

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему **«Дослідження аеродинамічних характеристик  
автомобіля Mitsubishi Lancer»**

Виконав: студент VI курсу групи Маш-62

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
(цифрові технології)

Роман ЦОНИНЕЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Керівник:

Ігор СТУКАЛІЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

УДК 681.3.06

Дослідження аеродинамічних характеристик автомобіля Mitsubishi Lancer.

Цонинсць Р. М. – Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024 р.

Кваліфікаційна робота: 67 с. текст, част., 54 рис., 4 табл., 20 джерел.

У кваліфікаційній роботі розглянуто методи аеродинамічних досліджень автомобілів. Виконано аналіз конструкцій кузовних елементів, які встановлюються на автомобілі, зокрема – спойлерів, антикрил, багажників, автобоксів. Здійснено моделювання макету автомобіля *Mitsubishi Lancer*.

В середовищі SolidWorks Flow Simulation виконано комп'ютерне моделювання руху автомобіля без кузовних елементів, а також зі спойлером, антикрилом, багажником та автобоксом. Отримано значення сили лобового опору автомобіля для кожного з вищенаведених варіантів.

Розраховано значення коефіцієнта лобового опору для усіх варіантів комплектування автомобіля з кузовними елементами та без них, а також зроблено висновки щодо витрат палива для кожного з варіантів використання кузовних елементів на автомобілі *Mitsubishi Lancer*.

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

д.т.н., професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту  
**Цопинцю Роману Миколайовичу**

1. Тема роботи: **«Дослідження аеродинамічних характеристик автомобіля Mitsubishi Lancer»**

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

Затверджена наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ року № \_\_\_\_\_.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ року

3. Вихідні дані:

- Марка автомобіля – Mitsubishi Lancer 2005.
- Кузовні елементи: спойлер, антикрило, багажник на дах, автобокс.
- Комп'ютерне моделювання проводити в середовищі SolidWorks Flow Simulation.
- Вихідні параметри аеродинамічних досліджень:
  - атмосферний тиск – 101325 Па;
  - температури повітря – 293,2 К (20 С°);
  - щільність повітря – 1,21 кг/м<sup>3</sup>;
  - швидкість руху автомобіля – 25 м/с (90 км/год).

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Проаналізувати параметри повітряного потоку, який діє на автомобіль, що рухається; вивести опору повітря. Проаналізувати конструкцію кузовних деталей та їх можливий вплив на аеродинаміку автомобіля.

2. Розглянути існуючі методи аеродинамічних досліджень, обґрунтувати методику проведення аеродинамічного аналізу.

3. Виконати тривимірні твердотілі моделі автомобіля з кузовними елементами в масштабі 1:1.
5. Виконати аеродинамічне дослідження руху автомобіля для різних варіантів його компоновання з кузовними елементами в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*.
6. Проаналізувати одержані в роботі результати.  
Висновки і пропозиції.  
Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу

- Презентація кваліфікаційної роботи у форматі \*.pptx.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання вдано	завдання прийнято	
1,2,3,4,5	Ігор СТУКАЛЕЦЬ, к. т. н., в. о. доц. кафедри машинобудування			

7. Дата видачі завдання: «    »                    202   року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Нор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Аналіз стану титанія в теорії та практиці»</i>		
2.	<i>Виконання розділу: «Обґрунтування методика аеродинамічного дослідження»</i>		
3.	<i>Виконання розділу: «Проектування моделі автомобіля в середовищі <i>SolidWorks</i>»</i>		
4.	<i>Виконання розділу: «Методика експериментальних досліджень в <i>SolidWorks Flow Simulation</i>»</i>		
5.	<i>Виконання розділу: «Аналіз результатів аеродинамічних досліджень».</i> <i>Формування висновків по роботі</i>		
6.	<i>Оформлення розрахунково-новітностельної частини та презентації роботи.</i> <i>Завершення роботи в цілому</i>		

Студент \_\_\_\_\_ Роман ЦОПИНЕЦЬ  
(підпис)

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

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ .....	8
1.1. Параметри повітряного потоку .....	8
1.2. Аеродинамічні характеристики автомобіля .....	11
1.3. Види опору повітря .....	12
1.4. Методи аеродинамічних досліджень автомобілів .....	14
1.5. Кузовні елементи автомобілів та їх вплив на аеродинаміку .....	17
1.5.1. Спойлери та антикрила .....	17
1.5.2. Багажники .....	22
1.5.3. Автобокси .....	23
2. ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ АЕРОДИНАМІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ .....	26
2.1. Чисельні методи .....	26
2.2. Стендові методи .....	28
2.3. Дорожні методи .....	32
2.4. Методи комп'ютерного моделювання .....	33
3. ПРОЄКТУВАННЯ МОДЕЛІ АВТОМОБІЛЯ В СЕРЕДОВИЩІ <i>SOLIDWORKS</i> .....	38
3.1. Створення видових ескізів автомобіля .....	38
3.2. Проєктування елементів моделі кузова автомобіля методом поверхневого моделювання .....	39
3.3. Проєктування коліс автомобіля методом твердотілого моделювання .....	43
3.4. Створення складаної одиниці «кузов-колеса» .....	44
3.5. Проєктування додатково встановлених кузовних елементів .....	44
4. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В <i>SOLIDWORKS</i> <i>FLOW SIMULATION</i> .....	48
4.1. Визначення лобової площі автомобіля .....	48

4.2. Аеродинамічне дослідження моделі автомобіля в програмному комплексі <i>SOLIDWORKS Flow Simulation</i> .....	49
5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ АЕРОДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	54
5.1. Результати визначення лобової площі.....	54
5.2. Результати визначення сили лобового опору та притискної сили.....	55
5.3. Аналіз результатів руху повітряних потоків.....	58
5.4. Результати визначення коефіцієнта лобового опору.....	61
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	63
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	66

## ВСТУП

Аеродинаміка значною мірою впливає на такі важливі показники автомобіля, як безпека, паливна економічність, швидкісні та динамічні властивості, продуктивність, екологічність, а також рівень його споживчих властивостей та конкурентоспроможності. Оскільки вплив аеродинаміки проявляється при високих швидкостях руху, то основна увага приділяється дослідженню та поліпшенню аеродинамічних характеристик швидкісних автотранспортних засобів, до яких належать гопочні автомобілі та мотоцикли, легкові автомобілі, міжміські автобуси, магістральні автопоїзди.

В даний час спостерігається підвищений інтерес до аеродинаміки автомобілів та автопоїздів. На сьогодні налічується понад двадцять складних аеродинамічних та аерокліматичних комплексів, що стали невід'ємною частиною деяких автомобільних фірм або науково-технічних центрів, що займаються проєктуванням автотранспортних засобів. Витрати на будівництво таких комплексів та вартість проведення досліджень у них значні. Так, наприклад, вартість аеродинамічного комплексу на фірмі «Porsche» становить близько 25 млн. євро, а одна година випробувань у цій великій аеродинамічній трубі коштує 1,5 тис. євро. Однак, незважаючи на високу вартість, будівництво таких комплексів розширюється, оскільки сьогодні автомобільна техніка стала показником технічного рівня не лише фірми, а й держави загалом.

Одним з найважливіших напрямів роботи є аеродинамічний проєкт автомобіля, заснований на системній оптимізації аеродинамічних характеристик, що дозволяє істотно підвищити його безпеку, паливну економічність і швидкісні властивості. Вирішується ціла низка інших важливих завдань, що впливають на техніко-економічні, споживчі та екологічні якості автомобіля. Це підвищення безпеки, зниження рівня аеродинамічного шуму, зменшення забруднюваності автотранспортних засобів та їхнього впливу на екологію навколишнього середовища.

## 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ

### 1.1. Параметри повітряного потоку

Атмосферне повітря складається з механічної суміші різних газів, серед яких у нижньому, приземному шарі переважають азот та кисень. Середній об'ємний склад сухого повітря, прийнятий як умовний стандарт, характеризується такими газовими компонентами: азот - 78%, кисень - 21%, вуглекислий газ, інертні гази, водень та ін. - 1%. Однак склад повітря може бути дуже різним залежно від географічного місця, висоти над рівнем моря, вологості, наявності пилу та інших факторів.

Важливою властивістю атмосферного повітря є його в'язкість. Повітря майже не чинить опір відносному зсувному руху його шарів, тому у вільному потоці в'язкість повітря практично не виявляється. Ця властивість проявляється лише при русі повітря поблизу поверхні. Тверда поверхня за рахунок сил тертя підгальмовує повітряний потік, що рухається, приводячи до формування на ній практично нерухомого прикордонного шару. Кількісна оцінка в'язкості повітря знаходить свій відбиток у кінематичному коефіцієнті в'язкості. Для стандартної атмосфери, тобто нормального барометричного тиску 760 мм рт.ст. і температури  $+15^{\circ}\text{C}$ , величина коефіцієнта кінематичної в'язкості  $\nu$  становить  $1,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

$$p_a'' = p_a \cdot 0,97 \cdot H_m \quad (1.1)$$

де  $H_m$  – висота однорідної атмосфери (при  $T=0^{\circ}\text{C}$ ,  $H_m = 7995,4 \text{ м}$ );

$p_a$  – атмосферний тиск при  $H_m = 0$ .

В основі закономірностей лежать закони зміни температури з висотою, знайдені дослідним шляхом для різних шарів атмосфери. Для приземного шару закон зміни температури з підйомом на висоту прийнято за виразом:

$$T'' = T + 0,07 \cdot H_m'' \quad (1.2)$$



Зі співвідношень (1.1) і (1.2), використовуючи рівняння стану повітря, можна знайти зміну щільності повітря з висотою над рівнем моря. Для отримання таких відомостей можна скористатися табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри атмосфери

Геометрична висота $H_0$ над рівнем моря, м	Температура, $T$ , К	Барометричний тиск $p$ , кН/м <sup>2</sup>	Щільність повітря $\rho$ , Н·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>	Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu \cdot 10^5$ , м <sup>2</sup> /с
0	288,16	103,3	1,2492	1,4607
500	284,90	97,3	1,1902	1,5196
1000	281,65	91,6	1,1336	1,5812
1500	278,40	86,2	1,0791	1,6461
2000	275,14	81,1	1,0265	1,7146
2500	271,89	76,2	0,9759	1,7866
3000	268,64	71,5	0,9273	1,8624
3500	265,38	67,1	0,8804	1,9426
4000	262,13	62,8	0,8355	2,0271
4500	258,88	58,9	0,7924	2,1162

Розподіл тиску атмосферного повітря вздовж земної поверхні має нерівномірний характер. Саме цим пояснюється виникнення потоків повітряних мас – вітрів. Великою своєрідністю відрізняється вітер у гірській місцевості, де нерівності земної поверхні іноді викликають надзвичайно потужні повітряні потоки. Сукупність повторюваності напрямів вітру в певному районі, що відкладаються по румбах в однаковому масштабі, показує важливу характеристику повітряного атмосферного потоку – розу вітрів. Роза вітрів дозволяє визначити переважні напрямки приземних атмосферних течій, що необхідно враховувати в оцінці силових впливів на колісні транспортні засоби.

Рух повітряних мас поблизу земної поверхні майже паралельний їй. Тертя частинок повітря на поверхню сильно гальмує вітрові потоки, тому швидкість вітру з підвищенням висоти над рівнем моря зростає. Формування вертикального профілю середньої швидкості вітру, ступінь зміни швидкості

від шару до шару поблизу поверхні землі повітряно визначаються шореткістю поверхні.

Аеродинаміка передбачає припущення про однорідність і нестисканність повітряного потоку, тому фізичні властивості повітря можна охарактеризувати такими параметрами: тиском, температурою, щільністю, в'язкістю.

**Температура повітря.** Температура повітря вимірюється у градусах Цельсія ( $t$ ) або абсолютних градусах ( $T$ ). Як відомо з фізики,  $T=273+t$ . За нормальну температуру на поверхні землі приймають  $t=15^{\circ}\text{C}$ .

**Щільність повітря.** Щільність повітря обчислюється за звичайною формулою, відомою з фізики та термодинаміки, за так званим рівнянням стану газу.

За нормальних умов, тобто, при температурі  $15^{\circ}\text{C}$  тиску  $B_0=760$  мм рт. ст., величина щільності повітря  $\rho_0=1,25$  Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>.

**В'язкість повітря.** Важливим поняттям в аеродинаміці є в'язкість повітря.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu=\mu/\rho$  характеризує співвідношення сил в'язкості та сил інерції. Для повітря при  $t=15^{\circ}\text{C}$  та  $B_0=760$  мм рт. ст. його значення становить  $\nu=1,45\cdot 10^{-5}$ .

Під час вивчення складних явищ, пов'язаних з обтіканням тіла повітряним потоком, широко використовується таке поняття, як лінія струму. Лінії струму, що характеризують шлях частинок повітря з часом, дозволяють графічно описати характер розподілу швидкостей у заданому просторі, через який протікає повітряний потік. З часом лінії струму можуть змінювати свою форму залежно від того, чи рух газу встановився або не встановився. Такий рух газу, при якому в будь-якій точці простору його параметри (швидкість, щільність, температура та ін.) з часом не змінюються, називається встановленим, або стаціонарним. Лінії струму під час руху весь час зберігають свою форму і збігаються з траєкторіями частинок повітря.

## 1.2. Аеродинамічні характеристики автомобіля

При натіканні потоку повітря в результаті його взаємодії з автомобілем виникають повна аеродинамічна сила, що діє на нього, і повний аеродинамічний момент. Повна аеродинамічна сила  $P_w$  – це рівнодіюча всіх елементарних аеродинамічних сил, що діють на поверхню автомобіля. Повний аеродинамічний момент  $M_w$  – це результуючий момент, що створюється всіма аеродинамічними силами, що діють на автомобіль.

Повна аеродинамічна сила та повний аеродинамічний момент визначаються таким чином:

$$P_w = 0,5C_w F \rho V_x^2 \quad (1.3)$$

$$M_w = 0,5m_w F \rho V_x^2 B \quad (1.4)$$

де  $C_w$  та  $m_w$  – коефіцієнти повної аеродинамічної сили та моменту, відповідно;

$\rho$  – щільність повітря;

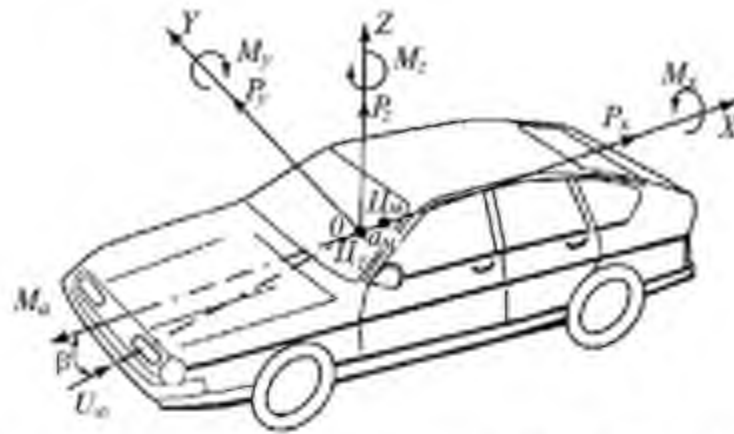
$F$  – лобова площа автомобіля;

$V$  – швидкість натікання незбуреного повітряного потоку;

$B$  – характерний розмір, наприклад, база автомобіля.

Розклавши повну аеродинамічну силу і повний аеродинамічний момент по трьох осях зв'язаної системи координат, початок якої зазвичай суміщають з центром ваги Цг автомобіля (рис. 1.1), отримуємо:  $P_x$  – силу лобового опору;  $P_y$  – бічну силу;  $P_z$  – підйомну силу;  $M_x$  – момент крену;  $M_y$  – перекидальний момент, або момент тангажу;  $M_z$  – повертаючий момент.

Сила  $P_x$  лобового аеродинамічного опору суттєво впливає на витрати потужності під час руху автомобіля з високою швидкістю. Бічна сила  $P_y$  виникає при несиметричному обтіканні автомобіля під впливом бокового вітру. Підйомна сила  $P_z$  є результатом більшого тиску, що діє на днище автомобіля, ніж на дах. Точка Цм (рис. 1.1) прикладання рівнодіючої аеродинамічних сил називається метacentром.



Ц<sub>T</sub> – центр ваги автомобіля; Ц<sub>M</sub> – метацентр;  $a_M$  – плече аеродинамічного моменту;  $\beta$  – кут натікання повітряного потоку

Рисунок 1.1 – Схема аеродинамічних сил та моментів, що діють на автомобіль

Звідси сила лобового опору

$$P_x = 0,5C_x\rho FV_\infty^2$$

де  $C_x$  – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Відстань від центру ваги до метацентру називається плечем аеродинамічного моменту, що намагається його повернути. При цьому під дією моменту, що повертає, автомобіль намагається стати перпендикулярно до напрямку повітряного потоку, якщо він не збігається з його поздовжньою віссю. Однак за рахунок сил тертя в контактї шин із дорогою автомобіль рухається у заданому напрямку.

### 1.3. Види опору повітря

Опір повітря, який діє на транспортний засіб, – це сума сил, які можна поділити на групи, наведені на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Сили аеродинамічного опору

Опір форми є результуючою всіх елементарних сил нормального тиску, що діють на зовнішню поверхню кабіни та кузова. Він визначається обтічністю форм їх поздовжнього та поперечного перерізів.

Опір тертя – результуюча всіх дотичних сил, що діють на зовнішню поверхню кабіни та кузова, що залежить від величин дотичних напружень у зоні приграничного шару. Для забезпечення мінімального значення необхідно, щоб дотичні напруги були малі, тоді прикордонний шар збереже свою ламінарність, в іншому випадку при великих дотичних напруженнях він переходить в турбулентний стан, що супроводжується відривом потоку і виникненням вихорів.

Опір внутрішніх потоків виникає через гальмування та втрати енергії зустрічного повітря, що забирається в системи охолодження двигуна та вентиляції кабіни та кузова, і залежить від їхнього конструктивного виконання та витрати повітря.

Індуктивний опір обумовлений виникненням діючої на транспортний засіб підйомної сили та перетіканням з вихреутвореннями повітряних потоків з підднищової зони вгору по бокових стінках кабіни та кузова (через різниці тисків на днище транспортного засобу та його даху) і залежить від його конструктивного виконання.

Додатковий опір пов'язаний з наявністю на дрібних поверхнях кабіни і кузова, що виступають за їх габарити, конструктивних елементів: дверних ручок, зовнішніх дзеркал, антен, габаритних ліхтарів і т.д. Він визначається як кількістю цих елементів, так і ступенем їх обтічності.

Питома вага складових аеродинамічного опору залежить від типу транспортного засобу. На рис. 1.3 наведено співставлення складових аеродинамічного опору легкового автомобіля.



Рисунок 1.3 – Співставлення складових аеродинамічного опору легкового автомобіля

Також має місце внутрішній опір. Внутрішнім опором називають опір, що зумовлений рухом повітряного потоку через вентиляційні системи та охолодження. Основна його характеристика – це різка зміна руху потоку повітря, що має складну конфігурацію. Це може бути проходження повітря через радіатор автомобіля та фільтри салону.

#### 1.4. Методи аеродинамічних досліджень автомобілів

Дослідження аеродинамічних параметрів автомобіля є одним з основних завдань автомобілебудування. Оптимальні аеродинамічні параметри автомобіля дозволяють не лише заощадити паливо, а й суттєво підвищити стійкість та динамічність автомобіля на дорозі.

Сьогодні існує кілька методів дослідження аеродинамічних параметрів автомобіля: комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження в аеродинамічній трубі та інші.

Дослідження в аеродинамічній трубі передбачає виготовлення дослідного зразка реальних розмірів або з масштабним коефіцієнтом та проведення численних лабораторних дослідів. Тому цей метод є найдорожчим, але при цьому він дозволяє отримати найбільш точні та достовірні результати.

Другий спосіб – комп'ютерне моделювання, що дозволяє суттєво скоротити матеріальні витрати (відсутність необхідності створення реальної моделі та лабораторних установок) та зменшити час отримання результатів. Але водночас вимагає створення точної детальної комп'ютерної моделі автомобіля з правильно заданими початковими та розрахунковими параметрами. У ньому найтривалішими періодами може бути час, затрачений на створення комп'ютерної моделі і час безпосередньо розрахунку. Точність подібних розрахунків залежить від параметрів сітки скінченних елементів.

Основним параметром аеродинаміки автомобіля прийнято вважати коефіцієнт лобового аеродинамічного опору. Це безрозмірна величина, що є відношенням сили опору повітря руху автомобіля до сили опору руху циліндра.

$$C_x = \frac{F_{auto}}{F_{cylinder}} \quad (1.6)$$

де  $F_{auto}$  – сила опору повітря руху автомобіля,

$F_{cylinder}$  – сила опору руху циліндра.

Відповідно, чим менший цей коефіцієнт, тим вищі аеродинамічні властивості.

Широко відомі коефіцієнти аеродинамічного опору різних тіл (рис. 1.4).

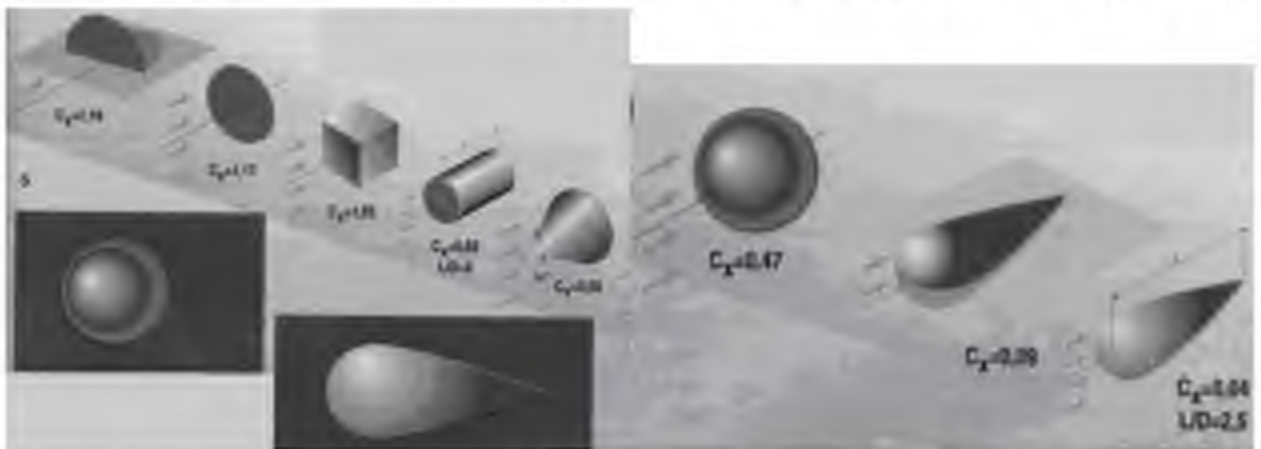


Рисунок 1.4 – Коефіцієнти аеродинамічного опору різних тіл

Як бачимо, максимальний коефіцієнт має куб, а найменший – у краплі. Таким чином, для збільшення аеродинамічних властивостей, необхідно прагнути до форм, які мають найменший коефіцієнт аеродинамічного опору.

Коефіцієнти аеродинамічного опору деяких автомобілів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти аеродинамічного опору деяких автомобілів

<b>Марка автомобіля</b>	<b>Коефіцієнт <math>C_x</math></b>
Alfa Romeo 164	0,30
Aston Martin Virage 2012	0,34
Audi 200 Quattro C3	0,33
Bentley Mulsanne 2011	0,35
BMW Z4 sDrive35i (mk2) 2011	0,35
Cadillac Eldorado Touring Coupe 1995	0,36
Chevrolet Camaro ZL1 (mk5) 2012	0,35
Citroen C4 VTS 2006	0,28
Ford Sierra 1.8 GL	0,34
Honda Civic Type R 2008	0,34
Jeep Grand Cherokee SRT8 2012	0,39
Mazda 121 1.3 LX Sun Top	0,36
Mercedes-Benz SLS AMG 2011	0,36
Mitsubishi Lancer EVO X 2009	0,34
Opel Astra OPC (mk3) 2007	0,34
Peugeot 305 1.9 GTX	0,38
Porsche Cayenne Turbo 2012	0,36
Renault Clio 1.4 RT mk1	0,32
Seat Ibiza 1.5 GLX	0,36
Seat Malaga 1.5 GLX	0,39
Skoda Octavia RS 2007	0,31
Subaru 1.8 GTi	0,35
Toyota Supra 3.0i Turbo mk3	0,32
Volkswagen Golf 1.8 GL Mk2	0,34
Volvo 850 2.5 GLT Auto	0,32
VW Golf R (mk6) 2012	0,34

Сутність аеродинаміки автомобіля полягає у знаходженні оптимальних форм елементів кузова, які можуть бути отримані в результаті комп'ютерних досліджень або випробувань в аеродинамічній труби.



Аеродинамічна труба – це унікальна технічна споруда, призначена для моделювання впливу середовища на тіла, що рухаються.

В даний час світові концерни мають власні аеродинамічні комплекси, які застосовуються не тільки для визначення аеродинамічних характеристик, а також імітації погодних та температурних умов. Дані споруди зайняли важливу роль в автомобільних фірмах та науково-технічних центрах, що займаються як проєктуванням нових кузовів та елементів автомобілів, але також і удосконаленням існуючих.

Для комп'ютерних досліджень необхідно кресленики, або фотографії, або 3D-скан автомобіля та наявність ліцензійного програмного забезпечення, за допомогою якого проводиться віртуальне дослідження.

### **1.5. Кузовні елементи автомобілів та їх вплив на аеродинаміку**

Серед елементів, які додатково встановлюються на кузов автомобіля, є: багажники на даху, кріплення для лиж, автобокси, рейлінги, «кенгурятники», молдинги, дефлектори, спойлери, антикрила тощо. Такі елементи мають різне призначення – одні виконують функцію збільшення функціонального призначення автомобіля, тобто збільшують можливості з транспортування габаритних вантажів, інші сприяють покращенню аеродинамічних властивостей автомобіля або відіграють естетичну роль у дизайні транспортного засобу.

У кваліфікаційній роботі розглянемо деякі з них та проаналізуємо їхній вплив на аеродинамічні властивості автомобіля.

#### **1.5.1. Спойлери та антикрила**

Спойлер (рис. 1.5) – це автомобільний аксесуар, призначений для покращення аеродинаміки автомобіля. Крім практичних властивостей, спойлери виконують і естетичну функцію вони роблять дизайн машини більш сучасним. Автомобіль із новими спойлерами нагадує швидкісну спортивну

модель. Тому купівля даного пристрою дозволить зробити ефектний тюнінг за мінімальні гроші.



Рисунок 1.5 – Спойлер на автомобілі *Mitsubishi Lancer*

Залежно від місця встановлення, спойлери на авто можуть бути:

- передніми. Призначені для зниження потоку повітря під автомобілем. Місце встановлення – нижня частина переднього бампера (він торкається заднього краю). Передній спойлер також покликаний охолоджувати колодки, барабани, радіатори та гальмівні диски;
- задніми. Встановлюються на кришці багажника. Необхідні для встановлення на машини із заднім приводом. Виріб покращує контакт коліс з дорожнім полотном, забезпечує вплив на вісь притисної аеродинамічної сили;
- на дах;
- на передній та задній бампер;
- дифузори (кріпляться над дном або між елементами кузова).

Залежно від особливостей дизайну на ринку можуть бути представлені як ексклюзивні варіації (кастоми), так і серійні вироби. Останні варіації є заводськими, випускаються серійним способом.

За способом застосування автомобільні аксесуари можуть бути наступних типів:

- універсали (призначені для авто будь-якої моделі і будь-якої марки);
- модельні (підходять для машин певних марок та моделей).

Різні спойлери і за способом кріплення. Кріплення можуть бути липкі та на опорах. Липкі варіації приклеюються до кузова машини завдяки скляному клею або двостороннього скотчу.

При некваліфікованій установці спойлерів автовласник ризикує зіткнутися з такими неприємностями:

- може знизитися дорожній просвіт;
- існує ризик збільшення витрати палива;
- можуть погіршитися аеродинамічні властивості машини (це також вплине на погіршення керованості та безпеку водіння).

Найпопулярніші пластикові спойлери (вони користуються попитом завдяки своїй доступності за ціною) мають одну важливу особливість — вони тендітні і недовговічні. Купуючи пластикові аксесуари, готуйтеся до того, що вони вам прослужать не роки, а місяці, проте їхня вартість мінімальна. Більш дорогі аналоги, виконані з алюмінію та карбону, прослужать набагато довше завдяки своїй міцності, але вони по кишені далеко не кожному автовласнику.

Багато хто вважає, що терміни «спойлер» і «антикрило» означають те саме. Насправді, це не так.

Відмінності між спойлером і антикрилом існують, хоча деякі автомобілі, на зразок Porsche 911 GT3 RS, мають і те, й інше (рис. 1.6). Ну а оскільки і спойлери, і антикрила є елементами аеродинамічного обважування, багато водіїв звикли використовувати ці терміни як взаємозамінні. Так, вони виконують схожі функції, проте їх призначення та принцип роботи зовсім різні. Антикрило призначене для збільшення притискної сили, в той час як спойлер використовується для переривання повітряного потоку над кузовом автомобіля та досягнення певних аеродинамічних цілей (наприклад, зменшення лобового опору або захист вікон від бруду).



Рисунок 1.6 – Спойлер та антикрило на автомобілі *Porsche 911 GT3 RS*

Для того, щоб краще зрозуміти функцію антикрила, можна розглянути профіль крила літака (рис. 1.7), що називається аеродинамічним профілем. Оскільки, щоб злітати і залишатися у повітрі, літакам потрібна підйомна сила, форма їх крил утворює область низького тиску над верхньою поверхнею та вищого тиску – під нею.

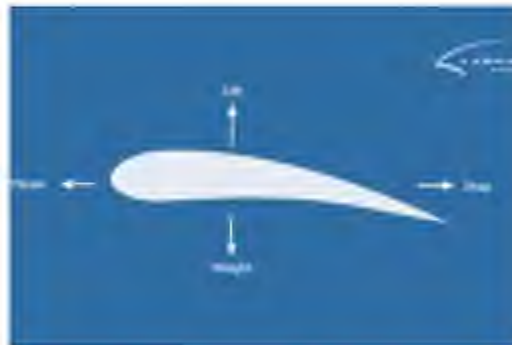


Рисунок 1.7 – Профіль крила літака

Це досягається за рахунок збільшення верхньої (опуклої) поверхні крила, відносно майже плоскої нижньої. В результаті потік повітря над крилом прискорюється, а різниця тисків створює підйомну силу. Важливо відзначити, що повітря має проходити по обох поверхнях: якщо виключити з рівняння хоча б одну з них схема перестане працювати. При цьому не можна забувати, що крила створюють аеродинамічний опір, що навантажує двигун і впливає на витрату палива.

Тепер повернемося до антикрила, яке зазвичай знаходиться у задній частині автомобіля. Якби ми використовували той самий аеродинамічний

профіль, що і в авіабудуванні, то антикрило створювало б підйомну силу, роблячи задню частину машини нестійкою. Але якщо перевернути конструкцію догори ногами – вона створить від’ємну підйомну силу та притисне задню частину автомобіля до дороги. Використання антикрила – найпростіший спосіб покращити стійкість навіть на високих швидкостях, щоправда, за рахунок додаткового лобового опору. З 1960-х років інженери шукали способи збільшити притискну силу без шкоди для аеродинамічного опору, властивого антикрилам, але прогрес у цій галузі призвів лише до того, що тепер великі антикрила ставлять переважно на хардкорні автомобілі. Хоча іноді їх можна побачити у повсякденному житті, наприклад, на *Porsche 911 GT3 RS*, в якому використовується потужне антикрило з функцією *DRS* (система зниження лобового опору).

Намагаючись подолати проблему з опором, виробники оснащують сучасні антикрила елементами активної аеродинаміки. На нижчих швидкостях, коли притискна сила антикрила порівняно невисока, але рівень опору вже досить значний, технології активної аеродинаміки дозволяють прибрати або встановити під іншим кутом, щоб мінімізувати опір.



Рисунок 1.8 – Антикрило на автомобілі *Mitsubishi Lancer*

При збільшенні швидкості, коли дія притискної сили стає критично важливою, особливо в поворотах, антикрило навпаки висувається або змінює кут нахилу. На жаль, антикрило має певні недоліки, які дуже складно виправити навіть за допомогою інтелектуальних систем управління, і щоб

скористатися його позитивними функціями – доведеться миритися з негативними.

### 1.5.2. Багажники

Багажники на дах автомобіля (рис. 1.9) – незамінні аксесуари для тих, хто часто вирушає у подорожі, перевозить спортивний інвентар чи додаткові речі. Вибір потрібного багажника – важливий крок, адже він повинен забезпечувати надійність та безпеку вантажу. Багажники на дах автомобіля бувають різних профілів: круглих, еліптичних, квадратних, профілів зі складними обтічними формами.



*a)* – багажник, встановлений на гладкому даху; *б)* – багажник, встановлений на рейлингах.

Рисунок 1.9 – Встановлення багажника на даху автомобіля

Існує кілька типів кріплення багажників на дах транспортного засобу.

- На гладкий дах (рис. 1.9, *a*). Ці багажники призначені для машин з гладким дахом без рейлінгів, водостоків або інших елементів, що виступають. Вони кріпляться за допомогою спеціальних присосок та затискачів.
- На рейлингах (рис. 1.9, *б*). Рейлинги – це поздовжні бруски або стійки, встановлені на даху автомобіля. Багажники для рейлінгів кріпляться до цих стійок і забезпечують надійну фіксацію вантажу.

Цей тип багажників використовується на авто з інтегрованими водостоками. Вони кріпляться до водостоків, забезпечуючи стійкість.

Деякі машини мають спеціальні місця для встановлення багажників, які вже вбудовані в конструкцію даху.

### 1.5.3. Автобокси

Бокс на даху авто – простий і безпечний спосіб збільшити кількість речей, що перевозяться. Особливо зручно це для автотуристів, рибалок, шанувальників лиж та сноуборду, для тих, хто не бачить життя без походів із наметами. Корисні бокси для тих, хто регулярно переїжджає або просто перевозить речі з місця на місце. В принципі, він стане у нагоді і жителю міста, який хоче зробити рух дорогами безпечним для всіх пасажирів.

Автобоксе (рис. 1.10) – це знімний багажник, що закривається, з міцного пластику, який кріпиться на поперечки, встановлені на даху автомобіля.



Рисунок 1.10 – Автобоксе на даху автомобіля

Класифікуються автобокси на відкриті та закриті. Перший варіант призначений для транспортування габаритних вантажів. Він представлений у вигляді піддону із бортами. Закритий тип можна використовувати для перевезення великої кількості невеликих речей. Завдяки кришці вантажі надійно захищені від пилу, опадів.

Автобокси діляться на класи економ, середній та преміальний. Відмінності між ними полягають у функціоналі, якості та довговічності експлуатації. Очевидно, преміальні моделі більше підходять для постійного використання. Вони міцніші, надійніші, привабливіші, краще протистоять різним навантаженням.

Вибір оптимального варіанта багажника залежить від кількох факторів. Принципове значення мають:

- форма та об'єм;
- вантажопідйомність;
- особливості кріплення;
- матеріал та аеродинаміка;
- зручність та рівень безпеки.

За місткістю бокси поділяються на три групи – малі, середні та великі. Об'єм перших становить не більше 300 л, других – до 500 л, третіх – від 501 л. За формою автобокси класифікують на широкі та вузькі, короткі та довгі. Ширина може змінюватись від 0,6-0,75 до 0,8-0,9 м, довжина – від 1,2-1,3 до 1,7-2 м. Висота становить 0,3-0,35 або 0,4-0,45 м. Вибір габаритів індивідуальний, залежить від параметрів вантажів, що перевозяться, і розмірів автомобіля.

Вантажопідйомність залежить від габаритних параметрів. Її розраховують, виходячи з виконання багажника. Армовані моделі здатні витримувати від 70 до 75 кг. Звичайні призначені для навантаження до 55 кг.

Кріплення автобоксів універсальне. Багажники встановлюються на поперечки. Останні можуть мати різні форми. Універсальними є прямокутні конструкції, сумісні з усіма видами боксів.

Сучасні автобокси комплектуються замками, що закриваються на ключі. Клас захисту запірних механізмів визначає рівень безпеки зберігання. Кришка боксу може відкриватися в одну або обидві сторони. Другий тип обійдеться дорожче. Оснащуються багажники різними елементами кріплення вантажів. В



ідеалі повинні бути і капронові ремені, і сітка, що покриває весь внутрішній простір.

Виготовляються автобокси з м'яких та жорстких матеріалів. Перший варіант дешевше, швидко встановлюється та знімається. Його розміри можуть бути регульованими. Жорсткі бокси виготовляють із пластику. Вони міцні, відрізняються облічною формою, що забезпечує хорошу аеродинаміку.

При використанні будь-якого виду багажника необхідно регулярно перевіряти надійність кріплень, дотримуватись швидкісного режиму до 130 км/год, враховувати рекомендації виробника щодо допустимих навантажень.

## 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ АЕРОДИНАМІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Чисельні методи

Для розрахунку аеродинамічних характеристик різних тіл, що погано обтікають, в даний час використовуються кілька моделей перебігу рідини або газу, що описуються рівняннями Нав'є-Стокса з різною точністю наближення. При розгляді обтікання транспортних засобів враховується, що перебіг навколо автомобіля виключно тривимірний, а характерною особливістю є наявність відривних потоків, зумовлених недосконалістю форм. Можливі наступні підходи при теоретичному та чисельному розгляді відповідної картини обтікання:

- використання лінійних рівнянь руху нев'язкої рідини (потенційне обтікання) за певних граничних умов;
- розгляд нелінійних рівнянь руху нев'язкої рідини (рівнянь Гйлера);
- застосування опосередкованих за методом Рейнольдса рівнянь Нав'є-Стокса;
- використання повних рівнянь Нав'є-Стокса.

Перші дві моделі дозволяють розрахувати розподіл тиску, підйомну силу, індуктивний опір. В рамках моделі руху рідини, що описується і рівняннями Нав'є-Стокса, враховується в'язкість, проте облік впливу турбулентності повітряного потоку здійснюється приблизно. Повна система рівнянь Рейнольдса дозволяє розрахувати також відривні нестационарні течії. Більше того, рішення повних рівнянь Нав'є-Стокса, що включають і чисельне моделювання великих енергоутримуючих турбулентних вихорів (напівемпіричні моделі залучаються при цьому тільки для обліку дрібномасштабної турбулентності), робить можливим розрахунок переходу прикордонного шару від ламінарного до турбулентного.

Для чисельного дослідження обтікання тіл нев'язким потоком може застосовуватися метод особливостей або поля.

Ці методи використовуються і при розрахунку обтікання автотранспортних засобів. Наприклад, відомі розрахунки обтікання вантажного автомобіля-фургона, коли поверхня фургона моделювалася розподіленим шаром джерел, а супутнього струменя – шаром диполів. Зауважимо, що в розрахункових моделях потенційної течії можуть бути використані й інші типи особливостей (наприклад, поверхня тіла та супутнього струменя в деяких дослідженнях є розподілом вихрових особливостей). При цьому зазвичай робиться серйозне припущення про те, що положення лінії відриву потоку на поверхні транспортного засобу заздалегідь відомо.

Даний метод дозволяє досить точно визначити підйомну силу та дає високу точність розрахункових величин розподілених тисків у безвідривних зонах обтікання автомобілів. У зонах відривних течій визначення цих характеристик методом особливостей практично неможливо, отже, утруднений і розрахунок повного аеродинамічного опору автотранспортного засобу. У зв'язку з цим цікавить використання моделювання поверхні автомобіля і супутнього струменя. Можливе врахування і прикордонного шару, що дозволяє в цьому випадку визначити положення лінії відриву потоку на поверхні, наприклад, кузова автомобіля. Однак для всіх відомих розрахункових методів властиві недоліки, що знижують точність та можливість використання результатів розрахунків, а саме:

- розподіл тисків у кормовій частині кузова, де спостерігається зрив потоку, не корелюється з експериментальними даними;
- під час постановки задач не враховуються місцеві зриви потоку з подальшим формуванням вихрового сліду;
- всі розрахункові підходи при чисельних розрахунках засновані на панельному поданні форми тіла, яких точність великою мірою залежить від точності математичного відтворення форми тіла (розбиття на панелі, їх розмірів і числа);

- при наближених підходах практично неможливо досить точно розрахувати аеродинамічний опір, тому що не враховується внутрішній опір і втрати в підднищовій зоні автомобіля.

## 2.2. Стендові методи

Стендові методи базуються на використанні аеродинамічної труби. Аеродинамічні установки, що використовуються в даний час для випробувань колісних транспортних засобів, можна розділити три групи: великі (натурні) аеродинамічні труби, малі (модельні) аеродинамічні труби і аерокліматичні труби. У великих трубах проводяться дослідження натурних зразків та великомасштабних макетів автомобілів, автопоїздів, швидкісних автопоїздів. У малих трубах досліджуються їх масштабні моделі, і навіть проводяться фізичні досліди вивчення окремих аеродинамічних явищ. В аерокліматичних трубах поряд з аеродинамічними випробуваннями головним чином визначається вплив кліматичних факторів (вологості, температури та ряду інших) на основні вузли та агрегати проєктованого колісного транспортного засобу.

Слід зазначити, що, як правило, усі найбільші автокомпанії мають на додаток до основної великої аеродинамічної (аерокліматичної) труби малу трубу для випробування масштабних моделей.

Аеродинамічна труба являє собою установку, в якій випробуваний об'єкт – транспортний засіб або його масштабна модель – нерухомий, а рухається з певною швидкістю повітряний потік, що обтікає його, створюваний потужним вентилятором.

Основними елементами аеродинамічної труби є сопло, з якого спливає з певною швидкістю і прямує на об'єкт, що випробовується, повітряний потік; робоча частина (камера випробувань) труби, де розміщується об'єкт випробувань; аеродинамічні ваги, розташовані у зоні робочої частини труби; дифузор, який потрапляє повітряний потік, пройшовши робочу частину труби; вентилятор з руховою установкою, що просмоктує повітря через

аеродинамічну трубу і розганяє його шляхом зміни числа оборотів до певної швидкості, а також система детербулізуючих сіток (хонейкомб), що дозволяє отримати ламінарний потік у робочій частині труби.

За типом аеродинамічного ланцюга (або контуру) труби діляться на відкриті (прямоточні) і замкнуті. У прямоточній трубі атмосферне повітря, що засмоктується, розганяється вентилятором до певної швидкості, проходить через елементи труби і викидається знову в атмосферу. Конструкція такої труби досить проста, але не економічна з погляду енерговитрат. Найбільш поширені труби із замкнутим контуром. У такій трубі повітря, що розганяється вентилятором, рухається замкнутим каналом. В результаті, незважаючи на ускладнення конструкції, енерговитрати при роботі в трубі знижуються, крім того, підвищується якість повітряного потоку, що визначається ступенем його турбулентності. За типом камери випробувань труби бувають трьох типів: із відкритою робочою частиною, із закритою робочою частиною, із закритою поздовжніми щілинами частиною.

Зазвичай колісні транспортні засоби та їх масштабні моделі випробовуються в аеродинамічних трубах при колесах, що не обертаються, а ефект «землі» імітується або підлогою (у великих трубах), або спеціальним плоским екраном (у малих трубах), які нерухомі щодо випробуваного об'єкта. Слід зазначити, що при такій методиці випробувань, коли «земля» нерухома, мають місце помітні неточності в результатах, що одержуються, особливо при визначенні лобового опору і підйомної сили, що діють на випробуваний об'єкт. Тому в даний час деякі зарубіжні автомобільні фірми випробовують нові моделі своїх автомобілів в трубах, що є в невеликій кількості, де «земля» імітується гумовою стрічкою, що біжить, встановленої на спеціальних барабанах. Ведеться інтенсивне проектування і будівництво труб, в яких замість нерухомого екрану використовуються стрічки, що біжать. Застосування екрану у вигляді стрічки, що біжить, дозволяє істотно змінити характер протікання повітряного потоку в піднищовій зоні автотранспортного засобу або його моделі, наблизивши його до наявного в

реальних дорожніх умовах, коли дорога переміщається щодо автомобіля, що рухається по ній.

Одним з основних елементів, що органічно входять в систему аеродинамічної труби, є аеродинамічні ваги. Зазвичай у трубах застосовують 6-компонентні аеродинамічні ваги зі стрічковим підвісом або фланцевим кріпленням моделі. Аеродинамічні труби обладнані додатковими пристроями, що дозволяють повертати об'єкт випробувань у горизонтальній площині та змінювати його кут нахилу щодо центральної поперечної осі для забезпечення можливості випробування об'єкта за різних кутів наїкання та атаки повітряного потоку.

Аеродинамічні труби за швидкістю потоку поділяються:

- на дозвукові, трансзвукові, надзвукові та гіперзвукові;
- за принципом дії – компресорні (безперервної дії), у яких потік повітря створюється спеціальним компресором, та балонні з підвищеним тиском;
- за компонованням контуру – замкнуті та незамкнуті.

Для вимірювання лобової площі автомобіля спроектований стенд фірмою «ISRA Systemtechnik GmbH» та розрахований на об'єкти з висотою та шириною не більше 2,5×2,5 м. На стенді можна проводити вимірювання автомобілів та моделей з площею поперечного перерізу до 4 м<sup>2</sup>. Час виміру трохи більше 30 хв., а точність стенду 0,2%. Промінь гелій-неонового (HeNe) лазери діаметром 250 мм створює практично абсолютно паралельний пучок. Променем сканується по периметру об'єкта. Дані, отримані за об'єктом, обробляються на комп'ютері, і обчислюється лобова площа автомобіля.

Достовірність результатів модельних досліджень в аеродинамічних трубах багато в чому визначається правильним моделюванням, вибором масштабу та якістю виготовлення моделі. При виборі масштабу та проектуванні моделей, призначених для випробувань в аеродинамічній трубі, необхідно враховувати вплив цілого ряду факторів, і в першу чергу таких, як масштабний ефект, вплив забруднення робочої частини аеродинамічної труби на результати випробувань, вплив якості поверхні (хвилястості, шорсткості) на

опір форми при малій початковій турбулентності потоку, техніку та методикау досліджень у даній аеродинамічній трубі, що досягається в ній точність вимірювань.

Вибір масштабу моделей. Для отримання достовірних даних бажано, щоб підготовлена до випробувань модель була можливо більших розмірів, проте при цьому необхідно виключити небажаний вплив меж робочої частини аеродинамічної труби.

Для отримання достовірних результатів при проведенні модельних випробувань слід використовувати моделі з високим рівнем подібності можливо більших розмірів (наскільки дозволяють розміри робочої частини труби) з реальним днищем і імітацією перетікання внутрішніх потоків. Як показує практика, досить великі деталізовані моделі (М 1:7 для магістральних автопоїздів та міжміських автобусів, М 1:4 для легкових автомобілів) дозволяють отримати порівняно достовірні дані за оптимальною з точки зору обтічності та дизайну формою кузовів для подальшого зняття з них розмірів та виготовлення по них великомасштабних (М 1:2) моделей та натурних макетів створюваних автомобілів.

Для візуалізації тривимірного обтікання моделі методом димових струменів, яка виробляється як у звичайних аеродинамічних трубах, так і в спеціальних димових, необхідно мати спеціальний генератор диму. Генератор диму включає ємність з рідким гасом, електродігрівач, бачок з газовими парами, які охолоджуються за допомогою холодного повітря, що нагнітається, і форсунки для подачі диму в трубу.

При візуалізації течії потоку методом використання сітки з набором ворсинок її натягують на спеціальну рамку і розміщують в зоні, що цікавить дослідника, біля моделі: під нею або збоку, по потоку або перпендикулярно йому. За відхиленням ворсинок судять про характер течії потоку поблизу моделі.

Візуалізація течії потоку методом мильних бульбашок здійснюється шляхом вдування їх як своєрідних індикаторів у повітряний потік та

спостереженням за траєкторією їх руху. Для зменшення їх інерційної маси вкрай бажано, щоб питома вага бульбашок, що вдувається, була такою ж або близькою до повітря. З цією метою рекомендується як наповнювачі бульбашок використовувати гелій або інші легкі гази.

Метод візуалізації з використанням серповидних кристалів метал-альдегідних субліматів схожий на попередній, з тією лише різницею, що індикаторами є кристали, що розпоршуються в потоці.

### **2.3. Дорожні методи**

Контрольно-довідкові дорожні випробування натурного прототипу проєктованого автотранспортного засобу проводяться для встановлення відповідності його аеродинамічних властивостей тим, які сформульовані в технічному завданні на проєктування. Ця відповідність виявляється або прямим шляхом, наприклад визначенням найважливішого з аеродинамічних коефіцієнтів  $C_x$ , величина якого суттєво впливає на витрату палива, швидкість та продуктивність транспортного засобу, або непрямим - оцінкою показників його керованості та стійкості, у тому числі курсової; безпеки, зокрема екологічної; забруднення та рівня аеродинамічного шуму.

Дорожні випробування проводяться за умов автополігону на дорогах з асфальтобетонним покриттям. Методи дорожніх випробувань відповідають поставленій меті. Для визначення коефіцієнта  $C_x$  широко використовують метод вибігу. При цьому обов'язковою умовою проведення дорожніх аеродинамічних випробувань є відсутність бокового та зустрічного вітру (якщо він є, швидкість його не повинна перевищувати 1-2 м/с), тому вони проводяться у вечірній чи нічний час. Дорожнє покриття має бути сухим.

Визначення витрати палива, швидкісних властивостей, стійкості та керованості проводиться за встановленими відповідними стандартами, методиками та програмами випробувань.

Визначення ступеня забрудненості та рівня аеродинамічного шуму також здійснюється за відповідними методиками. Зокрема, оцінка



забрудненості може проводитися за методикою визначення забруднення магістрального автопоїзда. Оцінка досягнутого рівня зовнішнього та внутрішнього аеродинамічного шуму спроектованого транспортного засобу проводиться за спеціальними методиками.

Основною перевагою дорожніх методів дослідження є отримання даних безпосередньо для зразків натурних автотранспортних засобів. Однак під час їх проведення виникають певні труднощі, пов'язані з відділенням аеродинамічного опору від втрат у трансмісії та опору коченню.

Для виділення втрат у трансмісії із загального потужнісного балансу автомобіля використовуються різні прийоми: втрати у трансмісії визначаються на барабанних стендах або за параметрами обертання трансмісії за інерцією з вивішеними колесами; під час проведення експерименту трансмісія відключається; нарешті, втрати з трансмісії враховуються шляхом введення у вихідні розрахункові вирази емпіричних формул.

Для обліку втрат на кочення вводиться припущення у тому, що опір коченню шин залежить від швидкості. Втрати на кочення визначаються на барабанних стендах та плоскій дорозі, підраховуються за емпіричними формулами.

Якщо втрати в трансмісії, зрештою, можна визначити окремо і відняти від сумарного опору руху транспортного засобу або відключити трансмісію, то відомі раніше методи не дозволяли зробити це щодо пневматичних шин. У цьому був розроблений ряд способів визначення аеродинамічного опору транспортних засобів у так званому чистому вигляді.

#### **2.4. Методи комп'ютерного моделювання**

Розглянемо сучасні системи автоматизованого проектування, які дозволяють проводити аеродинамічні дослідження.

Програмний комплекс *FlowVision* призначений для віртуального продування різних об'єктів з метою дослідження їхньої аеродинаміки. Підтримуються різні швидкості потоку, що набігає, а також завдання ступеня

турбулентності, аналізується у роботі. Моделювання відбувається в тривимірній постановці, згідно з принципом «як є», тобто існує можливість дослідження повної геометричної моделі без спрощень. При цьому користувач може вибрати ступінь деталізації модельованого об'єкта, забезпечуючи, при необхідності, розумний компроміс між точністю та часом обчислень. В основі математичного алгоритму, що використовується в *FlowVision*, лежить закон збереження мас і теореми Остроградського Гауса, тобто знаходження середнього значення в об'єкті на основі даних на кордонах.

Отримання більш точного рішення забезпечується за рахунок розбиття розрахункового об'єкту на осередки меншого розміру. У *FlowVision* для побудови сітки використовуються комірки у вигляді прямокутних паралелепіпедів.

*FlowVision* дозволяє моделювати рухомі тіла, надаючи їм поступального або обертового руху, комбінуючи такі способи: визначення швидкості руху тіла; визначення сили, що діє на тіло; вплив середовища на тіло. Програмний комплекс *FlowVision* дозволяє моделювати використання паралельні обчислення в автоматичному режимі, при цьому від користувача потрібно лише вказати кількість ядер. Розбиття області між процесорами та обмін даними алгоритм виконує самостійно.

Сімейство програм *ANSYS* включає програми для розрахунку міцності, довговічності, динаміки рідини, газу та твердих тіл, а також міждисциплінарний аналіз.

Програмний комплекс *ANSYS/CFX* – це потужний інструмент, призначений для оптимізації розробки конструкцій, з урахуванням динаміки рідини та газу. Адаптивна архітектура дозволяє виконувати різні дії, такі як аналіз перебігу рідини та взаємодії складних структур. Для побудови сітки використовується компонент *ANSYS Meshing*, який надає безліч різних технологій побудови сітки. Користувач також має можливість редагувати сітку та будувати структуровану гексагональну сітку. Ядром модуля *ANSYS CFX* є сучасний алгебраїчний багатосітковий парний вирішувач, в основі якого

лежить технологія *Coupled Algebraic Multigrid*, яка дозволяє отримати точні результати за короткий час. Підтримується можливість коригування граничних умов та параметрів вирішувача під час виконання розрахунку без необхідності зупиняти вирішувач. У *ANSYS CFX* застосовується схема дискретизації другого порядку точності за умовчанням, що забезпечує прийнятну похибку. Використання технології сполучених вирішувачів *ANSYS CFX* дає значні переваги при проведенні будь-якого розрахунку, неважливо, для машин, що обертаються, багатофазних потоків, горіння або для будь-якої іншої фізичної моделі і дозволяє отримати стійкі та масштабовані рішення для задач динаміки рідин та газів. Розв'язувач *ANSYS CFX* розроблявся з урахуванням вимог ефективності при паралельних розрахунках. Це стало особливо актуально, зважаючи на поширення багатоядерних процесорів та кластерів. При цьому *ANSYS CFX* має масштабованість, дозволяючи ефективно використовувати доступні процесорні ядра та оперативну пам'ять. Точність розрахунків також сильно залежить від вибору адекватної фізичної. Модуль *ANSYS CFX* містить велику кількість фізичних моделей. При цьому забезпечується взаємодія між фізичними моделями з різними типами елементів і з'єднань сіткових інтерфейсів, що дозволяє виконувати складні міждисциплінарні розрахунки. *ANSYS* підтримує такі моделі як турбулентність, машини, що обертаються, багатофазні потоки, теплообмін і радіаційний обмін, горіння, рідкоконструкційна взаємодія, сітка, що рухається, і занурені в рідині тверді тіла.

Як показано в роботі [3] *STAR-CCM+* є одним із найсучасніших програмних комплексів, розроблених на вирішення завдань механіки суцільних середовищ. *STAR-CCM+* використовує такі як вирішувачі, як пов'язаний (*coupled solver*) та розподілений (*segregated solver*). Особливостями *STAR-CCM+* є: засоби роботи з сітками: відновлення цілісності поверхні (*surface wrapping*), створення сіток різної конфігурації з багатогранних осередків, зокрема довільні. Використання цих коштів суттєво скорочує час розв'язання задачі; підтримка великої кількості фізичних моделей: як

турбулентні, так і ламінарні течії, ньютонівські та неньютонівські рідини, багатофазні середовища, випромінювання, горіння, розвиток прикордонного шару, кавітація, надзвукові течії, сполучений теплообмін інші; засоби візуалізації: користувач може бачити результати в процесі розрахунку та змінювати параметри; надійність результатів; стійкий вирішувач *STAR-CCM+* працює без аварійних зупинок; моделі сумісні з програмними продуктами: *STAR-CD*, *ICEM*, *GridGen*, *Gambi*; масштабованість паралельних обчислень: дозволяє використовувати моделі, що складаються з 1 млрд. і більше осередків; розв'язання задач міцності (спільно з газодинамікою); засоби побудови сіток *STAR-CCM+* включають у собі ряд алгоритмів, таких як: відновлення цілісності поверхні (*Surface Wrapper*): дозволяє автоматично виправляти складні *CAD*-моделі, що дозволяє отримувати замкнуту поверхню при кожному використанні; засоби перебудови поверхневої сітки (*Surface Remeshing*): перебудовує імпортовану сітку для отримання поверхневої сітки, оптимізованої для проведення розрахунків. Є можливість побудувати на її основі об'ємну сітку із багатогранних осередків; засоби побудови сіток їх багатогранних осередків (*Polyhedral Meshing*): підвищує точність обчислень моделей зі складною геометрією; технологія «усічених» осередків (*trimmed cells*): підвищує надійність роботи з багатогранними осередками, уникаючи помилок зв'язності та (*couple errors*) «поганих» осередків (*unresolved cells*); побудови сіток різної конфігурації для різних частин моделі (*Multi-region meshing*): такі можливості дозволяють будувати розрахункові сітки для вирішення завдань сполученого теплообміну, моделювання пористих середовищ, а також механізмів, що обертаються; «конвєсна» методика (*pipeline methodology*): ефективна пір наявності декількох конфігурацій моделі.

Дозволяє підбирати різний ступінь та місця згущення, форму сітки, а також повністю перебудувати її.

Також можливе відображення результатів на нову сітку для отримання початкових умов для більш швидкої збіжності; оптимізація побудови сіток під вирішувач (*Solver-optimized meshing*): алгоритми розробки вирішувача та

побудова сіток перебувають у тісному взаємозв'язку, покращуючи точність обчислень.

Таким чином, як було сказано вище, під час проведення експериментів моделювання аеродинаміки автомобіля використовуються сучасні програмні комплекси, призначені для віртуального продування різних об'єктів з метою дослідження їхньої аеродинаміки; дозволяє моделювати рухомі тіла, надаючи їм поступальний чи обертальний рух; використовувати паралельні обчислення в автоматичному режимі. Також, вони призначені для оптимізації розробки конструкцій, з урахуванням динаміки рідини та газу, що включають комплекси розроблені для вирішення завдань механіки суцільних середовищ.

На даний момент існує велика кількість програм для дослідження коефіцієнта опору автомобіля. Від потужних *ANSYS*, так і універсальних *FlowVision*, *FlowWorks* та ін.

Враховуючи те, що Львівський національний університет природокористування є ліцензійним користувачем програмного комплексу *SolidWorks*, для нашого дослідження ми пропонуємо використовувати програмний модуль *SolidWorks FlowSimulation* за такою методикою:

1. Створення комп'ютерної моделі у системі твердотілого/поверхневого моделювання *SolidWorks*.
2. Створення нового проекту в модулі *FlowSimulation*;
3. Задання початкових умов та інших параметрів моделювання;
4. Створення розрахункової сітки;
5. Запуск розрахунку;
6. Аналіз отриманих результатів.

### 3. ПРОЄКТУВАННЯ МОДЕЛІ АВТОМОБІЛЯ В СЕРЕДОВИЩІ *SOLIDWORKS*

#### 3.1. Створення видових ескізів автомобіля

Створення тривимірного об'єкта починається з вибору майбутнього ескізу моделі в 4 видах (спереду, праворуч, ззаду, зверху) з хорошою чіткістю ліній, оскільки це відіб'ється на якості та зручності роботи. В основному види моделі розташовуються на одному аркуші, нам необхідно їх розділити на окремі графічні файли. Якщо модель симетрична, необхідно провести вісь симетрії на видах: спереду, ззаду та зверху.

Видові зображення для ескізів створюють, виходячи з геометричних параметрів автомобіля, модель якого проєктують. Геометричні параметри автомобіля *Mitsubishi Lancer* подано на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Геометричні параметри автомобіля *Mitsubishi Lancer*

Для створення ескізу виду спереду вибираємо площину «Спереду» та розташовуємо на ній графічне зображення виду спереду автомобіля. Вид зверху створюємо на площині «Зверху», вид збоку – на площині «Збоку», а вид

ззаду – на додатковій площині, яка є паралельною до площини «Спереду» та віддалена від неї на відстані габаритної довжини автомобіля. У результаті отримуємо видове компонування, як показано на рис. 3.2.

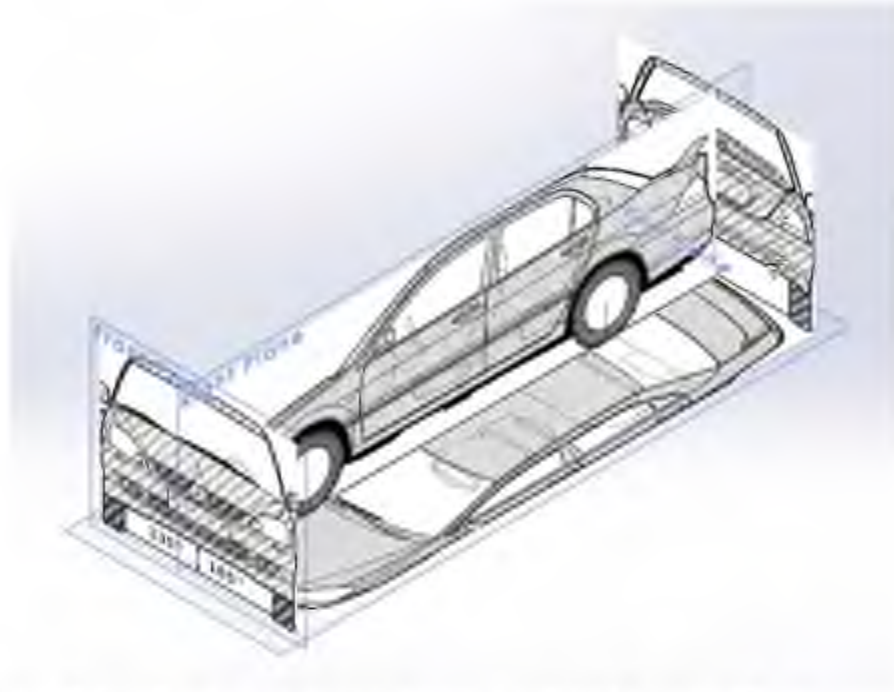


Рисунок 3.2 – Видове компонування моделі автомобіля

При цьому слід дотримуватися симетричності розташування зображень на площинах та масштабу зображення, – щоб розмір габаритів автомобіля на зображеннях відповідав натуральній величині габаритів реального автомобіля.

### **3.2. Проектування елементів моделі кузова автомобіля методом поверхневого моделювання**

Поверхня – це сукупність усіх послідовних положень деякого ескізу, що переміщається у просторі за певним законом. Цей певний закон називається утворюючим. Лінія, вздовж якої переміщується ескіз, називається напрямною. Такий спосіб називається методом поверхневого моделювання. Поверхня репрезентує собою оболонку з нульовою товщиною. Головною перевагою даного способу є його сумісність з елементами, отриманими методом твердотілого моделювання.

Одним із основних елементів тривимірного моделювання є *3D*-ескіз та *3D*-сплайн, і в даній кваліфікаційній роботі в основному вони й будуть використовуватися.

Враховуючи те, що модель автомобіля є симетричною відносно поздовжньої осі, достатньо створити половину моделі автомобіля, а іншу – віддзеркалити відносно осі симетрії.

Для задання кривих ескізу та напрямних можна використовувати інструменти ескізу. В основному це інструмент кривої лінії по точках (сплайн).

Викресливши з використанням видових зображень низку *3D*-ескізів, отримуємо своєрідну «сіткову» модель елементів кузова автомобіля зі сплайнів (рис. 3.3).

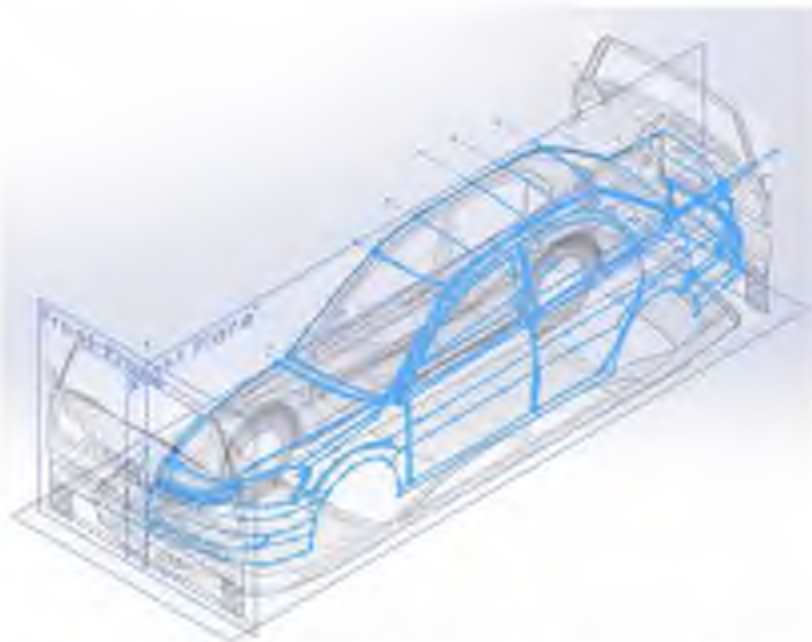


Рисунок 3.3 – Сплайни для моделювання поверхонь кузова

Під час побудови поверхонь одні сплайни будуть використані в якості одного контуру, інші – в якості другого контуру поверхні.

Так, при створенні поверхні кришки багажного відділення дві криві (рожевий колір, рис. 3.4) слугують першим контуром, а інші дві (синій колір, рис. 3.4) – другим контуром поверхні.



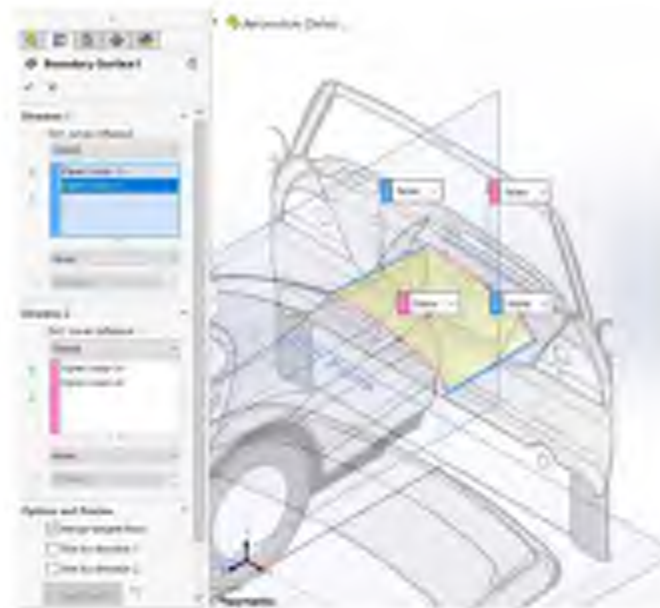


Рисунок 3.4 – Побудова поверхні кришки багажного відділення

Аналогічно створено й інші поверхні кузова автомобіля, як показано на рис. 3.5.

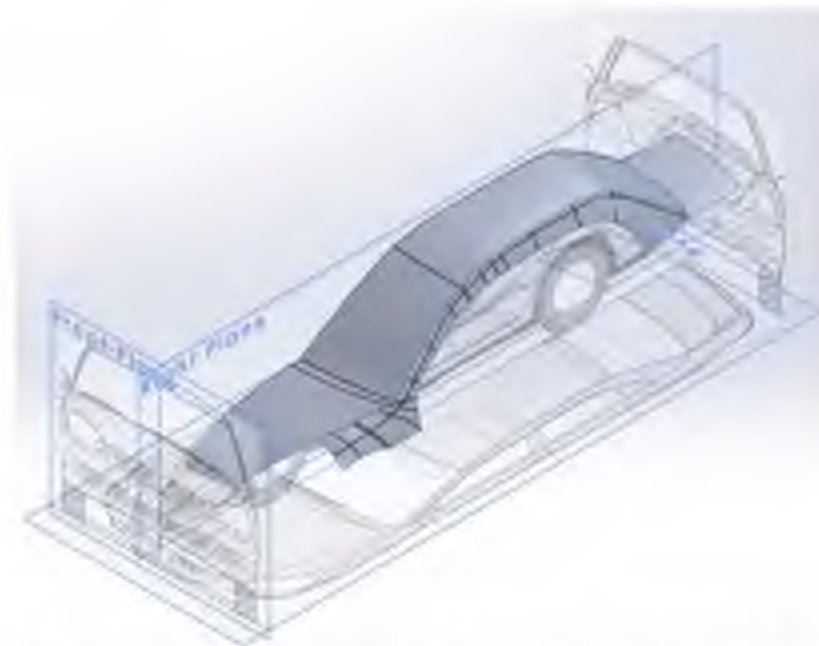


Рисунок 3.5 – Побудова окремих поверхонь елементів кузова автомобіля

Після створення декількох поверхонь об'єднуємо їх в одну поверхню за допомогою інструменту «Зшити поверхні», задавши параметри допуску. Отримуємо зшити поверхню, як показано на рис. 3.6.

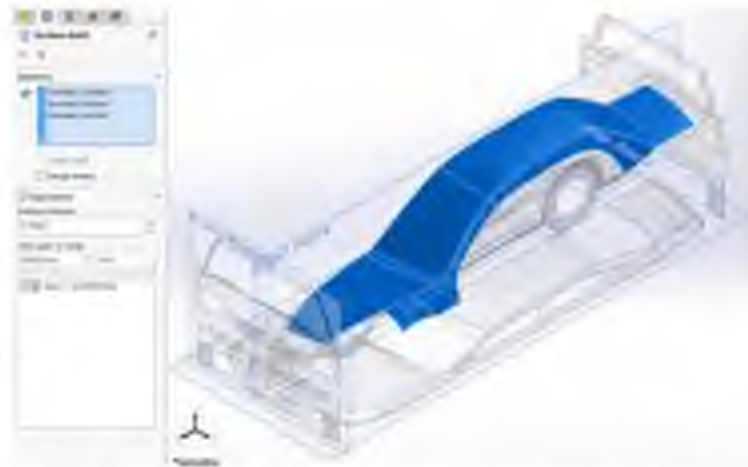


Рисунок 3.6 – Зшивання поверхонь кузова автомобіля

Створивши поверхні кузова автомобіля та зшивши їх, віддзеркалюємо поверхні відносно площини симетрії автомобіля. Одержуємо симетричну поверхневу модель (рис. 3.7).

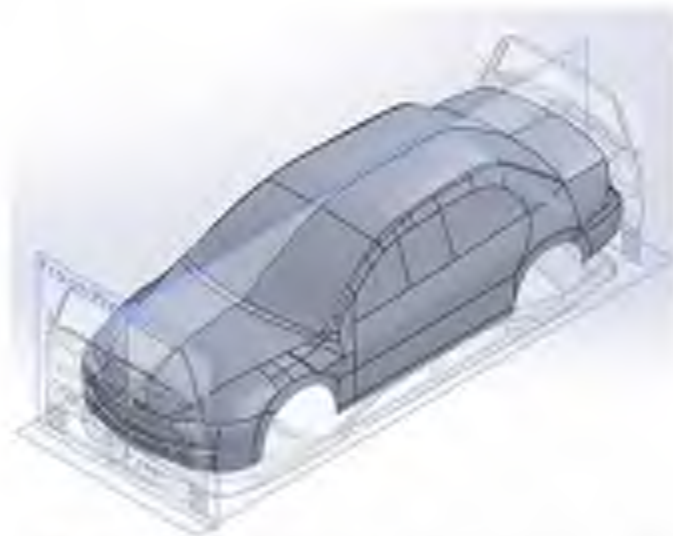


Рисунок 3.7 – Віддзеркалена поверхнева модель

Після завершення проєктування всіх необхідних поверхонь з наступним їх зшиванням, поверхневу модель перетворюємо у твердотілу, вибравши у менеджері властивостей параметр «Створити тверде тіло» (рис. 3.8).

Колеса та дзеркала моделі автомобіля створено методом твердотілого моделювання.

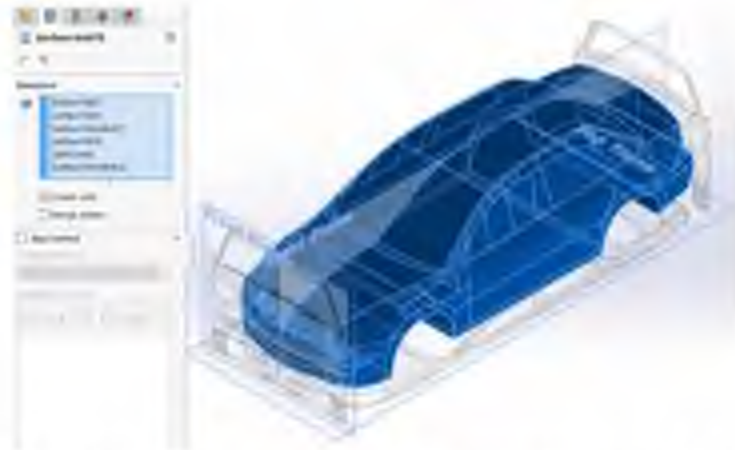


Рисунок 3.8 – Створення твердотілої моделі автомобіля

### 3.3. Проектування коліс автомобіля методом твердотілого моделювання

При створенні тривимірного диска колеса нам знадобляться першоджерела, або креслення, ескіз, фотографія.

Під час проектування моделі колеса використано інструменти твердотілого моделювання – «Видавлювання», «Обертання», «Круговий масив». Для скруглень елементів моделі колеса застосовано інструмент «Скруглення». Основні етапи проектування моделі колеса представлено на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Основні етапи проектування моделі колеса

Якщо колесо створено методом твердотілого моделювання в окремому файлі, то дзеркала автомобіля інструментами твердотілого моделювання виконано безпосередньо у файлі моделі кузова автомобіля.

### 3.4. Створення складаної одиниці «кузов-колеса»

Для створення збірки необхідно вибрати вкладку «Файл»-«Новий документ»-«Збірка». У збірці необхідно вставити елементи, для цього натискаємо «Вставити компоненти». Додаємо перший елемент – кузов автомобіля, початок координат якого суміщаємо з початком координат збірки.

Кожен елемент у збірці певним чином повинен бути заданий, в даному випадку за допомогою «Умов спряження». Для визначення місця встановлення колеса необхідно задати концентричність між центральним отвором у колесі та виступом на кузові автомобіля. Потім необхідно задати «Співпадіння» між торцем місця кріплення на кузові та поверхнею примикання на колесі. Після цього – повторити вищеперелічені дії для встановлення всіх коліс у місця кріплення (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Кузов автомобіля з колесами в зборі

### 3.5. Проектування додатково встановлених кузовних елементів

Для створення спойлера автомобіля створимо нову конфігурацію моделі кузова (рис. 3.11).

В режимі цієї конфігурації різних площинах створимо три профілі у формі чотирикутників і дві криві лінії, які проходять через вершини цих чотирикутників. З використанням інструменту «Видавлювання по перерізах» виконаємо тривимірну модель спойлера. При цьому чотирикутники використовуємо в якості профілів, в дві криві – як напрямні. Відповідні ескізи

потрібно вказати у полях менеджера властивостей команди «Видавлювання по перерізах» (рис. 3.12).



Рисунок 3.11 – Створення другої конфігурації кузова автомобіля

Після цього гострі кромки скруглюємо за допомогою інструменту «Скруглення» та отримуємо кінцеву модель спойлера (рис. 3.13).



Рисунок 3.12 – Проектування спойлера



Рисунок 3.13 – Модель спойлера на кузові автомобіля

Для створення моделі антикрила на кузові автомобіля створимо ще одну конфігурацію (рис. 3.14) та погасимо спойлер для першої та третьої конфігурації (рис. 3.15).



Рисунок 3.14 – Створення третьої конфігурації кузова автомобіля



Рисунок 3.15 – Погашення операцій в конфігураціях

За допомогою команд твердотілого моделювання виконаємо ліву стійку та половину полиці антикрила (рис. 3.16). Віддзеркаливши елементи відносно повздовжньої площини та скругливши гострі кромки, одержимо модель антикрила, як показано на рис. 3.17.

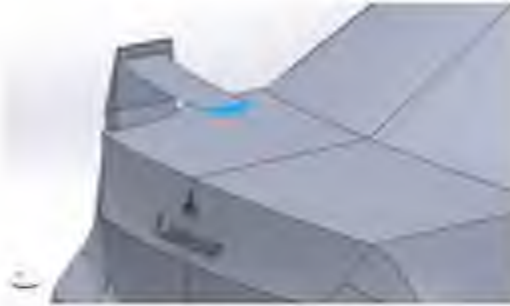


Рисунок 3.16 – Модель стійки на полиці антикрила автомобіля



Рисунок 3.17 – Модель антикрила

Таким чином, файл моделі кузова автомобіля містить три конфігурації: перша – сам автомобіль, друга – автомобіль зі спойлером, третя – автомобіль з антикрилом.

Моделі багажника та автобокса виконано в окремих файлах моделі. Багажник являє собою дві пари кронштейнів, що кріпляться на даху автомобіля, та дві поперечні труби квадратного профілю 30×30 мм (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Модель багажника



Рисунок 3.19 – Модель автобокса

Автобокс в залежності від складності геометричної форми можна проектувати засобами поверхневого або твердотілого моделювання. Автобокс у нашому випадку не надто складної форми, тому його модель виконано

інструментами твердотілого моделювання (рис. 3.19). Багажник та автобокс додаємо до збірки в окрему попередньо створену конфігурацію.

В результаті виконання моделей та створення збірки з конфігураціями, одержано п'ять різних варіантів поєднання кузова з кузовними елементами: автомобіль, автомобіль зі спойлером, автомобіль з антикрилом, автомобіль з багажником та автомобіль з автобоксом (рис. 3.20).



*Модель автомобіля*



*Модель автомобіля зі спойлером*



*Модель автомобіля з антикрилом*



*Модель автомобіля з багажником*



*Модель автомобіля з автобоксом*

Рисунок 3.20 – Варіанти поєднання кузова автомобіля з кузовними елементами

Над усіма вищенаведеними варіантами поєднання моделі автомобіля з кузовними елементами буде проведено аеродинамічні дослідження.

## 4. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В *SOLIDWORKS FLOW SIMULATION*

### 4.1. Визначення лобової площі автомобіля

Одним з найважливіших показників аеродинамічних характеристик транспортних засобів є коефіцієнт лобового опору  $C_x$ , який визначимо за формулою:

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

де  $F_d$  – сила лобового опору, Н;

$\rho_n$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

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

$V$  – швидкість руху моделі автомобіля, м/с.

Для розрахунку коефіцієнта лобового опору необхідно визначити лобову площу автомобіля та силу лобового опору.

Лобову площу автомобіля визначимо у середовищі *CAD*-системи *SOLIDWORKS*. Для цього на площині спереду (рис. 4.1, *a*) потрібно створити ескіз контуру моделі автомобіля. Скористаємось інструментом «Проеціювання елементів», а за необхідності ще й інструментами «Сплайн», «Відрізок» тощо з панелі інструментів ескізу (рис. 4.1, *б*).



*a)*



*б)*

Рисунок 4.1 – Створення на площині «Спереду» ескізу контура автомобіля

За допомогою інструмента «Властивості перерізу» визначимо площу всередині контуру ескізу.



## 4.2. Аеродинамічне дослідження моделі автомобіля в програмному комплексі *SOLIDWORKS Flow Simulation*

*SOLIDWORKS Flow Simulation* є вбудованою підпрограмою *SOLIDWORKS*, яка дозволяє розраховувати методом скінченних елементів фізичні характеристики різних потоків (від потоків повітря до потоків теплових, радіаційних та рідинних), а також вплив різноманітних потоків на тверді тіла.

Додаток *Flow Simulation* необхідно завантажити, для цього вибираємо вкладку «Додатки *SolidWorks*» і в панелі, що розкрилася, вибираємо *SolidWorks Flow Simulation* (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Додатки *SolidWorks*

Після цих дій з'явиться нова вкладка *Flow Simulation*. Далі необхідно перейти в цю вкладку та створити проект, натиснувши на кнопку «Майстер проекту» (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Створення нового проекту

У цьому вікні необхідно задати ім'я проекту, вибрати конфігурацію та натиснути кнопку «Далі». У наступному вікні «Система одиниць вимірювань» необхідно вибрати потрібну систему вимірювання або створити нову (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Система одиниць виміру.

Після натискання кнопки «Далі» з'являється вікно «Тип задачі»: «Внутрішня» – для розрахунку замкнутих просторів та «Зовнішня» – для розрахунку відкритих просторів. В даному випадку вибираємо «Зовнішня».

Також виключаємо внутрішній простір та порожнини, де перебіг потоку не передбачається. Вибираємо фізичну модель задачі. В разі симуляції продувок в аеродинамічній трубі даний тип відноситься до «Нестационарних». У списку «Нестационарність», що розкрився вибирається загальний час задачі. У цьому вікні вибирається базова вісь, вздовж якої буде здійснюватися продування потоку. У нашому випадку – це вісь  $Z$  та натискаємо кнопку «Далі» (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Вибір типу задачі

У наступному вікні «Поточне середовище» потрібно вибрати з чого буде складатися потік та характеристику течії потоку. У даному випадку, у списку

«Гази», вибираємо «Air» (повітря), а характеристика течії потоку вибираємо «Ламінарне і турбулентне» (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Вибір середовища

Завершальним діалоговим вікном є «Початкові умови», тут можна задати параметри середовища, а саме тиск, температуру та швидкість потоку (рис. 4.7).

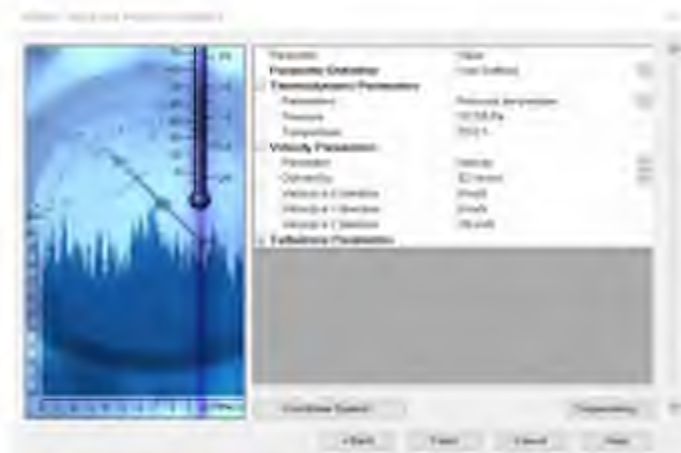


Рисунок 4.7 – Задання початкових умов

Початковими умовами в дослідженні аеродинаміки є:

- атмосферний тиск – 101325 Па;
- температура повітря – 293,2 К (20 С°);
- щільність повітря – 1,21 кг/м<sup>3</sup>;

- швидкість руху автомобіля – 25 м/с (90 км/год).

Після натискання на кнопку «Завершити» проявляється розрахункова область навколо тривимірної моделі. Розмір розрахункової області можна редагувати і від цього залежатиме час розрахунку (рис. 4.9).

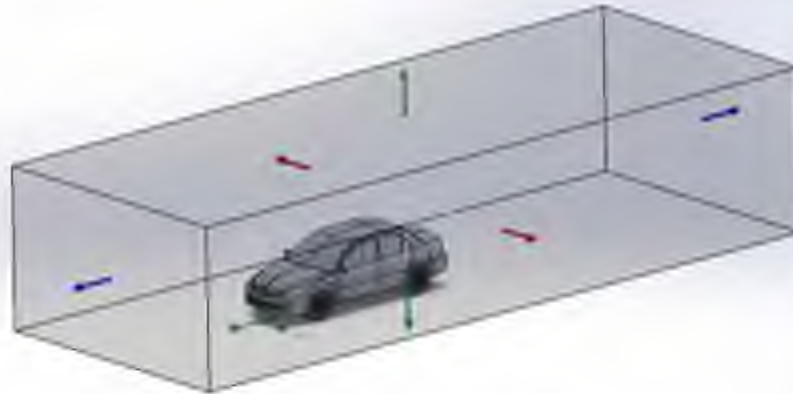


Рисунок 4.9 – Задання області дослідження

Після задання розрахункової області необхідно задати цілі проекту. Для цього натискаємо правою кнопкою мишки на «Цілі» і вибираємо «Додати глобальні цілі».

У нашому випадку це буде сила лобового опору (*Force (Z)*) та притискна сила (*Force (Y)*).



Рисунок 4.10 – Список глобальних цілей.

Наступним етапом необхідно вибрати роздільну здатність сітки (рис. 4.11). Для цього вибираємо «Сітка», «Глобальна сітка», «Змінити базову сітку», тут вибираємо щільність сітки «4».



Рисунок 4.11 – Налаштування щільності сітки

Щільність впливає як на час розрахунку так і на точність результатів. Після перелічених операцій проект готовий до розрахунку.

Для запуску розрахунку натискаємо кнопку «Запустити» (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Запуск розрахунку.

Після запуску з'являється вікно з поточним станом розрахунку, якому відображено загальні дані. Про закінчення розрахунку свідчить напис «Розрахунок завершено» у рядку «Статус» після цього повідомлення вікно потрібно закрити.

## 5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ АЕРОДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1. Результати визначення лобової площі

Лобову площу автомобіля визначено за допомогою інструменту «Властивості перерізу» як площу ескізу, отриманого в результаті проєціювання контуру автомобіля на площину, перпендикулярну повздовжній осі автомобіля. Так, лобова площа автомобіля *Mitsubishi Lancer* становить  $1,98 \text{ м}^2$  (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – визначення лобової площі автомобіля *Mitsubishi Lancer*

Встановлення спойлера чи антикрила на лобову площу автомобіля не впливають, оскільки не виступають за габарити транспортного засобу по ширині та висоті.

Лобова площа автомобіля з багажником у формі квадратної труби з перерізом  $30 \times 30 \text{ мм}$  становить  $2,01 \text{ м}^2$  (рис. 5.2), а з багажником і автобоксом –  $2,24 \text{ м}^2$  (рис. 5.3).

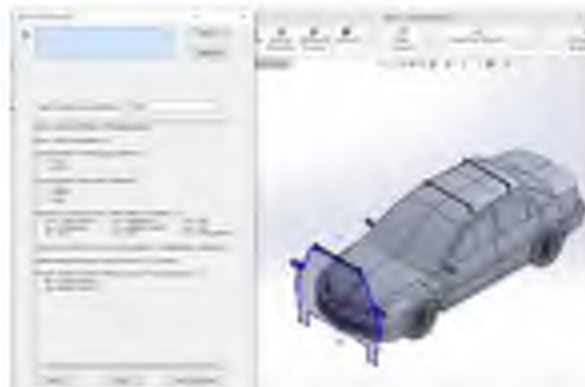


Рисунок 5.2 – Визначення лобової площі автомобіля з багажником

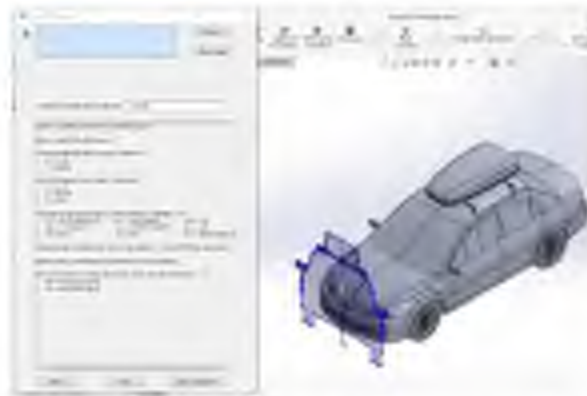


Рисунок 5.3 – Визначення лобової площі автомобіля з автобоксом

Визначені таким чином значення лобової площі за умови різних варіантів встановлення кузовних елементів можна підставити у формулу для визначення коефіцієнта лобового опору  $C_x$ .

## 5.2. Результати визначення сили лобового опору та притискної сили

Для розрахунку значень сили лобового опору  $F_x$  та притискної сили  $F_{пр}$  необхідно у вікні дослідження розкрити папку «Результати» та, натиснувши правою кнопкою миші на «Цілі», відкрити результати. Так під час руху автомобіля *Mitsubishi Lancer* зі швидкістю 90 км/год виникає сила лобового опору  $F_x=246,83$  Н а значення притискної сили становить  $F_{пр}=235,44$  Н (рис. 5.4).



Рисунок 5.4 – Визначення сили лобового опору та притискної сили, що діють на автомобіль *Mitsubishi Lancer*

Решту результатів з визначення сили лобового опору та притискної сили при використанні різних кузовних елементів наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати визначення сили лобового опору та притискної сили

Варіант автомобіля	Сила лобового опору $F_{л}$ , Н	Притискна сила $F_{пр}$ , Н
Автомобіль	246,83	235,44
Автомобіль зі спойлером	245,85	217,85
Автомобіль з антикрилом	247,79	221,46
Автомобіля з багажником	293,72	105,77
Автомобіль з автобоксом	330,98	196,6

Як бачимо з табл. 5.1, максимальне значення сили лобового опору маємо за умови використання автобокса. Використання спойлера, що встановлений на кришці багажного відсіку, дещо зменшує силу лобового опору повітря, що позитивно впливає на аеродинаміку автомобіля, однак і трохи зменшує притискну силу, що пов'язано зі зміною руху повітряних потоків поверхнею спойлера (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Результати визначення сили лобового опору

Значення притискної сили досягає максимального значення за умови повної відсутності будь-яких додатково встановлених кузовних елементів. Це



підтверджує загально відому тезу про те, що кузов типу «седан» має досить непогані показники за притискною силою (рис. 5.6).

Як показують результати аеродинамічного аналізу, антикрило в даному автомобілі не створює додаткової притискної сили, а навпаки – зменшує її, хоча й незначно. У зв'язку з цим нами було змодельовано рух автомобіля з антикрилом на швидкості 50, 75, 90, 105, 120, 135 км/год. Результати розрахунку сили лобового опору та притискної сили в залежності від швидкості руху автомобіля з антикрилом наведено на рис. 5.5.



Рисунок 5.6 – Результати визначення сили лобового опору

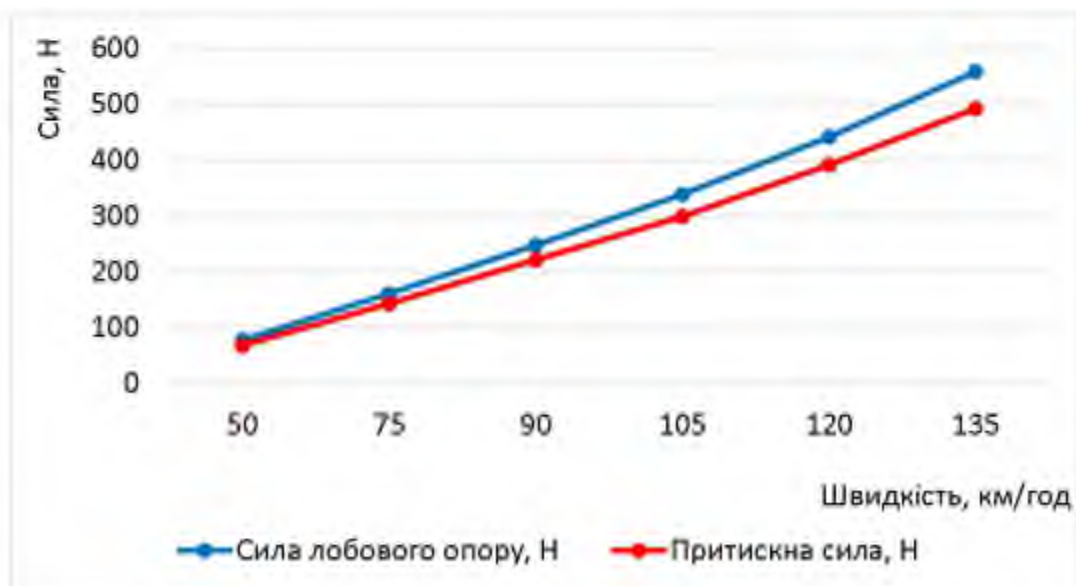


Рисунок 5.7 – Залежність сили лобового опору та притискної сили від швидкості руху автомобіля з антикрилом

Як бачимо з рис. 5.7, притискна сила, як і сила лобового опору, зростає майже лінійно зі збільшенням швидкості руху. Тому можна зробити висновок, що в діапазоні швидкостей від 50 до 135 км/год встановлення антикрила на автомобілі *Mitsubishi Lancer* не забезпечить збільшення притискної сили на кузов автомобіля у порівнянні з рухом транспортного засобу без антикрила. Припускаємо, що відсутність збільшення притискної сили зумовлене встановленням антикрила на неправильній висоті. Висоту необхідно було б збільшити для досягнення бажаного ефекту.

### 5.3. Аналіз результатів руху повітряних потоків

В процесі моделювання руху автомобіля за різних варіантів встановлення на ньому додаткових кузовних елементів одержано траєкторії руху повітряних потоків навколо кузова транспортного засобу. Їх візуалізацію представлено на рис. 5.8.

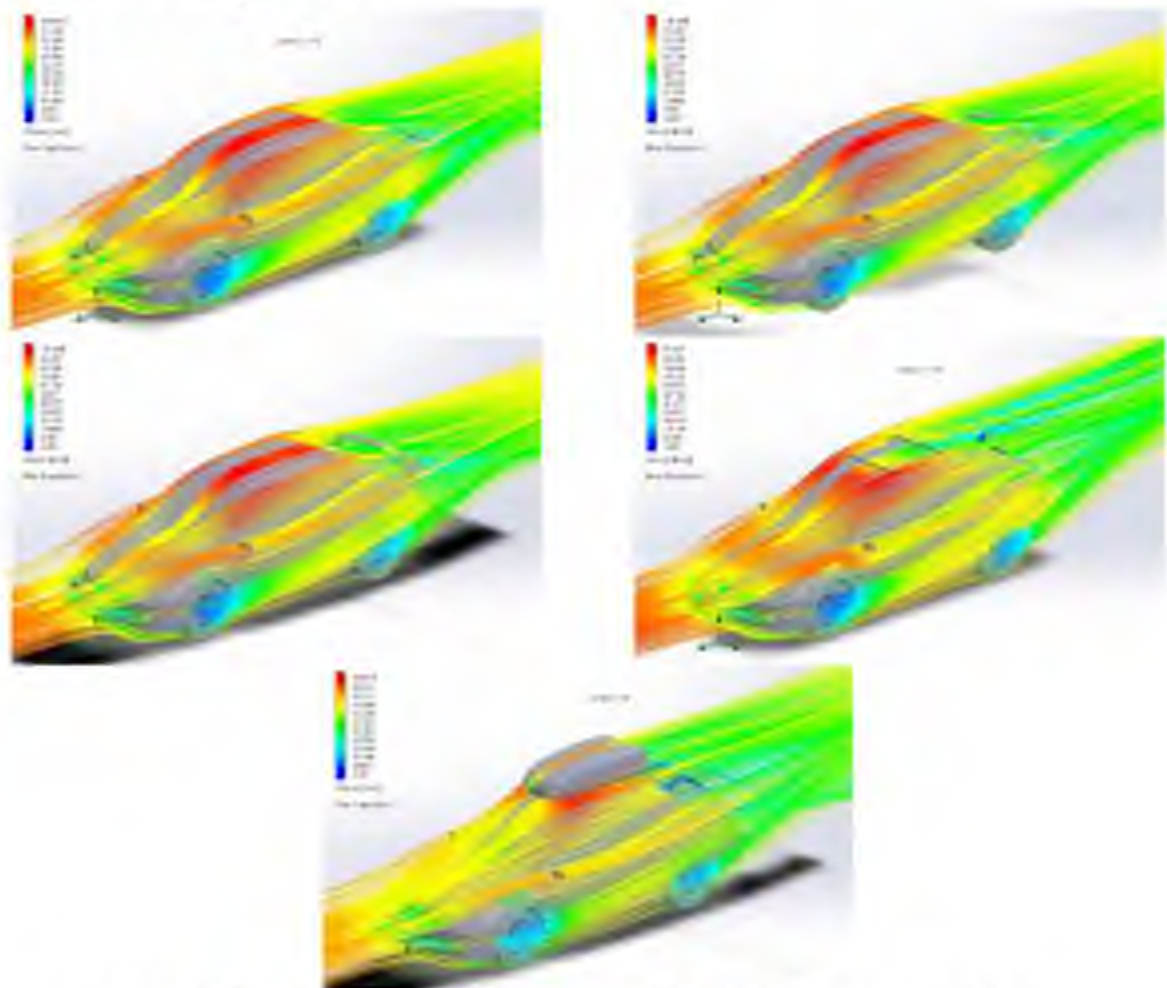


Рисунок 5.8 – Візуалізація траєкторій повітряних потоків

Як видно з рис. 5.8, додатково встановлені елементи не лише змінюють траєкторії руху повітря, яке обтікає кузов автомобіля, але й змінюють швидкість повітряних потоків, як показано на рис. 5.9.

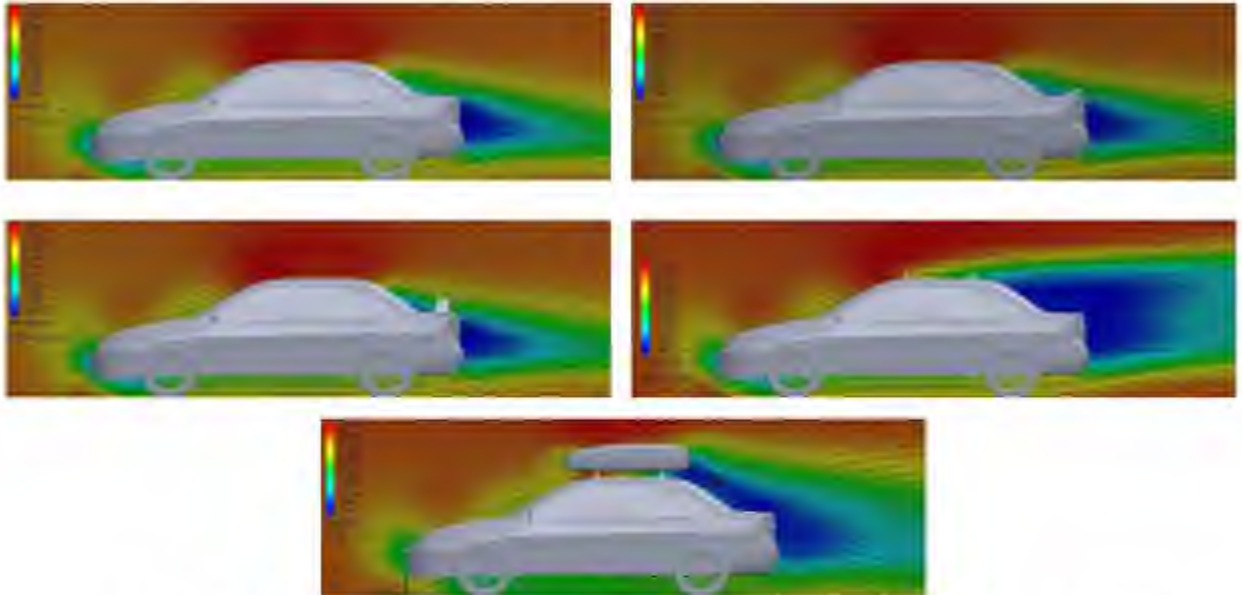


Рисунок 5.9 – Діаграма розподілу швидкостей у площині «Справа»

Аналізуючи розподіл швидкостей, можна зробити висновок про те, що встановлення спойлера чи антикрила створює зону розрідження та завихрень позаду заднього вікна над кришкою багажного відділення (рис. 5.10). В той час, як в автомобіля без додагово встановлених кузовних елементів такі завихрення відсутні. Цим і пояснюється зменшення притискової сили при використанні спойлера чи встановленням антикрила на неправильній висоті. Найбільш негативно на обтікання повітрям кузова автомобіля, зокрема його задньої частини, впливає встановлення багажника на даху. Це призводить до такої зміни руху повітря, що з усіх розглянутих варіантів найбільші завихрення мають місце саме в цьому випадку.

Окрім того, що встановлення кузовних елементів впливає на аеродинамічні параметри автомобіля, вони також збільшують акустичний шум, що спричинено зміною траєкторій руху повітря, яке обтікає автомобіль (табл. 5.2, рис. 5.11).

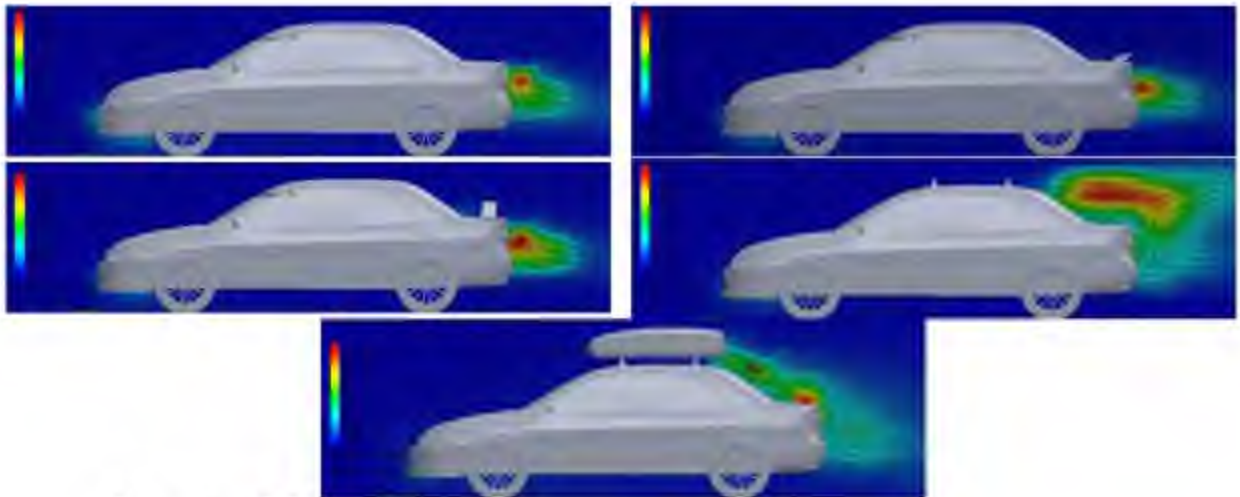


Рисунок 5.10 – Діаграма розподілу турбулентності

Таблиця 5.2 – Результати визначення рівня шуму

Варіант автомобіля	Рівень шуму, дБ
Автомобіль	22,21
Автомобіль зі спойлером	21,44
Автомобіль з антикрилом	33,57
Автомобіль з багажником	42,35
Автомобіль з автобоксом	31,15

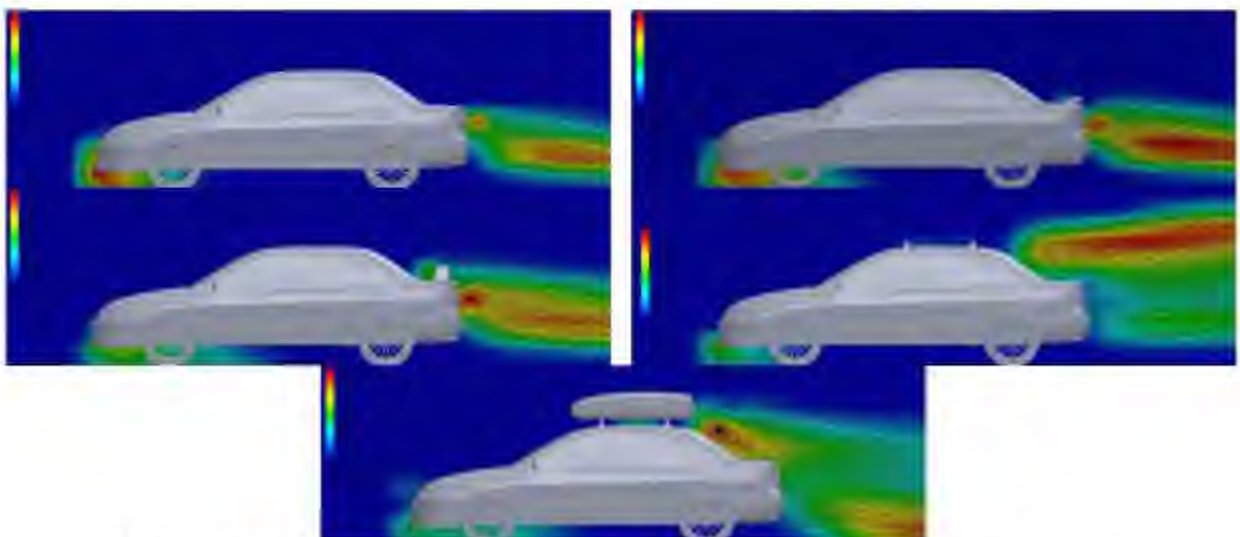


Рисунок 5.11 – Діаграма розподілу акустичного шуму

Як бачимо з рис. 5.11, встановлення спойлера, хоча й незначно, але зменшує акустичний шум, який становить 21,44 дБ проти 22,21 дБ на

звичайному автомобілі. Встановлення антикрила, багажника та автобокса збільшують рівень шуму (рис. 5.12).

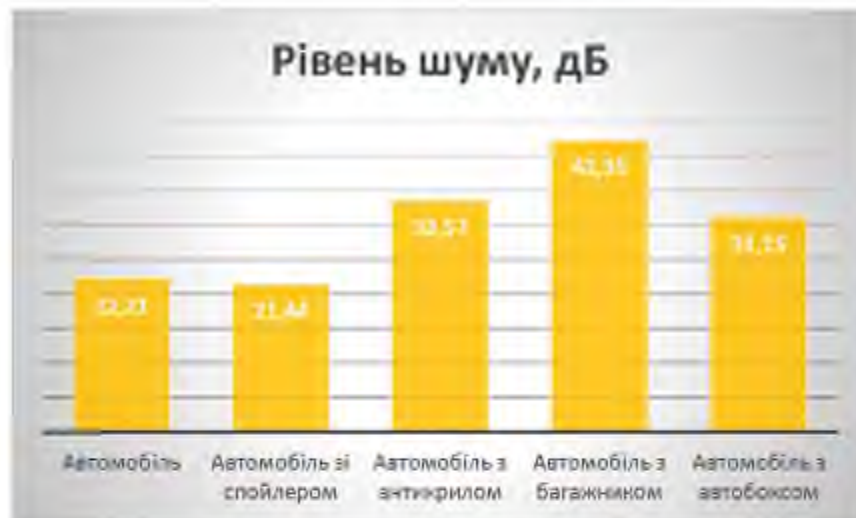


Рисунок 5.12 – Результати визначення рівня шуму

Варто зазначити, що зона максимального рівня шуму для автомобіля з багажником зміщена позаду транспортного засобу в той час, як для автомобіля з автобоксом зона підвищеного шуму розміщена одразу позаду заднього вікна. І в першому, і в другому випадку це може негативно позначитися на ергономіці управління автомобілем та комфорті пасажирів.

#### 5.4. Результати визначення коефіцієнта лобового опору

Коефіцієнт лобового опору  $C_x$ , розраховано за формулою (4.1) для усіх варіантів автомобіля. Так автомобіля *Mitsubishi Lancer* без додатково встановлених кузовних елементів коефіцієнт лобового опору становить

$$C_x = \frac{2F_d}{\rho_n \cdot A \cdot V^2} = \frac{2 \cdot 246,83}{1,21 \cdot 1,98 \cdot 25^2} = 0,33,$$

де  $F_d$  – сила лобового опору, Н;  $F_d = 246,83$  Н;

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

$A$  – лобова площа моделі автомобіля, м<sup>2</sup>;  $A = 1,98$  м<sup>2</sup>;

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

Як бачимо, за результатами розрахунку коефіцієнта лобового опору, його значення становить 0,33. Відповідно до технічної характеристики автомобіля *Mitsubishi Lancer 2005* коефіцієнт лобового опору становить 0,32...0,34 в залежності від комплектації автомобіля. Це підтверджує доцільність використання описаної у попередніх розділах методики, оскільки вона дає досить точні результати.

Результати розрахунку всіх інших варіантів автомобіля наведено на рис. 5.12.



Рисунок 5.12 – Результати розрахунку коефіцієнта лобового опору  $C_x$

Встановлення на автомобіль спойлера зменшить коефіцієнт лобового опору  $C_x$  на 0,4%, встановлення антикрила – збільшить  $C_x$  на 0,4%, багажника на даху – збільшить  $C_x$  на 17,3%, автобокса – збільшить  $C_x$  на 18,6%.

Дослідженнями встановлено, що збільшення аеродинамічного опору на 4% призводить до збільшення витрати палива автомобілем на 1%. Виходячи з цього, можна стверджувати, що використання багажника збільшить витрату палива на 4,3%, а використання автобокса підвищить споживання палива автомобілем на 4,65%. Застосування спойлера чи антикрила витрату палива суттєво не змінить.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Аналізуючи стан питання в теорії та практиці проектування та експлуатації автомобілів встановлено, що серед складових аеродинамічного опору легкового автомобіля найсуттєвіший вплив на аеродинаміку має форма транспортного засобу, оскільки опір форми становить близько 70% від загального аеродинамічного опору. З огляду на це очевидно, що на аеродинамічні характеристики автомобілів суттєво впливає встановлення додаткових кузовних елементів, зокрема поширених спойлерів, антикрил, багажників на даху та автобоксів.

Серед методів аеродинамічних досліджень автомобілів оптимальним сьогодні є метод комп'ютерного моделювання, який дозволяє заощадити фінансові кошти на дослідженнях та оптимізувати форму кузова автомобіля ще на етапі проектування. Враховуючи те, що Львівський національний університет природокористування є ліцензійним користувачем програмного забезпечення *SolidWorks*, нами було обрано саме це програмне забезпечення для проведення досліджень під час виконання кваліфікаційної роботи.

За модель автомобіля в роботі прийнято легковий автомобіль *Mitsubishi Lancer 2005*, який є типовим представником автомобілів типу «седан». Модель автомобіля виконано засобами поверхневого та твердотілого моделювання в системі *SolidWorks* в масштабі 1:1. Аеродинамічне дослідження проведено в модулі *SolidWorks Flow Simulation*.

Аеродинамічне дослідження виконано для п'яти різних варіантів компонування автомобіля: без додатково встановлених кузовних елементів, зі спойлером, з антикрилом, багажником на даху та автобоксом. За результатами дослідження визначено лобову площу автомобіля для різних варіантів компонування, а також важливі аеродинамічні параметри: силу лобового опору, притиску силу, коефіцієнт лобового опору, а також побудовано діаграми розподілу швидкостей, турбулентності, рівня шуму.

Значення коефіцієнта лобового опору, визначене за результатами моделювання, підтверджує адекватність комп'ютерної моделі автомобіля

реальній моделі, оскільки  $C_x = 0,33$ , тоді як за технічними характеристиками для автомобіля *Mitsubishi Lancer 2005* ( $C_x = 0,32 \dots 0,34$ ).

За результатами аеродинамічного дослідження встановлено, що встановлення антикрила на неправильній висоті, що зазвичай має місце на практиці, не збільшує притискну силу автомобіля, а навпаки зменшує її. Значно погіршує аеродинамічні характеристики автомобіля встановлення на його даху багажника. Це значно змінює траєкторії повітряних потоків, та з усіх розглянутих варіантів конструювання автомобіля, створює найбільші зони завихрень. Окрім цього, максимальний рівень шуму, спричинений завихреннями присутній в конструюванні автомобіля з багажником та становить 42,35 дБ.

На підставі отриманих результатів розрахунку коефіцієнта лобового опору  $C_x$  можна зробити висновок про те, що у більшості випадків на практиці додатково встановлені кузовні елементи не покращують аеродинамічні показники автомобіля. Незначного покращення можна досягти встановленням спойлера, який зменшує  $C_x$  на 0,4%. Для досягнення бажаного результату збільшення притискної сили за рахунок встановлення антикрила потрібно проводити додаткові аеродинамічні дослідження для визначення оптимальної висоти встановлення антикрила. Інакше антикрило створює обернений ефект, зменшуючи притискну силу та збільшуючи зону завихрень і додаткових шумів.

В той час, як кузовні елементи, встановлені на кришці багажного відсіку автомобіля не чинять суттєвого впливу на аеродинаміку, а мають в більшій мірі естетичне призначення, то кузовні елементи, встановлені на даху, мають суттєвий вплив на аеродинамічні показники, а відтак на витрату палива. Дослідженнями встановлено, що розміщення багажника у вигляді профільних квадратних труб 30×30 мм збільшують значення коефіцієнта лобового опору на 17,3%, що призведе до збільшення споживання палива на 4,3%, а встановлення автобокса збільшить коефіцієнт  $C_x$  на 18,6%, що погіршить паливну економічність автомобіля на 4,65%.



Результати, одержані в процесі виконання кваліфікаційної роботи, можуть бути використані під час експлуатації автомобіля *Mitsubishi Lancer* 2005 з метою врахування витрат палива, пов'язаних з подоланням додаткового аеродинамічного опору, спричиненого встановленням кузовних елементів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
4. 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.
5. 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.
6. Aerodynamic Analysis of a Car for Reducing Drag Force (Gavin Dias, Nisha R. Tiwari, Joju John Varghese, Graham Koyeerath).
7. 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).
8. 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.
9. 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.

10. Design and Analysis the Effect of Rear spoiler and Rear diffuser on Aerodynamic Forces using CFD (Apr 2016).
11. Galamboš, Stjepan & Dorić, Jovan. (2015). DESIGN AND ANALYSIS OF CAR BODY USING CFD SOFTWARE.
12. Introduction to Computational Fluid Dynamics (Dmitri Kuzmin) <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/kuzmin/cfdintro/cfd.html>.
13. P. Gowdhaman, K. Antonyraj, and V. Annamalai, "An effective approach on physical and dielectric properties of PZT- PVDF composites," *Int. J. Adv. Sci. Res.*, vol. 1, no. 08, pp. 322–328, 2015, doi: 10.7439/ijasr.
14. Hucho, W. H., *Aerodynamics of Road Vehicles*, Fourth Edition, SAE International 1998.
15. J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics* (Boston: McGraw-Hill, 2001)
16. P. A. Nigal Ashik, P. Suseendhar, N. Manoj, and S. Wasim Feroze, "Reduction of drag in box-type and half streamlined automobile vehicles," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.109.
17. R. P. Verma, N. Kumar Chaudhary, and S. Avikal, "Effect of direction of lip spoiler on the aerodynamic performance of a small passenger vehicle," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.448.
18. 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.
19. Sankar, Shanmugasundaram. (2018). CFD Analysis of Aerodynamics of Car. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 7. 4689-4693.
20. Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, 4th Revised Edition, Society of Automotive Engineers, U.S., 1998, ISBN: 978-0768000290.