузова «купе»



Рисунок 1.15 – Автомобіль з типом кузова «кабріолет»

**Кабріолет** (1.15). Найчастіше кабріолети створюються на основі купе, у яких дах замінюють на доладний, відкриваючи можливість насолоджуватися поїздками просто неба. У цій категорії виділяються такі моделі, як *Audi A5 Cabriolet* та *BMW 4 Series Convertible*. Втім, іноді кабріолети створюються на базі кросоверів. Мабуть, найвідоміша модель – *Volkswagen T-Roc Cabriolet*.

**Родстер** (рис. 1.16). Родстер – це двомісний спортивний автомобіль з відкритим верхом. Це тип кузова, в якому акцент зроблений на динаміку водіння та стиль. Родстери часто мають компактні розміри, низьку посадку та характерну агресивну зовнішність. Вони ідеально підходять для тих, хто любить відчуття свободи на дорозі та цінує активні, динамічні подорожі.

**Тарга** (рис. 1.17). Тарга – це різновид автомобіля з відкидним критим верхом, але на відміну від повного родстера, у тарги задня частина кузова залишається закритою. Тарга поєднує у собі переваги відкритого автомобіля, дозволяючи водієві та пасажиром насолоджуватися свіжим повітрям, при

цьому пропонуючи великий захист від зовнішніх факторів. Ця форма кузова була популярна в 1960-70-х роках, і досі вона асоціюється з класичними спортивними автомобілями, такими як *Porsche 911 Targa*.



Рисунок 1.16 – Автомобіль з типом кузова «родстер»

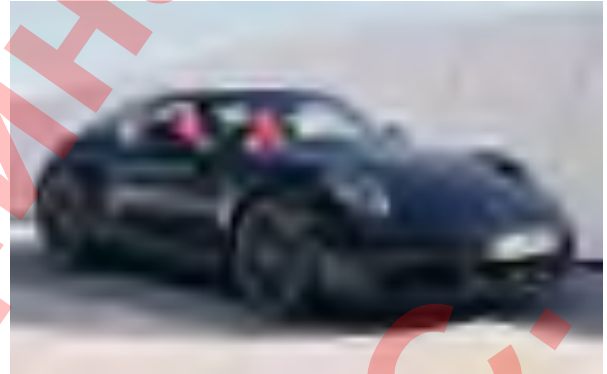


Рисунок 1.17 – Автомобіль з типом кузова «тарга»

**Спідстер** (рис. 1.18). Спідстер – це легкий спортивний автомобіль з відкритим кузовом, призначений для швидких поїздок та активного водіння. Зазвичай спідстери мають мінімалістичний дизайн та оснащені потужними двигунами. Такі машини часто асоціюються з класичною автомобільною епохою та популярні серед колекціонерів та любителів швидкості.

**Хотрод** (рис. 1.19). Хотрод – це кастомізований автомобіль, зазвичай побудований на базі класичних моделей 1920-1940-х років, з покращеними характеристиками для підвищення потужності та швидкості. Хотроди часто мають агресивний та яскраво виражений зовнішній вигляд, з видимими змінами у кузові, підвісці та двигуні. Ці автомобілі в першу чергу призначені для вуличних перегонів, а також популярні серед любителів тюнінгу та культури автоспорту.

**Фургон** (рис. 1.20). Фургон – це транспортний засіб, призначений для перевезення вантажів, із закритим кузовом, часто з бічними дверима, які дозволяють легко завантажувати та вивантажувати товари. Фургони бувають різних розмірів, від компактних моделей для доставки до великих комерційних

фургонів. Вони відрізняються високою місткістю та часто використовуються у бізнесі для перевезення товарів, обладнання чи матеріалів. Приклади таких автомобілів – *Ford Transit*, *Mercedes-Benz Sprinter*, *Renault Kangoo*.



Рисунок 1.18 –  
Автомобіль з типом  
кузова «спідстер»



Рисунок 1.19 –  
Автомобіль з типом  
кузова «хотрод»



Рисунок 1.20 –  
Автомобіль з типом  
кузова «фургон»

**Кузови поза класифікацією.** Кузови поза класифікацією – це автомобілі, які складно віднести до однієї із стандартних категорій, таких як седан, позашляховик або купе, через унікальні конструктивні особливості або рідкість моделей. Ці автомобілі часто пропонують нестандартні рішення та є рідкісними на ринку. Вони можуть бути результатом експериментальних розробок автовиробників або бути модифікаціями, створеними для особливих цілей. Приклади таких кузовів включають автомобілі з кузовами, які поєднують риси декількох типів (наприклад, спортивні фургони або позашляховики з кузовом купе) або автомобілі, створені на замовлення, такі як спеціалізовані лімузини або ретро-моделі. Технічні особливості цих кузовів можуть включати незвичайні форми, нестандартні конструкції даху або унікальні комбінації елементів, що робить їх привабливими для колекціонерів та автолюбителів, які шукають щось особливе [17, 21, 25, 26].

### **1.3. Сучасні підходи до проектування кузовів автомобілів з точки зору аеродинаміки**

Сучасні підходи до проектування автомобільного кузова характеризуються комплексним використанням комп'ютерного моделювання, чисельних методів та випробувань в аеродинамічних трубах.

На рис. 1.21 показано блок-схему такого проектування автомобільного кузова.



Рисунок 1.21 – Блок-схема проектування автомобільного кузова

При цьому підвищуються вимоги до рівня інформативності дизайнера в галузі впливу форми кузова та окремих його елементів на аеродинаміку автомобіля, оскільки володіючи такою інформацією він зможе підвищити ефективність художнього конструювання, осмислюючи введені зміни у форму в естетичному плані, а й з погляду покращення обтічності. Для вирішення цього питання потрібна розробка відповідних комп'ютерних програм та

створення банку даних, що встановлюють взаємозв'язок аеродинамічних характеристик автомобіля з основними конструктивними параметрами кузова, включаючи його вертикальне та кутове розташування щодо поверхні дороги. Важливо знати тенденції розвитку автомобільної аеродинаміки, мати відомості про перспективні обтічні автомобілі, а також науково-обґрунтований прогноз рівня аеродинамічних показників. Це можливо шляхом підбору, системного аналізу та подальшого узагальнення літературних матеріалів з доповненням даних, що відсутні, результатами своїх оригінальних досліджень, що ведуться за програмою аеродинамічного проектування автомобіля. Підвищення вимог, що висуваються до техніко-економічних та споживчих якостей сучасного автомобіля, вимагають нових підходів та розширення кола завдань, які вирішуються при проектуванні його кузова.

Художнє конструювання кузова є початковим та найбільш відповідальним етапом розробки нового автомобіля. Ступінь опрацювання параметрів кузова на цьому етапі значною мірою визначає такі найважливіші показники майбутнього автомобіля, як комфортність, економіка палива, динаміка, безпека.

Однак на практиці художнє конструювання часто зводиться до визначення художньо-конструкторської концепції створюваного автомобіля, при цьому форма кузова опрацьовується виключно на основі естетичних вимог. Водночас відомо, що форма, розміри та геометричні параметри кузова, а також його розташування щодо поверхні дороги вирішальним чином впливає на аеродинамічні та ергономічні характеристики автомобіля, які у свою чергу істотно впливають на зазначені вище показники.

Тому проведення аеродинамічних та ергономічних досліджень повинно починатися і вестися паралельно з художнім конструюванням автомобіля з ранньої його стадії. Це пов'язано з тим, що наступні етапи художнього конструювання: виготовлення натурного пластилінового макета, його змірювання, підготовка плазових креслень і т.д. практично виключають

можливість «впливу» будь-яких значних довідкових робіт з аеродинаміки та ергономіки створюваного автомобіля. В результаті найчастіше наші спроектовані за старою схемою автомобілі не забезпечують виконання закладених у їх технічному завданні норм щодо витрат палива, динаміки, оглядовості, керованості, стійкості.

Автомобіль – це промисловий виріб, призначений для безпосереднього використання людиною, тому в його формі має бути максимально та одночасно враховані: особливості середовища руху автомобіля та фізична взаємодія його з середовищем; функціональне призначення автомобіля; особливості взаємодії людини з машиною. Отже, основними напрямками проектування автомобіля мають бути

- три нерозривно пов'язані і взаємопроникні гілки, відповідні трьом переліченим позиціям:
- аеродинамічне проектування автомобіля;
- художнє конструювання автомобіля;
- ергономічне проектування автомобіля.

У зв'язку з викладеним процес формоутворення кузова нового автомобіля повинен одночасно вестись за трьома напрямками: дизайн, аеродинаміка та ергономіка.

### **1.3. Вплив форми та параметрів кузова на аеродинамічні характеристики пасажирських автомобілів**

Аеродинамічні випробування в аеродинамічній трубі включають параметричні випробування великомасштабної моделі для отримання експериментальних даних, що встановлюють вплив представлених на рис. 1.22 параметрів кузова на аеродинамічні характеристики автомобіля.

Отримані за результатами таких параметричних досліджень дані щодо коефіцієнта  $C_x$  були перераховані на збільшення  $\Delta C_x$  і за ними були побудовані графічні залежності, що пов'язують  $\Delta C_x$  із зміною кожного з аналізованих

геометричних параметрів кузова. Також отримано розрахункові формули, що встановлюють взаємозв'язок збільшення коефіцієнта аеродинамічного опору автомобіля з основними параметрами кузова, що впливають на його обтічність. Ці розрахункові залежності дозволяють дизайнеру вести комп'ютерну оптимізацію форми кузова, знаючи якою мірою зміниться коефіцієнт  $C_x$  моделі автомобіля при внесенні змін до тих чи інших параметрів кузова. Результати вже проведених параметричних випробувань великомасштабної моделі автомобіля дозволяють виконувати аналіз впливу форми та параметрів кузова на аеродинаміку автомобіля.

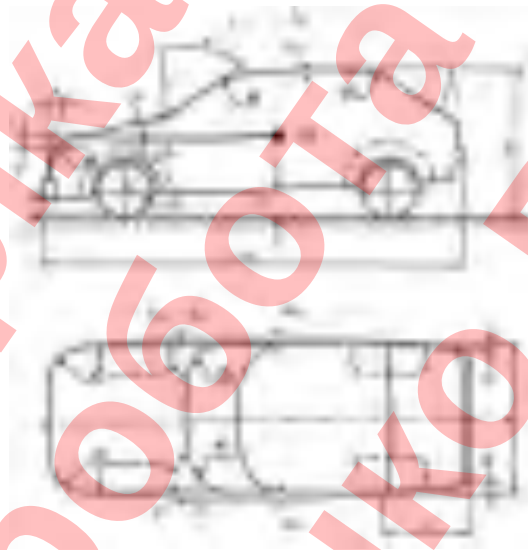


Рисунок 1.22 – Основні конструктивні та настановні параметри кузова, що впливають на обтічність автомобіля:  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\gamma$  – кути нахилу облицювання радіатора, кришки капота, вітрового та заднього скла;  $R^\Phi_K$ ,  $R^\Phi_{KP}$ ,  $R^\Phi_{K3}$ ,  $R^3_{KP}$  – радіуси закруглення фронтальних кромek капота, даху, кузова та її задньої кромки;  $\alpha$ ,  $h$  – кут тангажу кузова та відстань від його днища до дороги;  $b_3$ ,  $l_3$  – величина завуження кузова та його довжина;  $L_a$ ,  $B_a$ ,  $H_a$  – довжина, ширина та висота автомобіля;  $h_{пб}$  – висота від переднього буфера до дороги;  $b_{кр}$ ,  $b_{бс}$  – опуклість даху та бічних стінок кузова;  $l_{кр}$  – довжина даху;  $R_H$ ,  $R_K$ ,  $b_H$ ,  $b_K$  – радіус та ширина колісної ніші та колеса

Тип і форма кузова мають вирішальний вплив на аеродинамічні властивості автомобіля. Серед сучасних легкових автомобілів найбільш поширені триоб'ємні кузови типу «седан» та двооб'ємні типу «універсал» та «хетчбек». Спостерігається тенденція до застосування кузовів монооб'ємної форми або наближення до неї. Це пояснюється компоновальними міркуваннями, а також помітним покращенням обтічності автомобіля, обладнаного монооб'ємним кузовом. Можливе зниження аеродинамічного опору автомобіля з монооб'ємним кузовом за рахунок наявності суцільної лобової панелі (без зламу між кришкою капота та лобовим склом) становить 5-6 %.

**Вплив форми носової частини кузова.** Носова частина кузова формує характер обтікання автомобіля в цілому та спільно з кормовою частиною визначає величину основної складової його аеродинамічного опору – профільного опору форми.

До параметрів, що визначають ступінь впливу форми носової частини на характер обтікання та аеродинамічний опір автомобіля, слід віднести: форму та виконання переднього бампера та колісного «фартуха» під ним, кут нахилу облицювання радіатора, радіуси закруглення фронтальних кромek капота та кузова, кути нахилу лобового скла.

Для забезпечення безвідривного обтікання при переході з лобової панелі облицювання радіатора на кришку та бічні стінки капота необхідно оптимізувати кут нахилу радіатора та радіуси закруглення фронтальних кромek капота та кузова.

Дослідженнями встановлено, що оптимальні кути нахилу облицювання радіатора складають:  $8^{\circ} \leq \delta \leq 12^{\circ}$ . Однак остаточний вибір оптимальних значень кута нахилу облицювання радіатора та радіусів закруглень фронтальних кромek капота та кузова повинен проводитись за результатами аеродинамічних випробувань з урахуванням дизайну та стилю проектного автомобіля.

**Вплив кутів нахилу кришки капота та лобового скла.** У поєднанні з формою носової частини кут нахилу даху капота та лобового скла значною мірою визначають характер обтікання передньої частини автомобіля, а отже, і величину його аеродинамічного опору.

Для забезпечення найменшого аеродинамічного опору лобової частини автомобіля необхідно виконання умови безвідривного обтікання по всьому контуру його носової частини: облицювання радіатора, кришці капота, лобового скла, включаючи зону переходу в дах. У граничному випадку це досягається наявністю суцільної (без зламів) кришки капота, що утворює, і лобового скла та збільшенням наповненості цієї поверхні у поєднанні з оптимізованими радіусами переходу в кришку капота та бічні поверхні панелі облицювання радіатора та кута її нахилу. Можливе зниження аеродинамічного опору автомобіля на 5-6% за рахунок наявності суцільної лобової панелі (без зламу між кришкою капота та лобовим склом).

**Вплив форми даху.** Форма даху в поєднанні з радіусом переходу в неї лобового скла та кутом його нахилу впливає на характер та величину відривних течій і нормальних тисків, що діють на дах. При відпрацюванні форми даху автомобіля дуже важливо правильно вибрати відносне положення максимуму висоти даху по довжині кузова та висоту задньої кромки даху. Оптимізація положення максимуму висоти даху її довжині забезпечує зниження коефіцієнта  $C_x$  на 12-15%. Це пояснюється тим, що, на відміну від плоскої, при русі повітряного потоку по опуклому наповненому даху з оптимізованим розташуванням максимуму її висоти по довжині у поєднанні з правильно обраним кутом нахилу лобового скла та радіусів його переходу в дах створюються передумови для безвідривного обтікання цієї зони кузова автомобіля.

**Вплив форми кузова у плані.** Як відомо, найменший аеродинамічний опір має тіло краплеподібної форми. Однак реально наблизитися до такої форми вдається тільки на спортивно-гоночних автомобілях. Щодо масових автомобілів такі можливості обмежені, тому з метою наближення форми

кузова в плані до безвідривного обтікання використовують наступні конструктивні заходи: збільшених радіусів закруглення у місцях переходу лобових панелей кузова в бічні; збільшення наповненості бічних панелей у плані; зауження кормової частини кузова та ін. Як показують дослідження, при малих величинах відносного радіусу заокруглення передніх крайок моделі ( $R/B < 0,02$ ) мають місце яскраво виражені відривні течії. Принаймні наближення величини  $R/B > 0,06$  подальше збільшення радіуса практично не знижує величину коефіцієнта  $C_x$  моделі автомобіля. Наповненість кузова в плані та зауження його задньої частини сприяють максимальному зменшенню втрат енергії у сліді за автомобілем. Зауження задньої частини кузова в плані істотно впливає на зменшення коефіцієнта  $C_x$  тільки до величини його відношення до ширини автомобіля, що дорівнює 0,04. Подальше зауження кормової частини кузова у плані мало впливає на зниження коефіцієнта  $C_x$ .

**Вплив довжини автомобіля.** Як відомо, відносне подовження  $\lambda = L/B$ , де  $L$  і  $B$  – довжина та ширина автомобіля, є однією з основних аеродинамічних характеристик тіла, що визначають величину його аеродинамічного опору. Відповідними дослідженнями, виконаними стосовно обтічних тіл типу дирижабля, встановлено, що для безвідривного обтікання тіла величина відносного подовження повинна бути:  $\lambda \sim 3$ . У добре обтічних автомобілів основними складовими аеродинамічного опору є профільний опір та опір тертя. Профільний опір в основному залежить від форми носової та кормової частин автомобіля. Опір тертя – від площі поверхні центральної частини кузова. При цьому величина коефіцієнта тертя значною мірою визначається формою носової частини автомобіля, що формує структуру потоку на бічних стінках і даху кузова. Тому від того, яким буде обтікання носової та кормової частин автомобіля залежить і його профільний опір та опір тертя. Якщо автомобіль має недостатнє відносне подовження, тобто якщо він короткий, то враховуючи задану, цілком певну довжину салону, конструктивні можливості для створення гарного обтікання за рахунок оптимізації передка та задка

обмежені. Тобто при малому подовженні не забезпечується плавне обтікання автомобіля, виникають відривні течії на носовій та кормовій частинах, сильно позначається вплив сліду, що стікає кінцеві енергоємні вихори істотно збільшують аеродинамічний опір. Збільшення довжини автомобіля за рахунок подовження носової та Хвостовий елементів при постійної довжині салону дає можливість їх конструктивної доопрацювання у напрямку безвідривного обтікання. При конструюванні автомобілів можна орієнтовно приймати, що подовження на 0,2 м знижує аеродинамічний опір приблизно 0,01.

**Вплив дорожнього просвіту та тангажу кузова.** Формування структури потоку та його швидкість під автомобілем залежить від величини дорожнього просвіту та кута тангажу щодо поверхні дороги. У міру зменшення дорожнього просвіту знижується витрата повітря під автомобілем, а, отже, аеродинамічні втрати. Однак, при занадто малому дорожньому просвіті через збільшення гідравлічного опору каналу, яким можна імітувати підднищну зону, швидкість потоку в підднищовій зоні зменшується і за рахунок цього відбувається перерозподіл його поля швидкостей навколо автомобіля та збільшення тиску на днище, а, отже, і аеродинамічного опору. Оптимальним для легкових автомобілів є відношення  $0,10 < h/H < 0,12$  де  $h$  і  $H$  – величина дорожнього просвіту та висота автомобіля

Установка кузова під негативним кутом тангажу змінює характер течії потоку в підднищовій зоні, наближаючи до параметрів потоку при перебігу в односторонніх дифузорних каналах. При позитивних кутах тангажу кузова має місце перебіг потоку в підднищовій зоні аналогічний течії в односторонньому конфузори з відповідними параметрами потоку. Аналіз результатів проведених нами експериментальних досліджень показує, що негативний кут тангажу зменшує аеродинамічний опір автомобіля на 3-4% при кут  $\alpha = -1^\circ$ . Слід звернути увагу, що введення занадто великого кута негативного тангажу (більше  $-3^\circ$ ) призводить до збільшення лобової площі автомобіля через підйому кормової частини кузова та збільшення його аеродинамічного опору.

Вплив форми кормової частини кузова. Характер обтікання кормової частини кузова залежить від її форми, у тому числі у плані. Характерним при це відрив стікаючих з боковин і даху кузова повітряних потоків від його кормової частини. Потіки, що відірвалися, здійснюють циркулюючі рухи, а їх осі розташовуються перпендикулярно до натікаючого незбуреного повітряного потоку і паралельно до лінії відриву. При цьому, в залежності від форми кормової частини, рух вихрових, що відірвалися потоків може бути двовимірним або тривимірним.

При куті нахилу задньої панелі  $<20^\circ$  спостерігається двовимірна вихрова структура супутнього сліду. При цьому важливо відзначити, що зрив потоку з поверхні кузова відбувається у нижній частині його задньої стінки. Це забезпечує найменші аеродинамічні втрати, оскільки зменшує площу поперечного перерізу та довжину супутнього сліду за автомобілем. Важливим є закруглення задньої кромки кришки в місці її переходу в задню стінку кузова. Якщо поєднання даху з похилою задній панеллю кузова виконано у вигляді гострої кромки, то лінія відриву потоку розташовується вище рознімання задніх дверей, але при цьому не супроводжується помітною зміною коефіцієнта  $C_x$ . При сильному заокругленні задньої кромки даху лінія відриву потоку зміщується назад і коефіцієнт  $C_x$  зменшується на 9%. Зниження коефіцієнта  $C_x$  можна пояснити збільшенням тиску задній стінці кузова.

На рис. 1.23. показано основні прийоми аеродинамічної оптимізації передньої частини триоб'ємного кузова, які практично однакові із двооб'ємним кузовом.

Прямокутне виконання капота призводить до гальмування повітря, що натікає, і відриву його за гострою фронтальною кромкою і різкого збільшення швидкості, про що свідчить сплеск швидкісної епюри. Основними прийомами аеродинамічної оптимізації передньої частини кузова є: збільшення кутів нахилу панелі облицювання радіатора та кришки капота в поєднанні із заокругленням їх фронтальних кромок. При цьому, як показує епюра швидкості, що обтікає цю зону кузова повітряного потоку, вдається практично

усунути його місцеве прискорення, що спостерігалось раніше, і відривні течії (див. верхню частину рис. 1.23).

Поліпшення обтічності середньої та кормової частини триоб'ємного кузова досягається збільшенням кута нахилу лобового скла, закругленням фронтальної кромки даху у поєднанні з наданням їй опуклої форми (рис. 1.24). Для зменшення зони негативних тисків і супутнього струменя автомобілем збільшують висоту багажника, що забезпечує сходження потоку не з даху кузова, а із задньої кромки багажника.



Рисунок 1.23 – Основні прийоми аеродинамічної оптимізації передньої частини триоб'ємного кузова:  $V_\infty$  – швидкість вільнонатікаючого потоку;  $V_K$  – швидкість потоку, що обтікає поверхню кузова; 0 – точка гальмування потоку



Рисунок 1.24 – Основні прийоми аеродинамічної оптимізації середньої та кормової частини триоб'ємного кузова:  $V_\infty$  – швидкість вільно натікаючого потоку;  $V_K$  – швидкість потоку, що обтікає поверхню кузова; 0 – точка гальмування потоку

Завдяки зазначеним конструктивним заходам суттєво покращується обтікання верхньої частини кузова, про що свідчить характер протікання швидкісної епюри – усунуті або зменшені піки швидкостей, а отже, і місцеві відривні течії.

При розгляді кузова в плані (рис. 1.25) видно, що тут поліпшення обтічності досягається шляхом закруглення фронтальних поверхонь і бічних крайок, а також завуження кормової частини кузова. При цьому значно зменшуються відривні течії по периметру кузова в плані, а також зона негативних тисків та супутній струмінь за автомобілем.

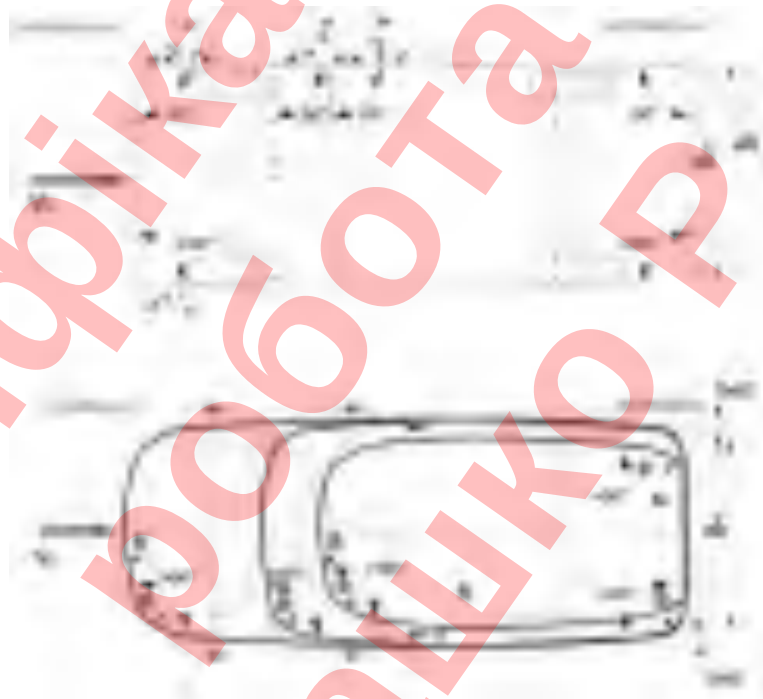


Рисунок 1.25 – Основні прийоми аеродинамічної оптимізації форми кузова в плані:  $H_c$ ,  $B_{cz}$  – ширина супутнього струменя за автомобілем з незавуженою та завуженою кормовою частиною кузова

Помітний вплив на аеродинамічні характеристики автомобіля та насамперед на величину підйомної сили надає конструктивне виконання носової частини кузова (рис. 1.26, 1.27). Під час проектування кузова автомобіля важливо знати, як вплинуть на його аеродинамічні характеристики зміна форми та параметрів кузова (рис. 1.28) [13, 16, 19].



Рисунок 1.26 – Основні прийоми аеродинамічної оптимізації кормової частини двооб'ємного кузова: 1, 2 – задня кромка даху не закруглена та закруглена радіусом  $R$ ;  $H_{сф}$ ,  $H_{св}$  – висота супутнього струменя за автомобілем з кузовами «фастбек» та «сквайбек»

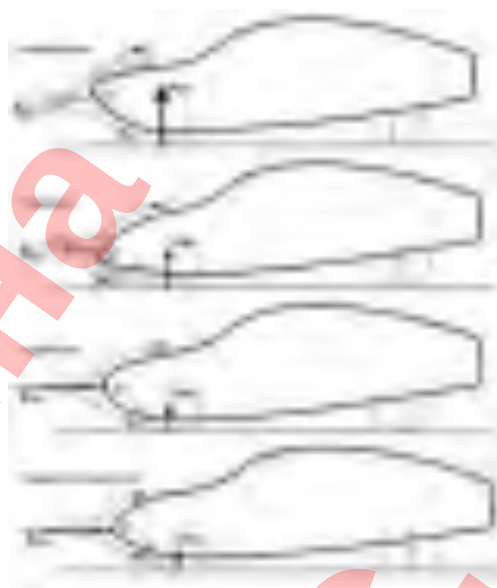


Рисунок 1.27 – Вплив конструктивного виконання носової частини на характер обтікання кузова:  $P_{zn}$  – підйомна сила на передній осі автомобіля



Рисунок 1.28 – Можливості зниження коефіцієнта, легкового автомобіля за рахунок вдосконалення форми кузова

#### 1.4. Особливості обтікання легкового автомобіля з кузовами різного типу

Характер обтікання легкового автомобіля залежить від типу, форми та параметрів кузова, а також кута натікання та швидкості повітряного потоку.

На малюнку 6.1 показана отримана за результатами фізичних досліджень схема обтікання легкового автомобіля з триоб'ємним кузовом "седан". Видно, що поле потоку навколо автомобіля має складний характер. Спостерігаються зони підвищеного та зниженого тиску, яскраво виражені відривні течії через мало закруглені фронтальні краї кузова. Якщо при цьому відбувається повторне прилягання потоку, то утворюються, звані, зворотні (циркулюючі) повітряні потоки. Такі вихрові течії виникають у наступних зонах: за фронтальними та бічними кромками капота - на його даху та передніх крилах, у місці перетину капота та вітрового скла, на передньому спойлері, у зоні зламу ступінчастої частини задка кузова типу «седан» з довгим багажником.

Складним є характер обтікання поддніщцевої зони автомобіля. Наявність на днищі виступаючих конструктивних елементів ходової частини і трансмісії призводить до гальмування повітряного потоку, що протікає під автомобілем, і великим гідравлічним втратам. Крім того, через утворення на плоских ділянках днища прикордонного шару, що потовщується до кормової частини кузова, виникає додаткове гальмування повітряного потоку під автомобілем. Вплив цих факторів призводить до підвищення тиску на днище кузова і виникненню підйомної сили, що діє на автомобіль. Водночас через наявність на даху кузова розрідження, утворюються поперечні кільцеві вихори (рис. 1.29). в яких відбувається перетікання повітряних потоків від днища до даху, що призводить до забруднення автомобіля та збільшення діючої на нього підйомної сили.

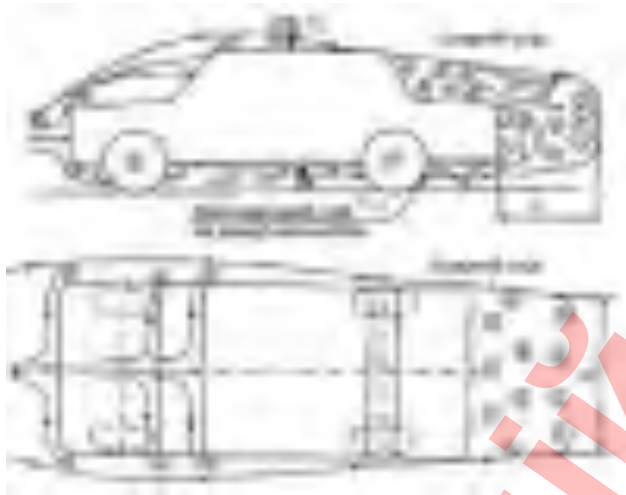


Рис. 1.29 – Схема обтікання легкового автомобіля з кузовом «седан»



Рис. 1.30 – Схема утворення поперечних кільцевих вихорів (ПКВ) через різницю тисків па днищі та даху кузова автомобіля.

За автомобілем утворюється довгий супутній слід, що є зоною сильно завихреного повітряного потоку. зірвався з бічних стінок та даху кузова. При цьому на задній стінці утворюється досить велике розрідження.

На особливу увагу заслуговує вивчення характеру обтікання кормової частини автомобіля, який залежить від типу кузова. На рис. 1.31 показано схеми обтікання та епюри тисків для кузовів типу «седан», «хетчбек» та «універсал», отримані за результатами дренажних випробувань. На задніх стінках кузовів спостерігається розрідження, оскільки через сходження повітряного потоку із задніх кромek дахів та бічних задніх кромek, за ними виникає розрідження та відбувається перетікання повітряного потоку від центру задньої стінки до її периферії. Через це на задніх стінках даних кузовів створюється негативний тиск. При цьому в міру збільшення розрідження на задній стінці кузова розташовується в наступній послідовності: «седан», «хетчбек» та «універсал». Величина розрідження на задній стінці кузова «хетчбек» залежить від кута її нахилу, який у свою чергу визначає лінію відриву повітряного потоку кормової частини кузова.

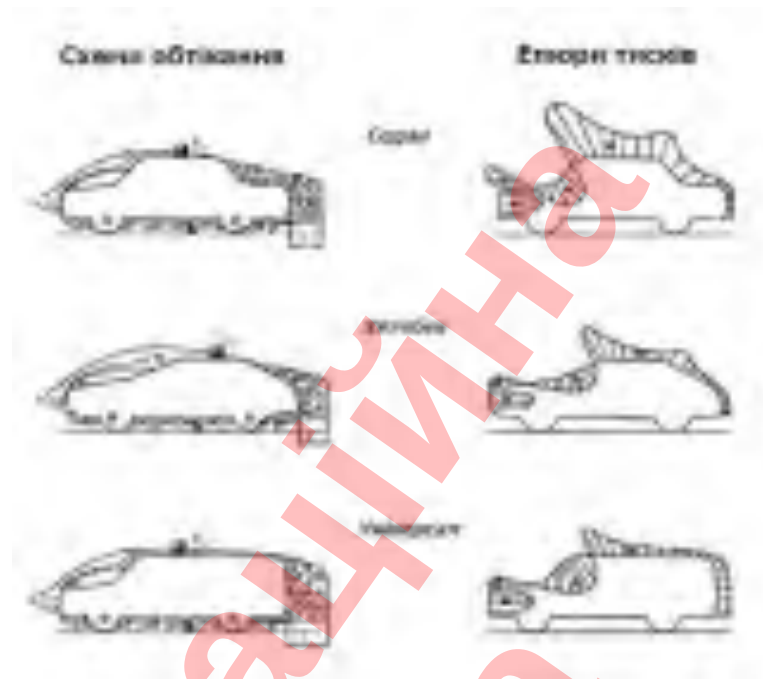


Рисунок 1.31 – Особливості обтікання легкового автомобіля з кузовами різного типу

Повітряні потоки, що відірвалися від даху і бічних стінок кузова, здійснюють циркулюючі рухи, а їх осі розташовуються перпендикулярно до незбуреного потоку, що натікає, і паралельно лінії відриву (рис. 1.32). При цьому, залежно від форми кормової частини, рух вихрових потоків, що відірвалися, може бути двомірним або тривимірним.

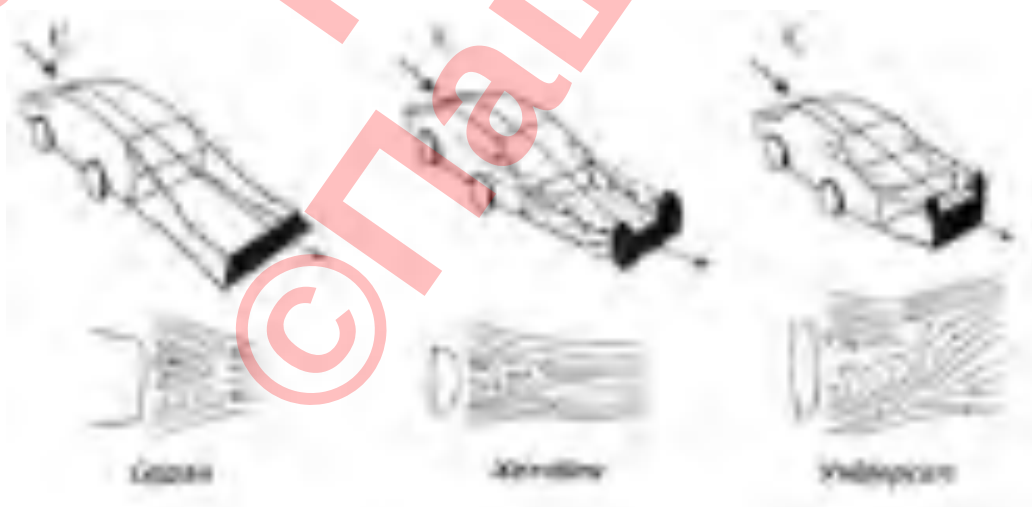


Рисунок 1.32 – Схема утворення двох поздовжніх вихорів, що обертаються всередину, на задніх бічних кромках кузова

На рис. 1.32 показано рух вихорів, що обертаються поперечно до повітряного потоку, що натікає всередині двомірного супутнього сліду, для автомобілів з типом кузова: «седан», «хетчбек» і «універсал». Видно, що для кожної з трьох форм кормової частини автомобіля спостерігається по два вихори, що обертаються назустріч один одному. Нижній вихор обертається проти годинникової стрілки, він переносить частки грязеводної суспензії на задню стінку кузова автомобіля. Верхній вихор обертається у протилежний бік – за годинниковою стрілкою. Після відриву повітряного потоку від поверхні кузова у вихровому сліді утворюються два протилежно обертаються поздовжніх вихори, які при кузові «універсал» індукують висхідний потік, а при кузовах «седан» і «хетчбек» – низхідний потік у вихровому сліді за автомобілем.

Такий двовимірний вихровий рух прийнято називати зоною «спокійної води», тобто. за автомобілем утворюється турбулентний слід, що складається з таких вихорів. Порівняння зі «спокійною водою» цілком доречно, оскільки. рух її також характеризується наявністю двох векторів швидкості – вздовж та поперек водойми. Рух «неспокійної води» характеризується наявністю хвиль на поверхні, а значить і третьої вертикальної складової вектора швидкості. При формі кузова «універсал» пара вихорів піднімається у напрямку потоку і переміщається до площини симетрії. У кузовів седан і хетчбек вихори вздовж потоку опускаються до дороги і переміщаються назовні. Ці поздовжні вихори є продовженням описаних вище поперечних вихорів. При розгляді вихорів привертає увагу зменшення швидкості з наближенням до центру вихору. Через розсіювання енергії поздовжні вихори у напрямі поширення потоку поступово згасають. Другий тип відриву повітряного потоку має тривимірний характер, при цьому вихрові трубки утворюються на похило обтічних гострих кромках, так само, як на трикутному крилі літака. Така пара вихорів утворюється на правій та лівій стійках вітрового скла. У районі верхнього кінця стійок, зазначена пара вихорів згинається у напрямку до даху; їх подальша взаємодія з потоком у районі задньої частини автомобіля ще не вивчена. Яскраво

виражена пара вихрових трубок утворюється за автомобілем при певному куті нахилу задньої стінки кузова. Ці вихори взаємодіють із зовнішнім потоком та з двовимірним вихровим слідом. Вони значною мірою аналогічні кромочним вихорам крила кінцевого розмаху. Зазначені вихрові трубки в просторі між осями індукують поле низхідного потоку, що обтікає кузов.

На рис. 1.32 наведено результати дослідження впливу форми кормової частини двооб'ємного кузова «хетчбек» на обтічність автомобіля. Видно, що структура вихрового сліду за автомобілем залежить від кута нахилу задньої панелі кузова. При куті нахилу задньої панелі  $< 25^\circ$  спостерігається двовимірний вихрова структура супутнього сліду. При цьому важливо відзначити, що зрив потоку з поверхні кузова відбувається в нижній частині задньої його стінки. Це забезпечує найменші аеродинамічні втрати, оскільки значно зменшує площу поперечного перерізу та довжину супутнього сліду за автомобілем. Важливим є закруглення задньої кромки даху в місці її переходу в задню стінку кузова. При куті нахилу задньої панелі  $> 5^\circ$  структура супутнього сліду вихрова двовимірний і тривимірний. У цьому випадку зрив потоку відбувається з задньої кромки даху, а сам супутній слід має досить велику довжину і площу поперечного перерізу.

Найбільші аеродинамічні втрати спостерігаються при куті нахилу задньої панелі кузова  $25^\circ < \gamma < 35^\circ$ . Тут зрив потоку відбувається з задньої кромки даху кузова, а структура супутнього сліду носить яскраво виражений вихровий характер. Супутній слід має більшу довжину, що істотно перевищує довжину.

Слід зазначити, що кут нахилу задньої панелі кузова  $\gamma = 20^\circ$  є гранично допустимим з погляду реалізації необхідних значень кутів видимості, прийнятних легкових автомобілів серійного виробництва. Тільки для нижчих спортивних купе допустимі менші кути нахилу задньої панелі (до  $\gamma = 15^\circ$ ), що дає, порівняно з круто зрізаною формою задньої частини, зменшення коефіцієнта аеродинамічного опору майже на 15% [13, 16, 19].

## 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Вибір типів кузовів легкових автомобілів для досліджень

Завдання кваліфікаційної роботи передбачало дослідження різних типів кузовів легкового автомобіля для оцінки його аеродинамічних характеристик. Для кращої об'єктивності під час отримання результатів варто обрати сімейство автомобілів одного виробника, виконаного у різних кузовах. Типовим представником такого сімейства можна вважати *Volkswagen*. Основними і найбільш популярними типами кузовів *Volkswagen* є:

- **седан**: чотирьохдверний автомобіль з окремим багажником.
- **хетчбек**: автомобіль із задніми дверима, що відкривається вгору, поєднуючи багажне відділення із салоном (наприклад, *Golf*, *Polo*);
- **універсал**: довгий універсал із задніми дверима, який має великий багажник (наприклад, *Passat Variant*);
- **купе**: дводверний спортивний автомобіль, часто з сидіннями типу «2+2» (дві дорослі та дві дитини) (наприклад, *Karmann-Ghia*);
- **кросовер**: автомобіль, що поєднує риси SUV та легкового автомобіля, що також може мати повний привід (наприклад, *Tiguan*, *Taos*);
- **кабриолет**: відкритий автомобіль зі складним тентом або жорстким дахом, який може складатися (наприклад, *Golf Cabriolet*);
- **позашляховик**: високий автомобіль з повним приводом та підвищеною прохідністю (наприклад, *Touareg*);
- **мінівен**: місткий сімейний автомобіль з трьома рядами сидінь, орієнтований на комфорт та простір (наприклад, *Multivan*);
- **пікап**: вантажний автомобіль із відкритою вантажною платформою (наприклад, *Amarok*).

Для аеродинамічного дослідження у кваліфікаційній роботі обрано шість типів кузовів *Volkswagen*, а саме: седан, хетчбек, універсал, позашляховик, фургон та мінівен. Контури макетів кузовів цих автомобілів зображено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Контури макетів кузовів легкових автомобілів *Volkswagen*

Таким чином, вибір шести типів кузовів легкових автомобілів одного автовиробника дасть змогу провести аеродинамічні дослідження та визначити вплив форми кузова на аеродинамічні властивості легкового автомобіля.

## 2.2. Методика тривимірного моделювання макету кузова легкового автомобіля

В роботі для побудови тривимірних моделей макетів кузовів легкових автомобілів у масштабі 1:1 використано CAD-модуль системи автоматизованого проєктування *SolidWorks*. В процесі тривимірного моделювання використано метод побудови ескізів за фотографічним зображенням кузовів автомобілів. Для цього застосовано видові зображення автомобілів (рис. 2.2) з габаритними розмірами та розмірами основних кузовних елементів транспортних засобів.

Методику побудови тривимірних моделей розглянемо на прикладі кузова «седан».

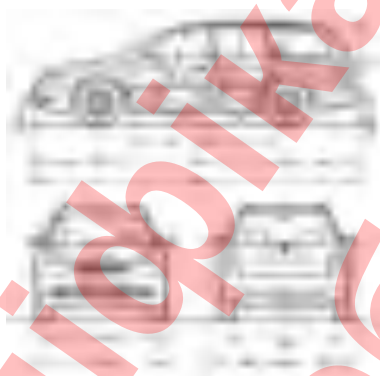
*Седан**Хетчбек**Універсал**Позашляховик**Фургон**Мінівен*

Рисунок 2.2 – Видові зображення кузовів автомобілів

Ескіз для побудови контура виду збоку автомобіля виконуємо у площині «Спереду». Для цього додаємо в ескіз зображення автомобіля збоку, при цьому масштабним вектором встановлюємо розмір контурів зображення таким чином, щоб розмір контура відповідав габаритному розміру автомобіля (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Розташування зображення виду збоку на площину ескізу

На площину зверху таким же способом додаємо зображення виду автомобіля зверху. Зображення виду спереду розташовуємо на площині «Справа», а зображення виду автомобіля ззаду – на додатковій площині, яка побудована паралельно до площини «Справа» на відстані, що дорівнює габаритній довжині автомобіля. У результаті виконаних дій, отримуємо компоновання видових зображень автомобіля на чотирьох площинах (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Компоновання видових зображень автомобіля на площинах робочого середовища CAD-модуля SolidWorks

З використанням операцій тривимірного твердотілого моделювання за побудованими на основі зображень автомобіля контурів, виконано тривимірну твердотілу макетну модель кузова «седан» (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Тривимірна твердотіла макетна модель кузова «седан»

Аналогічно виконано твердотілі макетні моделі й інших кузовів (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Тривимірні твердотілі макетні моделі кузовів легкових автомобілів

Виконані в масштабі 1:1 твердотілі макетні моделі кузовів легкових автомобілів можна використовувати для аеродинамічного дослідження.

### 2.3. Методика проведення аеродинамічного дослідження кузовів легкових автомобілів

Для проведення аеродинамічного дослідження кузовів легкових автомобілів в роботі застосовано модуль *SolidWorks Flow Simulation*. Для інженерного аналізу в модулях, таких як *Flow Simulation* (для гідрогазодинаміки) у *SolidWorks Flow* використовується метод скінченних об'ємів (МСО). Процес включає підготовку геометрії, створення сітки, призначення матеріалів, створення граничних умов та запуск розрахунків. Потім аналізуються результати для отримання даних про робочі характеристики та можливості виробу [9, 10, 27].

Основні етапи роботи з методом скінченних об'ємів у *SolidWorks*.

- **Створення чи підготовка моделі.** Модель має бути твердотільною або, в деяких випадках, являти собою набір поверхонь. Багатотільні деталі можна створити, об'єднавши або розділивши тіла за допомогою відповідних інструментів.
- **Створення розрахункової сітки.** Для цього потрібно перейти до розділу *Flow Simulation* у дереві дослідження, натиснути правою кнопкою миші на «Сітка» та вибрати «Створити сітку». Налаштування щільності сітки виконують, переміщаючи бігунок або за допомогою інших параметрів сітки.
- **Налаштування розрахункового завдання** полягає у виборі задачі дослідження: зовнішня або внутрішня. У нашому випадку, коли середовище обтікає тіла, задача є зовнішньою.
- **Вказання граничних умов** вхідні параметри, необхідні для конкретного аналізу.
- **Запуск розрахунку** за допомогою налаштувань, заданих на попередніх етапах.

- **Аналіз результатів.** За результатами, такими як розподіл тиску, температури, швидкостей, траєкторій руху середовища навколо виробу, можна зробити висновки про робочі характеристики та можливості виробу.

Розглянемо методику аеродинамічного аналізу кузова легкового автомобіля на прикладі «седана».

На першому етапі після запуску налаштувань дослідження встановлюємо тип задачі – зовнішня (рис. 2.7); тип середовища – повітря, а також вказуємо значення граничних умов – температуру і тиск середовища, напрям і значення швидкості руху автомобіля (90 км/год).



Рисунок 2.7 – Діалогові вікна налаштування початкових параметрів дослідження

Після налаштувань параметрів дослідження встановлюємо розміри області дослідження, як показано на рис. 2.8.



Рисунок 2.8 – Налаштування області дослідження

В якості задачі дослідження вказуємо глобальну ціль – значення сили лобового опору, а також ціль, задану виразом для розрахунку значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$ , який розраховується за формулою:

$$C_x = \frac{2F_d}{\rho_n \cdot A \cdot V^2},$$

де  $F_d$  – сила лобового опору, Н;

$\rho_n$  – густина повітря (1,21 кг/м<sup>3</sup>);

$A$  – лобова площа автомобіля, м<sup>2</sup>;

$V$  – швидкість руху автомобіля (25 м/с=90 км/год).

В налаштуваннях сітки встановлюємо повзунок положення «5», щоб забезпечити вищу точність результатів (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Налаштування розміру сітки в аеродинамічному аналізі

Для розрахунку коефіцієнта лобового опору лобову площу автомобіля (мидель) визначаємо шляхом проєціювання контура поперечного перерізу автомобіля на площину «Справа», та за допомогою інструменту визначення площі перерізу визначаємо мидель автомобіля (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Визначення лобової площі моделі автомобіля

Після завершення налаштувань запускаємо дослідження. Результати аеродинамічного аналізу розглянемо в наступному розділі.

В роботі також виконано параметричне аеродинамічне дослідження, яке полягало у визначенні сили лобового опору та значень коефіцієнта лобового опору в залежності від зміни швидкості руху автомобіля. Вхідними змінними параметрами при цьому були значення швидкості в діапазоні 90...140 км/год [9, 10, 27].

### 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Аналіз результатів аеродинамічного дослідження легкових автомобілів

На основі проведених аеродинамічних дослідження легкових автомобілів з різним виконанням кузовів встановлено значення сили лобового опору та коефіцієнта лобового опору для кожного з розглянутих варіантів кузовів. Результати дослідження зведено в таблицю 3.1, а порівняльну діаграму значень  $C_x$  зображено на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати визначення сили лобового опору та коефіцієнта лобового опору легкових автомобілів

| Тип кузова   | Сила лобового опору $F_l$ , Н | Коефіцієнт лобового опору $C_x$ |                                  |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|              |                               | Розрахункове значення           | Значення за паспортом автомобіля |
| Седан        | 228                           | 0,27                            | 0,27                             |
| Хетчбек      | 266                           | 0,32                            | 0,32-0,33                        |
| Універсал    | 252                           | 0,30                            | 0,29-0,30                        |
| Позашляховик | 304                           | 0,31                            | 0,35-0,37                        |
| Фургон       | 343                           | 0,34                            | 0,33                             |
| Мінівен      | 332                           | 0,34                            | 0,31                             |

Результати визначення  $C_x$ , як бачимо з табл. 3.1, у переважній більшості випадків збігаються зі значеннями, вказаними в технічних характеристиках автомобілів, що вказує на доцільність використання САПР *SolidWorks* для такого типу досліджень.



Рисунок 3.1 – Діаграма значень сили лобового опору  $F_d$



Рисунок 3.1 – Діаграма значень коефіцієнта лобового опору  $C_x$  для різних типів кузовів легкових автомобілів

Як видно з результатів аеродинамічного аналізу найкращі аеродинамічні характеристики легкового автомобіля має кузов «седан», оскільки значення коефіцієнта лобового опору в нього найменше, порівняно з рештою кузовів, і становить  $C_x=0,27$ . Найвищі значення  $C_x$  – у кузовів типу «фургон» та «мінівен» –  $C_x=0,34$ . На підставі виконаного дослідження побудовано епюри розподілу швидкостей руху повітря в навколокузовному просторі автомобілів (рис. 3.2).

*SolidWorks Flow Simulation* дає змогу визначити зони підвищеного тиску повітря на кузов автомобіля та зони пониженого тиску (рис. 3.3).

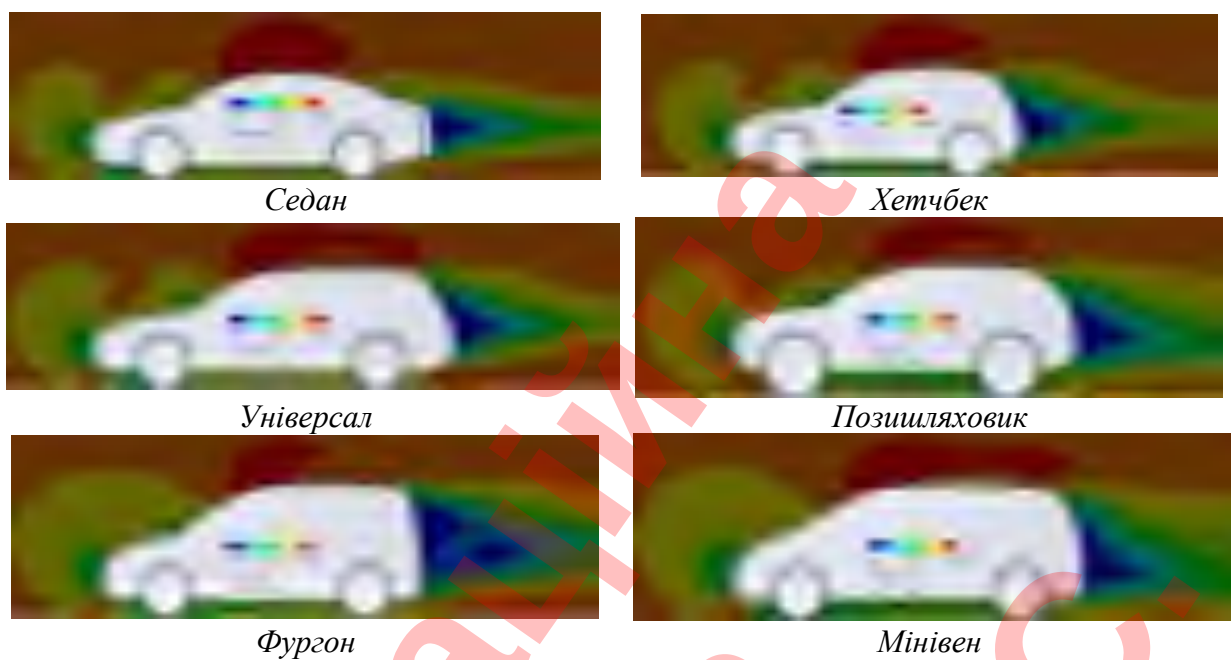


Рисунок 3.2 – Епюри розподілу швидкостей руху повітря

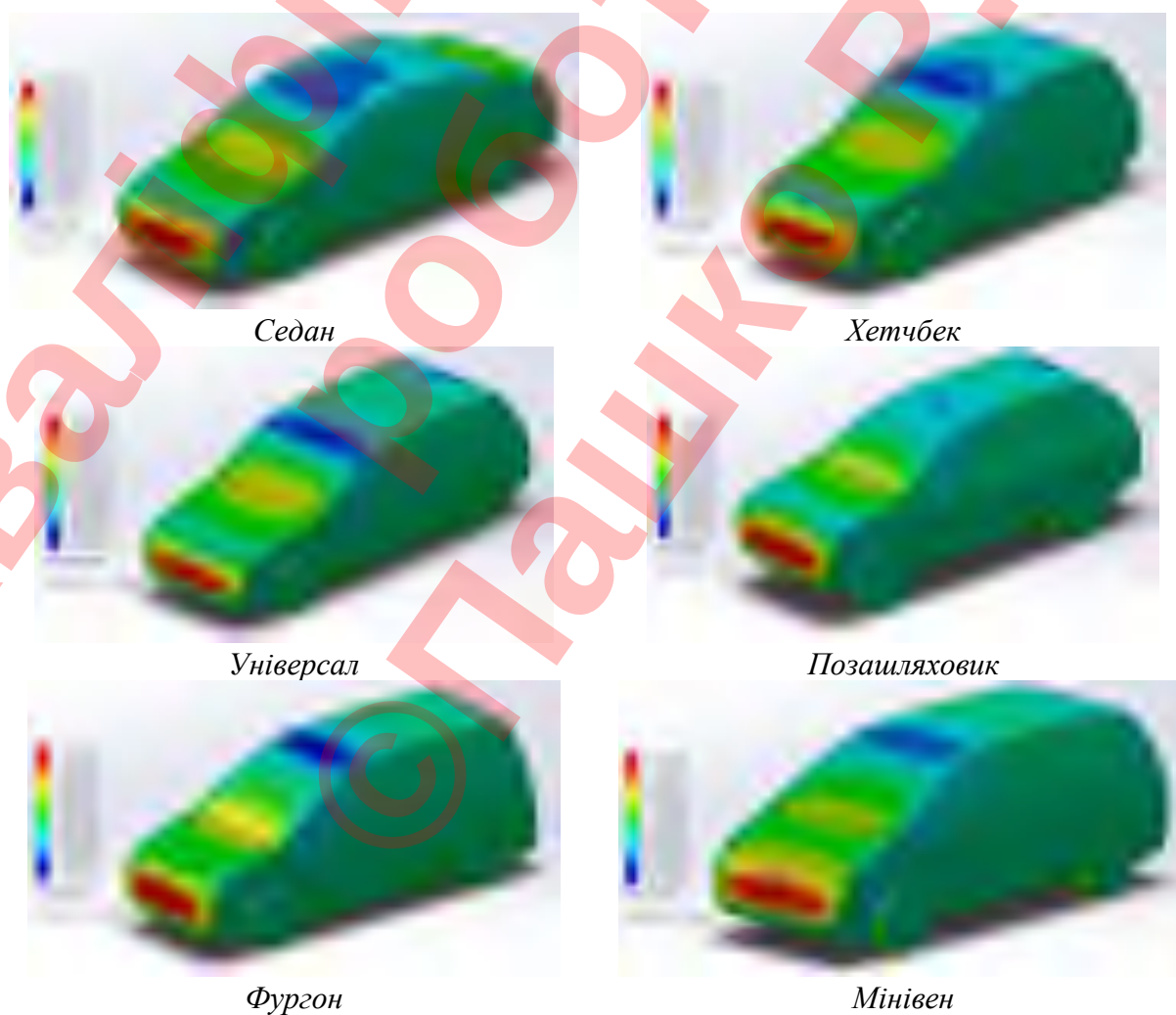


Рисунок 3.3 – Епюри розподілу тиску по кузову легкового автомобіля

В процесі дослідження також побудовано траєкторії руху повітря в навколокузовному просторі автомобіля (рис. 3.4), що дає змогу виявити завихрення, а відтак – і появу зон турбулентності потоку повітря в процесі обтікання ним кузова автомобіля.

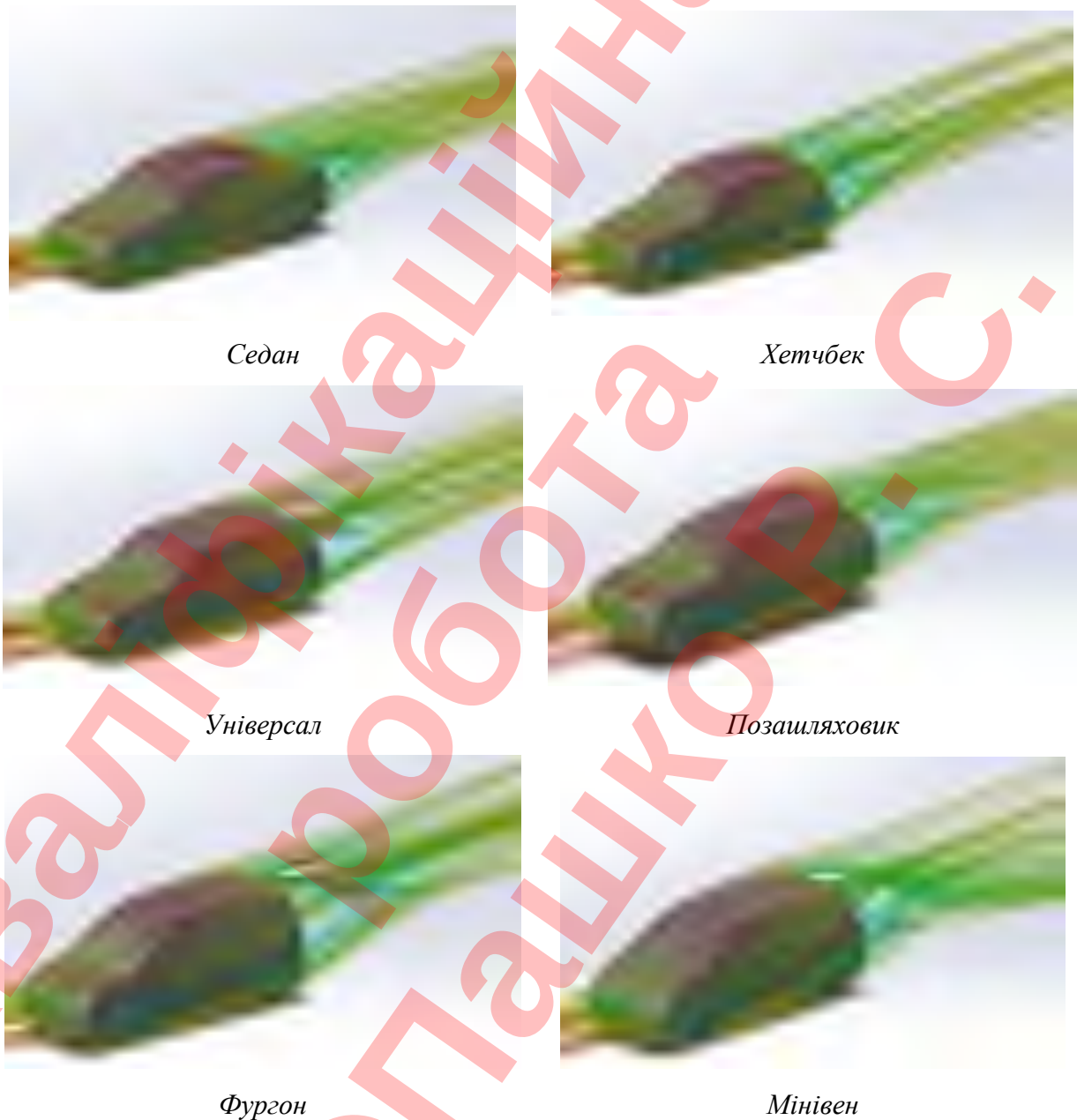


Рисунок 3.4 – Траєкторії руху повітря в навколокузовному просторі

Таким чином, співставивши вищенаведені результати, аеродинамічні властивості кузова автомобіля можна оцінити не лише кількісним показником, зокрема значенням  $C_x$ , але й візуально – за епіюрами розподілу швидкостей, тиску і траєкторіями руху повітря.

Як видно з рис. 3.4, найменше завихрень позаду автомобіля утворюється в седана та універсалу, що позитивно впливає на загальну аеродинаміку кузова. Натомість зони турбулентності позаду хетчбека, позашляховика, фургона та мінівена погіршують аеродинамічні характеристики таких кузовів. Монооб'ємний тип кузова мінівена теоретично мав би мати хороші аеродинамічні показники, однак висота кузова в поєднанні з доволі різким переходом у майже вертикальну площину задньої частини автомобіля нівелює перевагу монооб'ємного кузова. Кормова частина кузова з більш пологим нахилом могла б покращити аеродинаміку автомобіля.

Седан – кузов трьохоб'ємного типу, має найкращі аеродинамічні показники у порівнянні з іншими розглянутими в роботі кузовами легкових автомобілів.

### 3.2. Аналіз результатів параметричного аеродинамічного дослідження легкових автомобілів за різних швидкостей руху

За результатами проведено параметричного аеродинамічного дослідження встановлено значення сили лобового опору  $F_L$  (рис. 3.5) та коефіцієнта лобового опору  $C_x$  (рис. 3.6) для всіх шести кузовів автомобілів, які розглядаються у кваліфікаційній роботі.

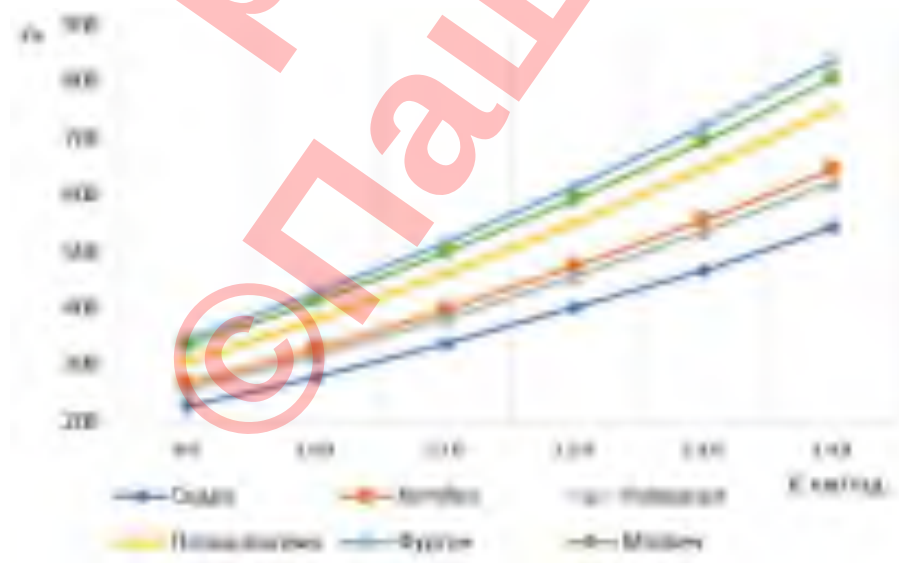


Рисунок 3.5 – Графіки залежності сили лобового опору від швидкості руху легкового автомобіля

Так, для всіх типів кузова зі зростанням швидкості руху автомобіля в заданому діапазоні швидкостей (90...140 км/год.) значення сили лобового опору стрімко зростає (рис. 3.5). Значення коефіцієнта лобового опору на заданому діапазоні швидкостей руху автомобіля практично не змінюється (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Графіки залежності значень коефіцієнта лобового опору  $C_x$  від швидкості руху легкового автомобіля

Таким чином, дослідження аеродинамічних властивостей легкових автомобілів залежно від форми кузова на прикладі лінійки моделей *Volkswagen* показали, що результати комп'ютерного моделювання в середовищі *SolidWorks* є адекватними та відповідають характеристикам, заявленим у технічній характеристиці автомобілів. Отже, застосування САПР *SolidWorks* дозволяє отримати достовірні результати в процесі проведення аеродинамічних досліджень макетів кузовів автомобілів, побудованих на основі фотографічних зображень транспортних засобів.

Результати аеродинамічних досліджень можуть бути використані під час проєктування кузовів транспортних засобів та їх елементів, а врахування результатів таких досліджень дозволять досягнути високих показників аеродинаміки автомобіля ще на етапі його проєктування.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Тема кваліфікаційної роботи передбачає роботу інженера з використанням комп'ютерної техніки та спеціалізованих комп'ютерних програм. Оскільки робота інженера-конструктора передбачає моделювання процесів аеродинаміки з використанням системи автоматизованого проєктування, то цей розділ кваліфікаційної роботи викладемо у вигляді інструкції з охорони праці під час роботи інженера з використанням комп'ютерної техніки.

### 4.1. Загальні положення

Дія інструкції поширюється на всі підрозділи підприємства, де виконують роботи з персональним комп'ютером (ПК).

Інструкція розроблена відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держпраці від 26.01.2005 № 15, Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, затверджених наказом Мінсоцполітики від 14.02.2018 № 207, Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом ДСНС від 25.01.2012 № 67 (НПАОП 0.00-7.11-12).

За цією інструкцією працівника, який використовує персональний комп'ютер (далі – користувач), інструктують перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 6 місяців (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносять до Журналу реєстрації інструктажів з питань

охорони праці на робочому місці (у журналі має бути підпис особи, яка інструктує, та користувача).

Користувач зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я довколишніх при виконанні будь-яких робіт, а також під час перебування на території підприємства.

До роботи на персональному комп'ютері допускають осіб, які пройшли інструктажі з питань охорони праці та пожежної безпеки.

Користувач зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;
- не допускати за своє робоче місце сторонніх осіб;
- не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки;
- знати правила надання домедичної допомоги;
- знати розташування та вміти користуватись первинними засобами пожежогашіння;
- вміти працювати з ПК.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;
- нерівномірність розподілу яскравості в полі зору;
- підвищена яскравість світлового зображення;
- ураження електричним струмом;
- напруження зору та уваги;
- тривалі статичні навантаження.

У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

Основним обладнанням робочого місця є ПК або ноутбук, монітор, клавіатура, маніпулятор, робочий стіл, стілець (крісло).

При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору поза межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщувати на робочому столі документацію та матеріали, які використовує користувач.

Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню для експлуатування ПК.

Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача. Положення клавіатури та кут її нахилу залежить від побажання користувача (як правило, в межах 5-15°). Не допускати хитання клавіатури.

Конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні обладнання, що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, конструктивних особливостей і характеру його роботи.

Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози. Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

Раціональна поза користувача:

- ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна зорієнтовані у горизонтальній площині;

- верхні ділянки рук вертикальні;
- кут ліктьового суглоба у межах 70–90°;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°;
- нахил голови у межах 15–20°, а часті її повороти виключені.

Для забезпечення оптимальної робочої пози користувача необхідно:

- засоби праці, з якими користувач має тривалий або найбільш частий зоровий контакт, розмістити у центрі зони зорового спостереження та моніторного поля;
- забезпечити відстань близько 500 мм між найважливішими засобами праці, з якими користувач працює найчастіше.

ПК встановлювати на рівній твердій поверхні (столі). Не дозволено встановлювати ПК та оргтехніку на хитких підставках чи на похилій поверхні.

ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку живлення з розетки.

Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення. Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перегинати його, скручувати та зав'язувати шнур живлення у вузол.

ПК під'єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з'єднань та електророзеток заводського виробництва.

Штепсельні з'єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під'єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з'єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з'єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднань при вимкненні має бути зворотнім.

Заборонено під'єднувати електрообладнання до звичайної двошнурової електромережі.

За невиконання цієї інструкції працівники несуть відповідальність згідно з чинним законодавством.

#### **4.2. Вимоги безпеки перед початком роботи**

Оглянути робоче місце і навести на ньому лад; впевнитись, що на ньому немає сторонніх предметів, все обладнання і блоки ПК з'єднані з системним блоком з'єднувальними шнурами.

Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Монітор не має стояти на краю стола. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран – під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз; при цьому екран має бути трохи нахиленим – нижній край ближче до користувача.

Перевірити загальний стан апаратури, справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана.

Вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається. Заборонено вставляти і виймати вилку мокрими руками.

Відрегулювати та зафіксувати висоту крісла та зручний для користувача нахил спинки.

За потреби приєднати до комп'ютера необхідну апаратуру (принтер, сканер тощо). Усі кабелі, що з'єднують системний блок із іншими пристроями, вмикати та вимикати лише при вимкненому комп'ютері.

Відрегулювати яскравість свічення, контрастність монітора.

Про всі виявлені несправності інформувати керівника робіт і не братися до роботи, доки їх не буде усунено.

#### **4.3. Вимоги безпеки під час виконання роботи**

Під час роботи на ПК:

- стійко встановити клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, водночас передбачити можливість її поворотів та переміщень;
- якщо в конструкції клавіатури не передбачено простору для упору долонь, клавіатуру розміщують на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля;
- під час роботи на клавіатурі сидіти рівно, не напружуватися;
- щоб зменшити несприятливе навантаження на користувача при роботі з комп'ютерною мишею (вимушена поза, необхідність постійно контролювати якість дій), забезпечити велику вільну поверхню столу для переміщення комп'ютерної миші та зручного упору ліктьового суглоба;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати пил із поверхонь апаратури спеціальними серветками.

При роботі з ПК заборонено:

- самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо;
- встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК, ноутбука або монітора;
- ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може статися пожежа або ураження електрострумом.

Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити нетривалу перерву.

Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

#### **4.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи**

Зберегти інформацію.

Вимкнути ПК, монітор чи ноутбук.

Вимкнути стабілізатор, якщо комп'ютер під'єднаний до мережі через нього.

Прибрати робоче місце.

#### **4.5. Вимоги безпеки в аварійній ситуації**

Аварійні та небезпечні ситуації під час виконання роботи на ПК можуть виникнути у разі: короткого замикання, перевантаження блоку живлення системного блоку, перегрівання, пожежі, поломки крісла тощо.

У разі виникнення аварії або ситуації, що може привести до аварії, нещасного випадку, негайно від'єднати ПК від електромережі, повідомити про інцидент керівникові.

Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

Якщо стався нещасний випадок, зберегти обстановку в робочій зоні та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків). Поінформувати про подію керівника робіт (іншу відповідальну особу підприємства) та в подальшому керуватися його вказівками. Вжити заходів, щоб запобігти подібним випадкам у подальшому.

У разі виникнення пожежі (ознак горіння), повідомити керівнику та, за потреби, викликати оперативно-рятувальну службу за телефоном 101 або 112 (назвати адресу та місце виникнення пожежі, наявність людей, повідомити своє прізвище) та вжити можливих заходів для евакуювання людей, гасіння (локалізації) пожежі наявними засобами пожежогасіння. Пам'ятати, що гасіння електротехнічних пристроїв, які перебувають під напругою, виконувати лише після їх попереднього від'єднання від електромережі. Гасити за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, а в окремих випадках – сухим піском.

За потреби надати потерпілому домедичну допомогу згідно з інструкцією, що діє на підприємстві. У разі подальшого погіршення самопочуття потерпілого, не припиняючи надання домедичної допомоги, викликати за телефоном «103» швидку медичну допомогу; виконувати вказівки керівника робіт для ліквідації небезпеки [3, 4-6, 11, 18, 20].

Кваліфікаційна  
робота  
©Пашко Р. С.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена підвищеним інтересом до питань аеродинаміки легкових автомобілів, зумовленого стрімким розвитком систем автоматизованого проєктування, які використовуються в сучасному автомобілебудуванні.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано класифікацію легкових автомобілів за типом кузова, подано їх коротку характеристику. Аналіз сучасних підходів до проєктування автомобілів з точки зору аеродинаміки характеризується комплексним використанням чисельних методів, комп'ютерного моделювання, а також випробувань в аеродинамічних трубах. Враховуючи те, що випробування в аеродинамічних трубах є дороговартісним, доцільним є застосування комп'ютерного моделювання в процесі проєктування кузова автомобіля. Такий підхід дозволяє отримати достатньо точні результати при менших затратах часу і ресурсів, не застосовуючи фізичний прототип автомобіля. Виконаний огляд типів і форм кузовів легкових автомобілів показав, що вони мають вирішальний вплив на аеродинамічні властивості автомобіля. Крім того, в роботі розглянуто еволюційний шлях автомобільної аеродинаміки впродовж всієї історії розвитку автомобілебудування.

Для досліджень обрано різні типи кузовів легкових автомобілів *Volkswagen*, а саме: седан, хетчбек, універсал, позашляховик, фургон та мінівен. Макети кузовів змодельовано в CAD-модулі *SolidWorks*. Розроблено та описано методику проведення аеродинамічного дослідження кузовів легкових автомобілів з використанням модуля *SolidWorks Flow Simulation*, що ґрунтується на методі скінченних об'ємів.

За результатами моделювання визначено значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$  для кожного кузова та співставлено з технічними характеристиками реальних моделей автомобілів, яким відповідали макети, виконані в *SolidWorks*. Так, найкращі аеродинамічні характеристики – в автомобіля, виконаного в кузові «седан», значення  $C_x$  для нього становить  $C_x=0,27$ .

Максимальні значення  $C_x$  з розглянутих варіантів кузовів – у фургона та мінівена, значення  $C_x$  для них становить  $C_x=0,34$ . Побудова епюр розподілу тиску по кузову автомобіля, швидкостей руху повітря та його траєкторій дали змогу оцінити причини утворення турбулентних зон в навколокузовному просторі, які негативно впливають на аеродинамічні показники легкового автомобіля.

Крім того, побудовано залежності значень сили лобового опору від швидкості руху в діапазоні  $V=90\dots140$  км/год., що дає змогу оцінити вплив форми кузова на силу лобового опору. Результати, одержані в роботі, показали доцільність використання *SolidWorks Flow Simulation* для визначення аеродинамічних властивостей кузова легкового автомобіля на етапі його проєктування, що є раціональним рішенням з огляду на економію часових та фінансових ресурсів.

В роботі розглянуто питання охорони праці та безпеки під час проведення аеродинамічних досліджень з використанням САПР.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дерягін В. Ф. Основи аерогідрогазодинаміки: Навч. посібн. – Кіровоград: ДЛАУ, 2006. – 192 с.
2. Герасимчук Ю.І. Визначення коефіцієнта лобового опору автомобіля Skoda Superb. Перші наукові кроки – 2024: збірник наукових праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (18 квітня 2024 р., м. Кам'янець-Подільський). – Кам'янець-Подільський, 2024. – С. 38.
3. Городецький І., Тимочко В., Магац М. та ін. Аналіз стану виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського НУП. Серія Агроінженерні дослідження*. Львів, 2023. № 27. С. 127–137. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
4. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В.О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. І. Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
5. Пістун І. П., Тимочко В.О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. II. Львів: Тріада плюс, 2015. 224 с.
6. Пістун І.П., Березовецький А.П., Городецький І.М. Охорона праці на автомобільному транспорті: *навч. посіб.* Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.
7. Пилипенко О. М., Батраченко О. В., Литовченко І. М. Зменшення аеродинамічного опору кабіни вантажного автомобіля. *Вісник Хмельницького національного університету*, №3, 2018 (261). С. 69-73.
8. Приходько А. А. Комп'ютерні технології в аеродинаміці і тепломасообміні. Київ : Наукова думка, 2003. 379 с.
9. Стукалець І., Коробка С., Цонинець Р. Використання SolidWorks Flow Simulation під час моделювання геометричних форм деталей кузовів автомобілів. *Вісник Львівського НАУ. Агроінженерні дослідження*. – 2021. № 25. – С. 127-142.

10. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
11. Тимочко, В., Городецький І., Бурнаєв О. та ін. Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання. *Вісник Львівського НАУ. Серія Агроінженерні дослідження*. 2024. №28. С. 227–235.
12. Цонинець Р. М. Аеродинамічне дослідження моделі автомобіля, створеної методом гібридного геометричного моделювання в середовищі SolidWorks. Матеріали Міжнародного студентського наукового форуму «Студентська молодь і науковий прогрес в АПК», 04–06 жовтня 2022 р. Львів, 2022.
13. Abdul Razzaque Ansari «CFD Analysis Of Aerodynamic Design Of Tata Indica Car», *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* Volume 8, Issue 3, pp. 344–355, March 2017.
14. Aerodynamic Analysis of a Car for Reducing Drag Force (Gavin Dias, Nisha R. Tiwari, Joju John Varghese, Graham Koyeerath).
15. Belzile Marc. Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses. Technical Report [Електронний ресурс] / Marc Belzile. – Канада, 2012. – Режим доступу : [www.tc.gc.ca](http://www.tc.gc.ca).
16. C. M. M and Y. Priyanka, “Aerodynamic Analysis on a Car To Reduce Drag Force Using Vertex Generator,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 11, pp. 1833–1843, 2019.
17. Cfd report 3d aerodynamic analysis of «AEROCAR» hatchback concept at 80kmph Design and Analysis the Effect of Rear spoiler and Rear diffuser on Aerodynamic Forces using CFD.
18. Dmytriv, V., Dmytriv, I., Horodetsky, I., Hutsol, T., Kukharets, S., Cesna, J., Bleizgys, R., Pietruszynska, M., Parafiniuk, S., Kubon, M., & Horetska, I. (2024). A Method for Simulating the Positioning Errors of a Robot Gripper. *Applied Sciences*, 14(14), 6159. <https://doi.org/10.3390/app14146159>.

19. Galamboš, Stjepan & Dorić, Jovan. (2015). Design and analysis of car body using cfd software.
20. Horodetsky I. et al. Method of theory of dimensions in experimental research of systems and processes. INMATEH-Agricultural Engineering. Volume 65, No. 3. 2021. P. 233-240. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-24>.
21. Hucho, W. H., Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition, SAE International 1998.
22. Introduction to Computational Fluid Dynamics (Dmitri Kuzmin) <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/kuzmin/cfdintro/cfd.html>.
23. J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics (Boston: McGraw-Hill, 2001)
24. Ramya, P & Kumar, A & Moturi, Jaswanth & Ramanaiah, Nallu. (2015). Analysis of Flow over Passenger Cars using Computational Fluid Dynamics. International Journal of Engineering Trends and Technology. 29.170-176. 10.14445/22315381/IJETT-V29P232.
25. Sankar, Shanmugasundaram. (2018). CFD Analysis of Aerodynamics of Car. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 7. 4689-4693.
26. Wolf-Heinrich Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles, 4th Revised Edition, Society of Automotive Engineers, U.S., 1998, ISBN: 978-0768000290.
27. Solidworks Simulation CFD [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.solidworks.com/>.