

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**«Покращення аеродинамічних властивостей  
автомобіля Mazda CX-9 шляхом встановлення навісних  
елементів»**

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

Шифр КвРАТ. 22129.02.14.00

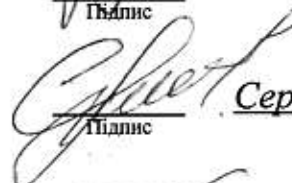
Виконав студент 3 курсу група АТс-22-2



Підпис

Ілля ПРОДАН

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ



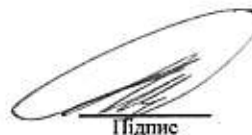
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ

6.06.25

Дата



Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Духа О.В.  
2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

### Продану Іллі Андрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

- Тема роботи: Покращення аеродинамічних властивостей автомобіля Mazda CX-9 шляхом встановлення навісних елементів.  
керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.  
Затверджено наказом університету від 07.02.2025 р. № 23 (Д 26)
- Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2025 р.
- Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали курсових проектів, робіт, практики.
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
  - Аналіз аеродинаміки автомобіля.
  - Моделювання та аеродинамічні особливості автомобіля MAZDA.
  - Результати моделювання.
  - Висновки, рекомендації.
- Перелік графічного матеріалу (презентація):  
Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.
- Консультанти розділів кваліфікаційної


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 21.07 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз аеродинаміки автомобіля	4.05.25	вик
2	Моделювання та аеродинамічні особливості автомобіля MAZDA	16.05.25	вик
3	Результати моделювання	26.05.25	вик
4	Висновки, рекомендації	10.06.25	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	12.06.25	вик
6	Допуск до захисту	14.06.25	вик
7	Захист дипломної роботи	16.06.25	

Студент

  
Підпис

Ілля ПРОДАН

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

## РЕФЕРАТ

Студент групи АТс-22-2 Продан І.А.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Покращення аеродинамічних властивостей автомобіля Mazda CX-9 шляхом встановлення навісних елементів» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 19 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 18 сторінках. Роботу викладено на 78 сторінках, з них 70 сторінок основного тексту, на яких розміщено 50 рисунків і 14 таблиць.

Що стосується аеродинаміки транспортних засобів, повітря вважається рідиною, і його головне призначення полягає в тому, щоб зменшити опір, шум вітру та запобігти небажаній підйомній силі та іншим факторам, які викликають аеродинамічну нестійкість автомобіля на високих швидкостях. Автомобіль із низьким коефіцієнтом лобового опору має мати кращу паливну ефективність у порівнянні з автомобілем, який менш аеродинамічно оптимізований.

Установка додаткових навісних елементів може покращити аеродинамічні характеристики автомобіля, але вимагає оптимальних налаштувань для забезпечення мінімально можливого коефіцієнта лобового опору та максимальної притискної сили.

Мета роботи: підвищення аеродинамічних характеристик легкового автомобіля шляхом моделювання встановлених навісних елементів в різних комбінаціях.

*Ключові слова: АЕРОДИНАМІКА, АВТОМОБІЛЬ, ЛОБОВИЙ ОПІР, ПІДЙОМНА СИЛА, МОДЕЛЮВАННЯ, СПОЙЛЕР, ДИФУЗОР, СПЛІТТЕР, БІЧНІ СПІДНИЦІ.*



3.9 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 6: спойлер + дифузор + спліттер	55
3.10 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 7: спойлер + дифузор + спліттер + бічні спідниці	58
3.11 Порівняння конфігурацій	68
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	78

					КВАРТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

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

Поняття «аеродинаміка автомобіля» включає багато аспектів, найважливішими з яких є [1]:

- забезпечення мінімальної сили опору повітря при русі автомобіля з метою зменшення витрати палива або підвищення швидкості руху;
- зменшення аеродинамічної підйомної сили, що прагне відірвати автомобіль від дороги і знижує зчеплення коліс з дорожнім покриттям;
- зниження забруднення скла, ручок дверей та інших поверхонь автомобіля;
- забезпечення оптимальних повітряних потоків для постачання двигуна повітрям, його охолодження, вентиляції салону;
- Зниження аеродинамічного шуму.

Що стосується аеродинаміки транспортних засобів, повітря вважається рідиною, і його головне призначення полягає в тому, щоб зменшити опір, шум вітру та запобігти небажаній підйомній силі та іншим факторам, які викликають аеродинамічну нестійкість автомобіля на високих швидкостях. Автомобіль із низьким коефіцієнтом лобового опору має мати кращу паливну ефективність у порівнянні з автомобілем, який менш аеродинамічно оптимізований.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хоча аеродинаміка дорожніх транспортних засобів походить від аеродинаміки літаків [2], вони все ще відрізняються кількома способами. По-перше, форма кузова автомобіля набагато менш обтічна у порівнянні з літаком. По-друге, автомобілі працюють набагато ближче до землі, тоді як літаки працюють на вільному повітрі. По-третє, аеродинамічний опір залежить від швидкості рухомого об'єкта та швидкості, з якими літають літаки, набагато вищі, ніж у автомобілів, тому опір різний. По-четверте, літак, що летить у вільному повітрі, має більше ступенів волі, ніж автомобіль, що рухається по дорозі з меншими ступенями волі. По-п'яте, транспортні засоби, будь то літаки у вільному просторі чи автомобілі на дорозі, вони проектується в залежності від їх призначення.

Мета роботи: підвищення аеродинамічних характеристик легкового автомобіля шляхом моделювання встановлених навісних елементів в різних комбінаціях.

Завдання для досягнення мети роботи:

1. Аналіз аеродинамічних особливостей автомобіля.
2. Аналіз конструкції різних аеродинамічних навісних елементів(обвісів).
3. Проведення моделювання потоку базового автомобіля для оцінки його аеродинамічних характеристик, а саме коефіцієнт підйому, підйомна сила, коефіцієнт опору та сила опору.
4. Проведення моделювання потоку на стандартному автомобілі разом із сімома різними комбінаціями встановлених навісних елементів та під різними кутами нахилу спойлера.
5. Порівняння отриманих результатів з результатом базової моделі для визначення основного числа конфігурацій навісних елементів, що створюють покращені аеродинамічні властивості.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

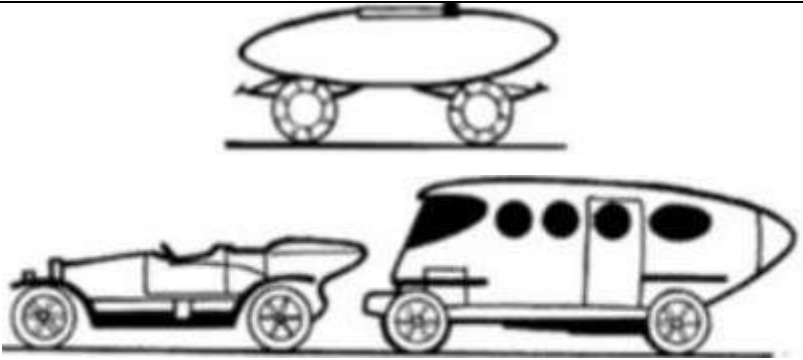
# 1 АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІКИ АВТОМОБІЛЯ

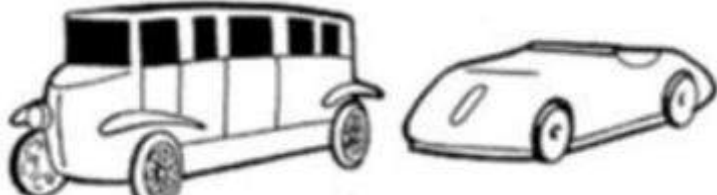
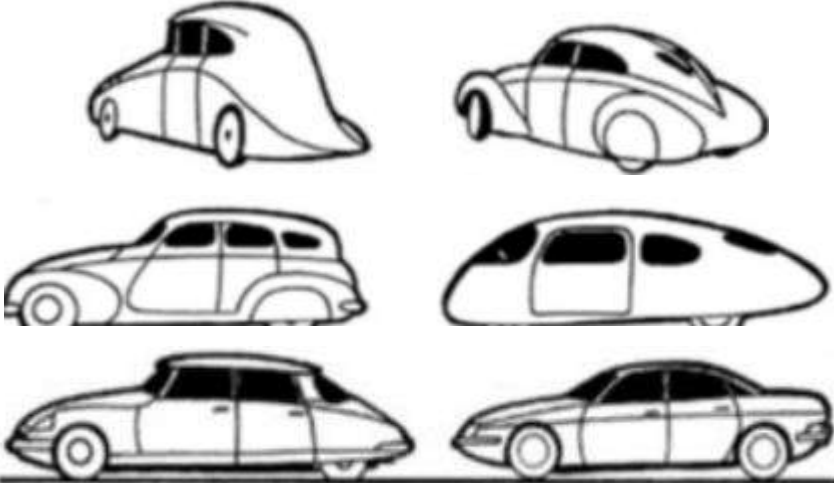

## 1.1 Історія розвитку аеродинаміки автомобілів.

Перші, що випускалися на початку ХХ століття, легкові автомобілі мали кузови каретоподібної форми, що робило їх поганообтічними. Значення коефіцієнта аеродинамічного опору цих автомобілів становило 0,7-0,8 [3]. Це, враховуючи малу потужність двигунів, що встановлювалися на них, було однією з переваг у досягненні високих швидкостей руху, що і послужило основною причиною розгортання робіт з удосконалення аеродинаміки автомобільного кузова.

У розвитку автомобільної аеродинаміки можна виділити чотири основні етапи. Перші три, що стосуються переважно експериментального відпрацювання форми кузовів легкових автомобілів представлені в таблиці 1.1.

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 областей техніки	

1921– 1923	Створення обтічних кузовів	
1922- 1939 1934- 1939 3 1955 р.	Створення обтічних кузовів	
3 1975 р.	Поелементна оптимізація форми кузова	










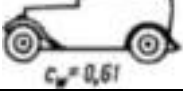

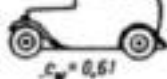
Ряд розробок у галузі обтічних кузовів було виконано американськими дослідниками: Фішлаєм, Хілдом, Леєм, Рейдом. Подані у таблиці 1.2 моделі автомобілів з розробленими ними на базі напівтіл обертання кузовами з утопленими в них колесами мали більш ніж утричі менший  $C_x$ , ніж моделі серійних автомобілів, що випускалися США в 1922-1933 рр [3].

Системно змінюючи форму автомобіля спереду та ззаду, Лей показав її вплив на коефіцієнт аеродинамічного опору  $C_x$ . Отримані ним результати наведено на рисунку 1.1.

У цей час для зниження аеродинамічного опору автомобіля значно подовжували хвостову частину кузова, що забезпечувало поліпшення обтічності за рахунок зменшення супутнього сліду. Однак при цьому зростали габарити автомобіля, що негативно позначалося на його маневреності.

										КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк. 9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Таблиця 1.2 – Моделі з малим аеродинамічним опором, порівняно з легковими автомобілями, що існували на той час у США.

Автор, рік, масштаб	Оптимальні форми на основі напівтіла обертання	Автомобіль, з яким проводиться порівняння
В. Т. Фішлай, 1931, М 1:4		
Р. Г. Хілд, 1933, М 1:15	 $c_w = 0,24$  $c_w = 0,20$	 $c_w = 0,67$  $c_w = 0,74$  $c_w = 0,71$  $c_w = 0,55$
В. З. Лей, 1933, М 1:8	 $c_w = 0,30 \quad 0,24 \quad 0,20 \quad 0,13$	 $c_w = 0,61$
Є. Г. Рейд, 1935	 $c_w = 0,15 - 0,20$	 $c_w = 0,61$

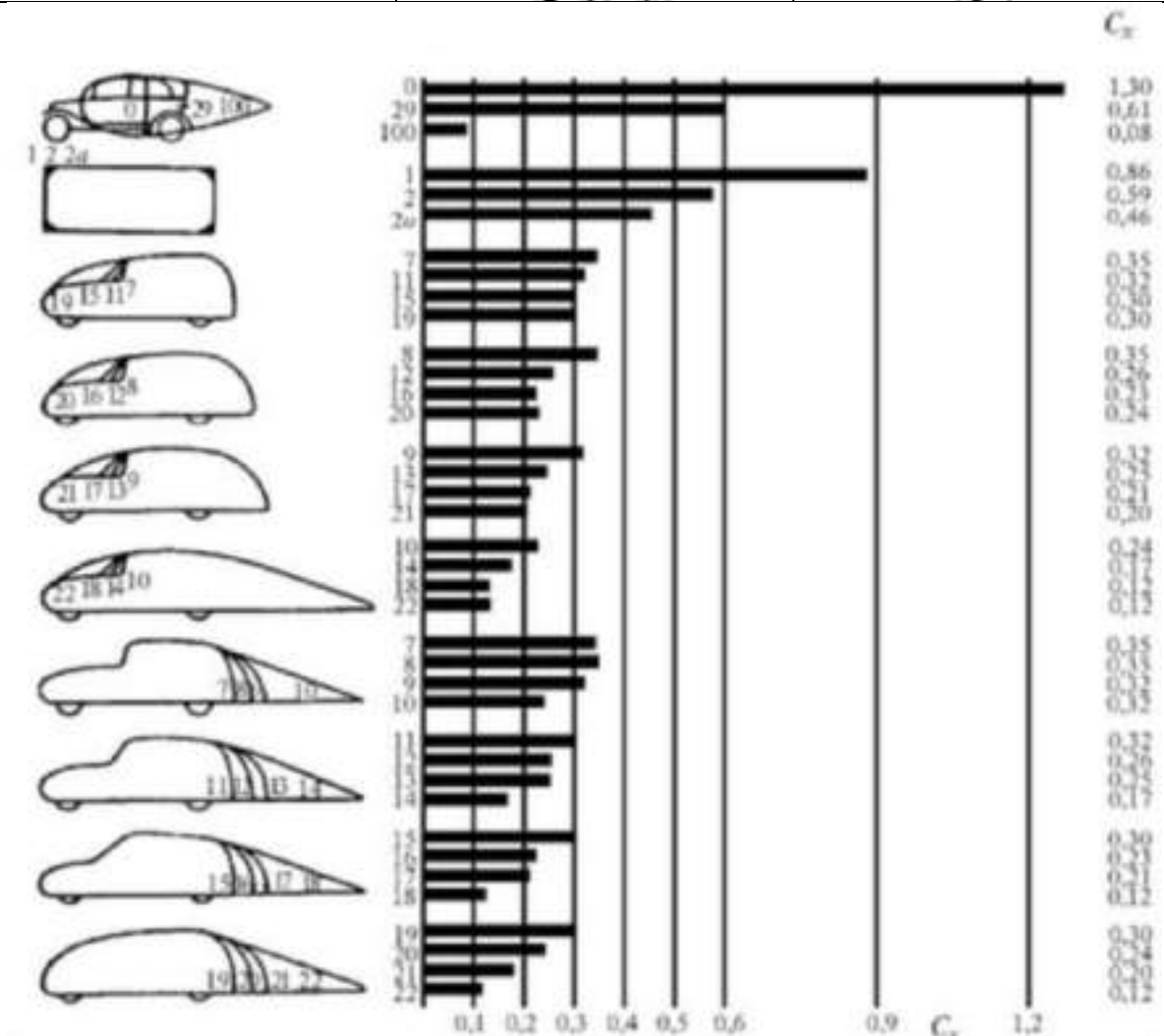


Рисунок 1.1 – Вплив форми кузова автомобіля на C<sub>x</sub> за даними В. Лея.

## 1.2 Аеродинамічні характеристики автомобіля.

При натіканні потоку повітря внаслідок його взаємодії з автомобілем виникають і діють на нього повна аеродинамічна сила 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 аеродинамічних сил, що діють на автомобіль.

Повна аеродинамічна сила та повний аеродинамічний момент визначаються таким чином [4]:

$$P_w = 0,5C_w F \rho V_\infty^2, \quad (1.1)$$

$$M_w = 0,5m_w F \rho V_\infty^2 B. \quad (1.2)$$

де  $C_w$  і  $m_w$  – коефіцієнти повної аеродинамічної сили та моменту, відповідно;  $\rho$  – щільність повітря;  $F$  – лобова площа автомобіля;  $V_\infty$  – швидкість натікання незбурненого повітряного потоку;  $B$  - характерний розмір, наприклад, бази автомобіля.

Розклавши повну аеродинамічну силу та повний аеродинамічний момент за трьома осями пов'язаної системи координат, початок якої зазвичай поєднують з центром тяжкості (ЦТ) автомобіля (рисунок 1.2), отримуємо:  $P_x$  - силу лобового опору;  $P_y$  – бічну силу;  $P_z$  - підйомну силу;  $M_x$  – момент нахилу;  $M_y$  – перекидальний момент, або момент тангажу;  $M_z$  – момент, що повертає, або момент нишпорення.

Характер перебігу повітряного потоку під днищем колісного транспорту значною мірою впливає його аеродинамічні характеристики. Досить великий вплив течії потоку під днищем на підйомну силу. Наявність на днищі значної кількості елементів ходової частини та трансмісії, а також присутність коліс призводить до великого захарачення зони під днищем.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

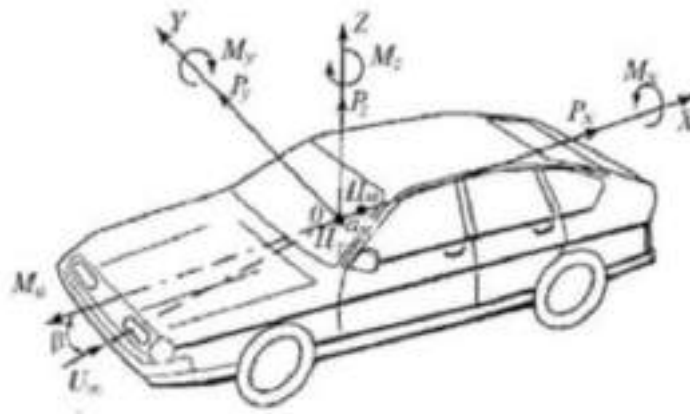


Рисунок 1.2 – Схема аеродинамічних сил та моментів, що діють на автомобіль:

Цт - центр тяжіння автомобіля; Цм – метацентр; ам – плече аеродинамічного моменту;  $\beta$  – кут натікання повітряного потоку

В результаті повітряний потік, що протікає в ній, гальмується. Додатковим фактором, що сприяє зменшенню швидкості потоку в зоні під днищем в міру його наближення до кормової частини кузова є утворення на днищі прикордонного шару.

На рисунку 1.3 показані схеми обтікання даху та днища, а також схеми утворення прикордонного шару на днищі легкового автомобіля.

Ступінь гальмування потоку під днищем автомобіля залежить в основному від наступних факторів:

- товщини та структури прикордонного шару на днищі;
- ступеня шорсткості днища;
- величини дорожнього просвіту;
- наявності та величини дифузорності днища;
- кутів установки керованих коліс;
- довжини і ширини автомобіля.

Для досягнення найменших втрат під днищем треба прагнути до найбільш плоского днища та меншій товщині прикордонного шару, а також до здування останнього з поверхні днища.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

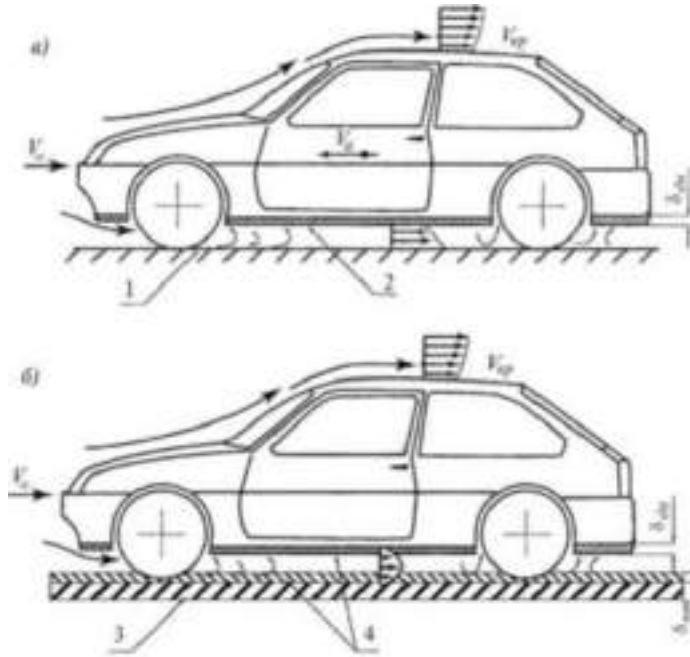


Рисунок 1.3 – Схеми обтікання даху та днища автомобіля:

а – що рухається дорогою; б – встановленого в аеродинамічній трубі;  $V_a$ ,  $V_{\infty}$  – швидкість руху автомобіля та натікання незбуреного потоку;  $V_{кр}$  – еюра швидкості протікання потоку біля даху;  $\delta_{дн}$  – товщина прикордонного шару на днищі автомобіля.

На поверхні кузова є певна кількість додаткових деталей і дрібних конструктивних елементів: дзеркала заднього виду, антени, дверні ручки, склоочисники, бічні поворотні ліхтарі, ринви, номерні знаки та ін. При натіканні ними повітряного потоку спостерігаються зрив потоку та інтенсивні відривні течії, що призводить до появи за цими елементами зон розрідження, збільшення аеродинамічного опору, аеродинамічного шуму і підвищеного забруднення кузова. Оскільки розрахункова оцінка аеродинамічного опору додаткових конструктивних елементів на кузові автомобіля утруднена, для оцінки їх опору використовуються, як правило, експериментальні дані. Для розширення відомостей з аеродинаміки додаткових елементів було проведено відповідні експериментальні дослідження в трубі та на дорозі, а також систематизовано дані, наявні в технічній літературі.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У таблиці 1.3 наведено дані, що дозволяють оцінити аеродинамічний опір окремих конструктивних елементів на кузові автомобіля в ході його аеродинамічного проектування.

Таблиця 1.3 – Частки аеродинамічного опору окремих конструктивних елементів на кузові автомобіля

Додатковий елемент на кузові	Частка коефіцієнта аеродинамічного опору $\Delta C_x$
Зовнішнє дзеркало заднього виду	0,01-0,02
Антенa	0,002-0,004
Дверні ручки	0,001-0,002
Склоочисники	0,005-0,007
Кондиціонер на даху кабіни авто поїзда	0,016-0,021
Номерний знак	0,001-0,002
Водостічні жолоби	0,015–0,017
Бічні поворотні ліхтарі	0,002-0,003
Багажник на даху легкового автомобіля	0,04–0,07
Прапорець на капоті	0,008-0,015

### 1.3 Аеродинаміка пасажирських автомобілів.

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

На рисунку 1.4 показано отриману за результатами фізичних досліджень схему обтікання легкового автомобіля із 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 закруглених фронтальних країв кузова. Якщо при цьому відбувається повторне прилягання потоку, то утворюються, так 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 [2, 4].

Складним є характер обтікання під днищем автомобіля. Наявність на днищі виступаючих конструктивних елементів ходової частини і трансмісії призводить до гальмування повітряного потоку, що протікає під автомобілем та до великих гідравлічних втрат. 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.

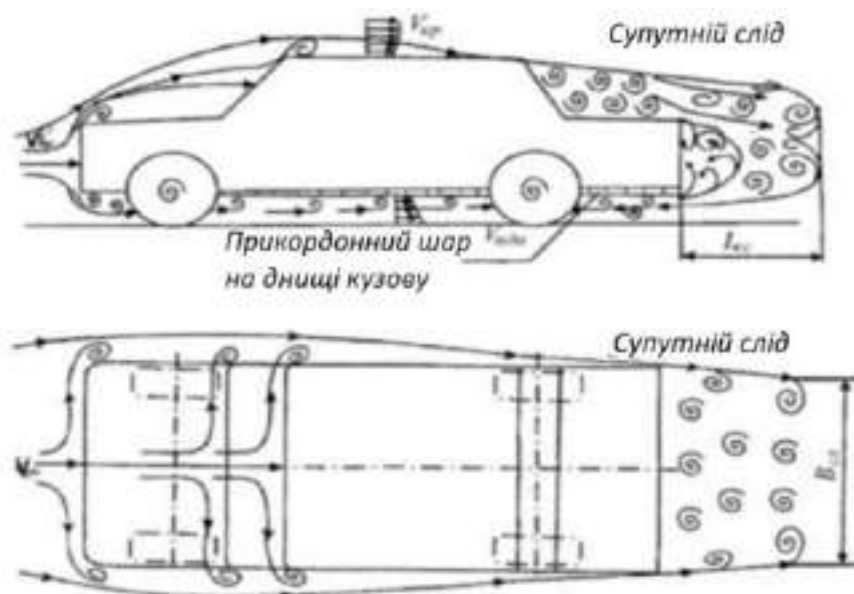


Рисунок 1.4 – Схема обтікання легкового автомобіля.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Одночасно з цим, через наявність на даху кузова розрідження, утворюються поперечні кільцеві вихори (рисунок 1.5), у яких відбувається перетікання повітряних потоків від днища до даху, що призводить до забруднення автомобіля та збільшення чинної на нього підйомної сили.



Рисунок 1.5 – Схема утворення поперечних кільцевих вихорів (ПКВ).

Таблиця 1.4 – Навісні аеродинамічні елементи, рекомендовані для встановлення на легкових автомобілях

№	Зона встановлення	Назва елемента	Ефект, забезпечуваний даним аеродинамічним елементом	Досягне зниження коефіцієнтів	
				Cx, %	Cz, %
	Передній бампер	Передній спойлер	Зниження витрати повітря під автомобілем, часткове виключення взаємодії потоку з деталями днища і ходової частини, зменшення підйомної сили на передній осі	3...4	10...25
	Передній бампер	Нижній обтічник	Упорядкування повітряних потоків під автомобілем, виключення їх взаємодії з деталями ходової частини та трансмісії, зниження тиску на днище	4...6	3...4
	Кришка капота	Нижній дефлектор	Часткове чи повне усунення зони гальмування потоку та його відриву від фронтальних кромek даху, зменшення тиску на лобове скло	5...7	7...8

Закінчення таблиці 1.4					
	Задня панель кузова	Задній спойлер	Часткове чи повне усунення утворення супутнього сліду на задній панелі кузова та зменшення підйомної сили задньої осі, зниження забруднення заднього скла	4...7	15...35
5	Задня панель кузова	Задній аеродинамічний закрилок		2...3	4...5
6	Днище кузова	Нижній обтічник моторного відсіку	Поліпшення обтікає мости днища за рахунок здування прикордонного шару, зменшення гідравлічних втрат і збільшення швидкості потоку під днищем	3...4	6...7
7	Днище кузова	Плоскі піддони		3...5	6...8
8	Колеса	Обтічні ковпаки	Поліпшення обтікання мостів коліс та зменшення приєднаної маси кузова	1...2	2...3

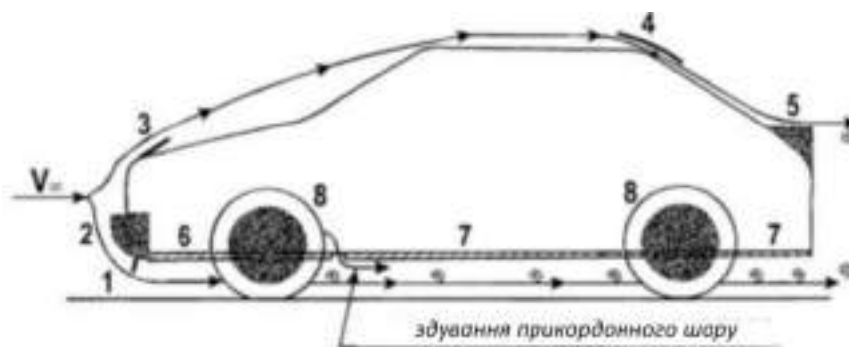


Рисунок 1.6 – Схема установки рекомендованих навісних елементів:  
 1 – передній спойлер; 2 – передній інтегральний бампер; 3 – верхній передній дефлектор; 4 – задній аеродинамічний закрилок; 5 – задній спойлер; 6 – нижній обтічник моторного відсіку; 7 – плоскі піддони на днищі; 8 – обтічні ковпаки на колесах.

Основними напрямками та прийомами вдосконалення аеродинаміки легкових автомобілів є такі [6]:

– оптимізація контурного фактора за рахунок зниження питомої ваги відривних течій, насамперед шляхом збільшення кутів нахилу облицювання

						КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
							17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

радіатора, кришки капота, лобового скла та радіусів заокруглення фронтальних кромek кузова;

- надання передку автомобіля та вітровому склу циліндричності в плані;

- усунення з поверхні кузова всіх виступаючих елементів конструкції або їх ретельна аеродинамічна обробка, у тому числі виконаного урівень з кузовом скління, усунення водостоків тощо;

- Створення кузовів краплеподібної форми з безвідривним обтіканням;

- розробка систем організованого та дозованого забору та викиду повітря для охолодження радіатора та двигуна, а також вентиляції та охолодження салону;

- Застосування гладкого днища з організацією безвихрового протікання повітряних потоків;

- встановлення кузова з негативним кутом тангажу у поєднанні з оптимальним дорожнім просвітом, що регулюється залежно від умов руху автомобіля;

- ретельна герметизація місць з'єднання та торкання панелей капота, дверей, даху і багажника із кузовом;

- оптимізація форми переднього буфера з переходом його в нижню панель і облицюванням радіатора в сукупності із застосуванням невеликого по висоті перед нього спойлера;

- Використання задніх спойлерів;

- установка спеціальних аеродинамічних ковпаків на колесах та часткове перекриття задніх коліс;

- розробка та застосування спеціальних конструктивних елементів та рішень щодо зниження забрудненості, а також рівня аеродинамічного шуму автомобілів.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

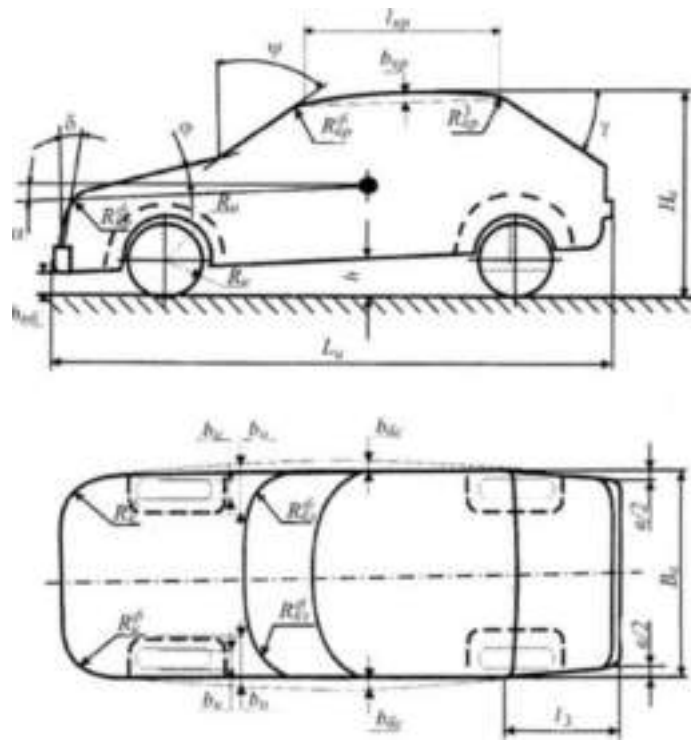


Рисунок 1.7 – Основні конструктивні параметри кузова, що впливають на обтічність:

$\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$  – кути нахилу облицювання радіатора, кришки капота, вітрового та заднього скла;  $R_{kr}$ ,  $R_{kr}^{\prime}$  – радіуси заокруглення фронтальних країв поту та даху;  $\alpha$ ,  $h$  – кут тангажу кузова та відстань його від днища до дороги;  $b$ ,  $L_3$  – величина завуження кузова та його довжина;  $L_a$ ,  $B_a$ ,  $H_a$  – довжина, ширина та висота автомобіля.

#### 1.4 Аеродинамічні параметри.

Одним із шляхів досягнення високих характеристик автомобілів є підвищення аеродинамічних параметрів.

До найважливіших параметрів аеродинаміки відносять лобове опір, коефіцієнт лобового опору, підйомну силу, коефіцієнт підйомної сили, сили опору та притискної сили.

Притискна сила, як випливає з назви, - це сила, яка штовхає автомобіль вниз до дороги, створюючи ефект прилипання шин до землі, щоб забезпечити

									КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
										19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

краще зчеплення, це також називають негативною підйомною силою. Притискна сила збільшується, коли відстань між опорною плитою автомобіля та землею зменшується. Це тому, що як відстань між опорною плитою автомобіля та землею зменшує швидкість потоку повітря під автомобілем збільшується і створюється область низького тиску. Область низького тиску викликає силу всмоктування, яка створюється під автомобілем, притискна сила зменшується в міру збільшення відстані між збільшення плити та землі.

Ліфт. Підйомна сила має вирішальне значення для автомобілів, які рухаються на високих швидкостях. Це сила, яка діє протилежно до ваги транспортного засобу. Коли підйомна сила автомобіля збільшується, автомобіль має тенденцію поводитися як крило і повільно втрачає контакт із землею. Оскільки повітря у верхній частині автомобіля має нижчий тиск у порівнянні до повітря на дні створюється різниця в тиску і тиск на верхній поверхні автомобіля зменшується. Сила, що діє на дно автомобіля, більша, ніж сила, що діє зверху на автомобіль. Це зменшує навантаження, що діє на колеса автомобіля, що, у свою чергу, зменшує зчеплення коліс із дорогою, що спричиняє підйомну силу.

Рівняння для підйомної сили:

$$L = \frac{C_l \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2}; \quad (1.3)$$

Коефіцієнт підйомної сили - це безрозмірна величина, підйомна сила, яку створює тіло, що піднімає швидкість рідини, щільність рідини навколо тіла та відповідна базова площа тіла, що піднімається.

Рівняння для коефіцієнта підйомної сили:

$$C_L = \frac{2L}{\rho \cdot v^2 \cdot A}; \quad (1.4)$$

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де:  $L$  - Підйомна сила;  $\rho$  - щільність повітря;  $V$  - швидкість руху повітря;  $A$  - Лобова ділянка.

Сила опору – це сила, яка виникає під час опору руху тіла. Опір автомобіля залежить від передньої частини автомобіля. Транспортні засоби, які мають більшу лобову площу, підлягають до більшого опору тиску порівняно з обтічними тілами. Сили опору, що діють на автомобіль, можна розділити на: чотири типи, тобто індукований опір, інтерференційний опір, в'язкий опір і опір тиску відриву.

Індукований опір створюється, коли створюється підйомна або притискна сила, тобто коли виникає різниця тиску між поверхнями автомобіля. Коли повітря обтікає інші частини автомобіля, наприклад його частина корпусу створюється опором перешкоди. Наприклад, потік повітря над капотом буде мати вплив повітря, що виходить з носа автомобіля. В'язкість - властивість рідини, завдяки якій вона демонструє стійкість до деформації при заданій швидкості. Опір, створюваний повітрям для потоку над поверхнею автомобіля має в'язкий опір. Опір тиску відриву – це опір, який створюється за допомогою розділення потоку повітря. Це в першу чергу залежить від ламінарного потоку і турбулентного потоку повітря.

Сила опору, що створюється цим розділенням, є опором тиску розділення.

Рівняння сили опору [4]:

$$D = \frac{C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2}, \quad (1.5)$$

Коефіцієнт опору також є безрозмірною величиною. Рівняння для коефіцієнта сили опору:

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_D = \frac{2D}{\rho * v^2 * A} \quad (1.6)$$

де: D - сила опору;  $\rho$  - щільність повітря; V - швидкість руху повітря; A - лобова частина автомобіля.

### 1.5 Аеродинамічні пристрої.

Є різні аеродинамічні пристрої, такі як спойлер або перевернуте крило, спліттери, дифузори, вутки, бічні пороги, вихрові генератори, які допомагають маніпулювати потоком повітря навколо тіла автомобіля для досягнення бажаних результатів.

Перевернуте крило, рис. 1.8. В основному перевернуті крила створюють притискну силу за рахунок різниці тиску, яка виникає у верхній частині та нижній поверхні проєктованого крила. Потік повітря навколо перевернутого крила такий, що деяка частка повітря протікає над верхньою частиною крила, а решта рухається по нижній поверхні крила [7].

Залежно від конструкції крила, повітря, яке тече на верхній поверхні, рухається повільно, створюючи області високого тиску, і повітря, що тече під крилом, рухається з більшою швидкістю, створюючи область низького тиску. Ця різниця тиску така, що змушує верхню поверхню штовхати автомобіль вниз із більшою силою, ніж нижня поверхня, що штовхається вгору. Конструкція заднього крила, положення та кут нахилу відіграють важливу роль у тому, як повітряні потоки впливають на атрибути аеродинаміки автомобіля. Адаптивне заднє крило створює невеликі завихрення, що потребує меншої енергії для генерації та, отже, меншого опору.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.8 – Перевернуте крило автомобіля.

Повітряні дамби. Повітряна перегородка обмежує потік повітря, що йде під автомобіль. Цей пристрій нагнітає повітря навколо та над автомобілем, що призводить до підвищення атмосферного тиску в цьому регіоні. Об'єм повітря, що проходить під автомобіль рухається швидше, створюючи область низького тиску, що призводить до ефекту всмоктування.

Спліттер, рис. 1.9, як впливає з назви, розділяє потік повітря, що надходить до автомобіля. Функції спліттера за тим самим принципом, що й у повітряної дамби. Так як передня частина автомобіля тупа, область високого тиску що створюється повітрям, яке штовхається на поверхню автомобіля і одночасно сповільнює його.

Спліттер розділяє цю область на зони високого тиску та області низького тиску одночасно збільшуючи притискну силу [8].



Рисунок 1.9 – Потік повітря спліттером

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дифузор, рис. 1.10 - це пристрій, який зменшує тиск на нижній частині автомобіля. Загалом знаходиться прямо під розгалужувачем, щоб направляти повітря в колодязі передніх коліс і під автомобіль. Задній дифузор виштовхує повітря з-під автомобіля в зону турбулентного сліду. Дифузор під кузовом включає в себе три механізми підйому, взаємодії з землею та накачування дифузором. Збільшуючи кут дифузору, притискну силу можна збільшити і навпаки. Дорожній просвіт автомобіля також відіграє вирішальну роль, оскільки дорожній просвіт автомобіля зменшується, сила притиску збільшується [9 - 11].



Рисунок 1.10 – Дифузор на Nissan Skyline.

Вутки, рис. 1.11, які також називають приводними пластинами, є іншим пристроєм, який використовується для створення притискної сили, коли вони спрямовують потік повітря вгору і створює силу вниз. Вутки створюють сильні завихрення які рухаються вздовж боків транспортного засобу, що запобігає перешкоджанню повітря під високим тиском повітряного потоку області низького тиску під автомобілем. У вуток є зворотна сторона, тобто цей пристрій створює значний тиск. Отже, щоб приборкати це збільшення лобового опору, необхідно виконати тонке налаштування необхідних аеродинамічних пристроїв.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.11 – Потік повітря через вутки.

Бічні пороги, рис. 1.12 - це пристрій, який допомагає контролювати кількість повітря, що протікає під автомобілем. Ефективність бічних порогів залежить від кліренсу автомобіля. Якщо висота бокової спідниці перевищує певний рівень, її ефективність знижується. Бічні спідниці також розділяють потік повітря в області високого і низького тиску [12].



Рисунок 1.12 – Схема потоку повітря через бічні повітроводи.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВТОМОБІЛЯ MAZDA

Аеродинамічні особливості та аналіз автомобіля з обвісами та без них, виконаний за допомогою програмного забезпечення SolidWorks. Експеримент передбачає спочатку повний аналіз базового заводського автомобіля, тобто, результат коефіцієнта лобового опору та підйомної сили. Другим етапом є отримання тих же коефіцієнтів для автомобіля із встановленими обвісами. Третім етапом є порівняння отриманих коефіцієнтів та визначення аеродинамічних особливостей встановлених елементів обвісів.

### 2.1 Концепція та програмне забезпечення.

Загальним методом визначення аеродинамічних параметрів автомобіля є використання аеродинамічної труби. Експерименти з використанням аеродинамічних труб були проведені на автомобілях, але цей метод займає багато часу і водночас є дуже дорогим. Цей недолік аеродинамічної труби призвів до винаходу симуляційного методу чисельного дослідження аеродинамічних параметрів. Цей спосіб отримав назву «Обчислювальна гідродинаміка» (CFD) [13-15]. Обчислювальна гідродинаміка використовується для моделювання дизайну для аеродинаміки. CFD - це частина механіки рідини, яка використовує числову оцінку та інформацію про дані для розділення і дозволяє вирішувати проблеми, які включають прогресування рідин [16-18].

Для дослідження розробленої моделі в Solidworks проводиться детальне дослідження CFD за допомогою симуляції потоку. Підхід моделювання потоку в Solidworks залежить від двох основних стандартів, першим є пряме використання локальної САПР як джерела розрахункових даних і по-друге, поєднання повної 3D CFD демонстрації з менш складним

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проекуванням техніки у випадках, коли ціль поперечного перерізу недостатня для повної тривимірної реконструкції.

Розробка Solidworks Flow Simulation базується на використанні декартової сітки та його інновації є одним із основних сегментів CAD/CFD асоційованого для CFD, введеного CFD [18, 19].

Solidworks Flow Simulation може розглядати як ламінарні, так і турбулентні потоки. Ламінарні потоки відбуваються при низьких оцінках числа Рейнольдса. Швидкість і довжина ізольовані кінематичною товщиною. У точці, коли число Рейнольдса перевищує конкретне базове значення, потік легко змінюється на примусовий.

Завдяки цій стратегії в умовах з'являються додаткові умови, відомі як напруження Рейнольдса для яких слід надати додаткові дані. Щоб закрити це розташування умов застосовують Solidworks Flow.

Рекреація використовує транспортні умови для бурхливої активної енергії та швидкості її поширення, використовуючи модель k-ε. У рідких областях Solidworks Flow Simulation вирішує умови Нав'є Стокса, які є формулами законів маси, збереження енергії та сили [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial(\tau_{ij} \tau_{ij}^R)}{\partial x_j} + S_i; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i + Q_H; \quad (2.3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}; \quad (2.4)$$

де: t – час; ρ – щільність; τ – напруження; q – тепловий потік; P – тиск.

У CFD є три етапи [15-18]:

1. Попередня обробка. За допомогою автоматизованого проектування визначаються геометрія та фізичні межі. Об'єм ділиться на дрібну сітку. Створена сітка може бути структурованою або безструктурною, що

					КВАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складаються з багатогранних, пірамідальних, призматичних, чотиригранних, шестигранних елементів. Потім визначається модель. Уточнюється визначення граничних умов.

2. Починається симуляція, і рівняння виконуються ітеративно в усталеному або перехідному стані.

3. На завершальному етапі аналіз результатів разом із візуалізацією виконується за допомогою постпроцесора.

## 2.2. Налаштування конфігурації та моделювання автомобіля.

У цьому експерименті є чотири аеродинамічні частини, які додаються до стандартного автомобіля: дифузор, спліттер, пороги і спойлер. Чотири функції поєднані зі стандартним автомобілем, а аналіз виконується в різних конфігураціях зі стандартною швидкістю 40 м/с. Конфігурації:

1. Спойлер
2. Спойлер + Дифузор
3. Спойлер + Бічна спідниця
4. Спойлер + Спліттер
5. Спойлер + Дифузор + Бічна спідниця
6. Спойлер + Дифузор + Спліттер
7. Спойлер + Дифузор + Спліттер + Бічна спідниця

Вибір моделі є важливим фактором в аналітичному дослідженні коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору. У цьому дослідженні автомобіль, обраний для дослідження, є поза шляховиком Mazda CX-9 2020 року.

Модель розробляється в SolidWorks як модель поверхні, а потім перетворюється на суцільну модель, рис. 2.1. Для зручності моделювання розміри штатного автомобіля наведено в таблиці 2.1.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 – Модель штатного автомобіля Mazda CX-9.

Таблиця 2.1 – Розміри штатного автомобіля за проектом.

№	Розміри	Одиниця (мм)
1.	Довжина	5075
2.	Ширина	1830
3.	Висота	1717
4.	Колісна база	2941
5.	Дорожній проясвіт	205

Модель, показана на рис. 2.1, розроблена приблизно до розмірів реального світу з використанням SolidWorks. Це дослідження спрямоване на зменшення коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору стандартного автомобіля на основі додавання аеродинамічних функцій, таких як спойлер, дифузор, спліттер і бічні пороги для покращення стану керуваності, стійкості і тяги автомобіля.

На рисунку 2.3 зображено спліттер з розмірами в таблиці 2.2. Він прикріплений до нижньої частини переднього бампера автомобіля. Його призначення полягає в тому що він діє як клин, що розділяє повітря, що тече перед автомобілем.

Таблиця 2.2 – Розміри спліттера.

№	Розміри	Одиниця (мм)
---	---------	--------------

1.	Довжина	1747
2.	Довжина дуги	2420
3.	Висота	20

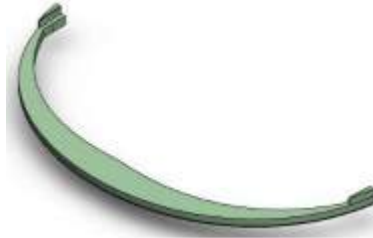


Рисунок 2.2 – Спліттер.

Повітря протікає над автомобілем, штовхаючи його вниз, що призводить до збільшення тяги та притисної сили, внизу тече повітря низького тиску.

Конструкція на рисунку 2.3 являє собою дифузор, секцію у формі задньої частини автомобіля. Дифузор допомагає покращити повітряний потік під автомобілем забезпечує плавний перехід повітря за рахунок зменшення турбулентності. Від має шість кутів нахилу, а саме:  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$  (рисунки 2.3 (a, b, c, d, e, f)), на чотирьох різних швидкостях з різними інтервалами. Проводиться аналіз для умов, згаданих вище, і за результатами, кут з найменшим опором і підйомом визначається коефіцієнт. Ключовим аспектом функції є збільшення швидкості повітряного потоку під автомобілем, які одночасно збільшують притисну силу автомобіля, створюючи область низького тиску, що призводить до притискання автомобіля до поверхні дороги. Розміри дифузора наведено в таблиці 2.3.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

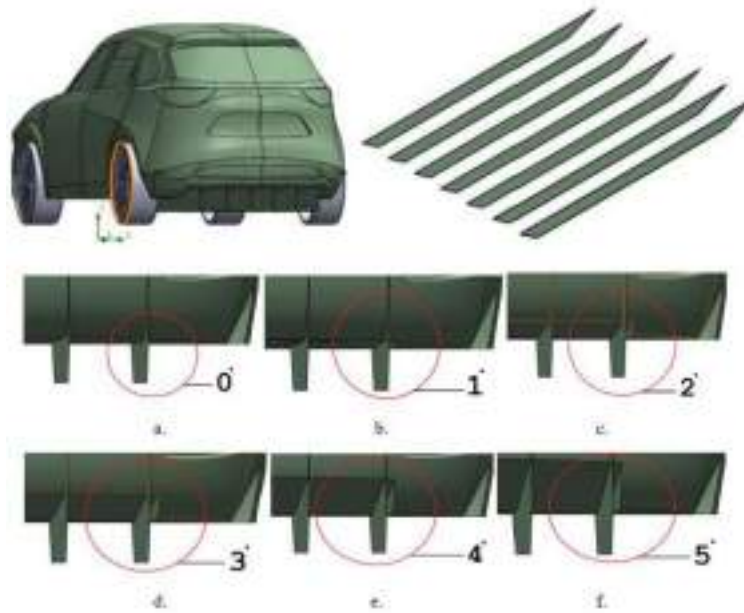


Рисунок 2.3 – Дифузор із зазначеними кутами нахилу (а) - кут 0°, (б) - кут 1°, (в) - кут 2°, (г) - кут 3°, (е) - кут 4°, (ф) - кут 5°

Таблиця 3.3 – Розміри дифузора за проектом.

№	Розміри	Одиниця (мм)
1.	Довжина	1700
2.	Ширина	1
3.	Висота	230

На рисунку 2.4 показана бічна спідниця, що є елементом, призначеним для зменшення потоку повітря під високим тиском з боків автомобіля, таким чином збільшуючи притискну силу. Чим ближче автомобіль до землі, тим більше це стає ефективним. На рисунку 2.4 (с, d, e, f, g), п'ять різних висот бокової спідниці відносно поверхні землі на 205 мм, 215 мм, 225 мм, 235 мм, 245 мм відповідно, і перевірено на чотирьох різних швидкостях з різними інтервалами. Аналіз проводиться за умовами згаданими вище, і визначаються кут з найменшим опором і коефіцієнтом підйому. Розміри бічної спідниці наведено в таблиці 2.4.

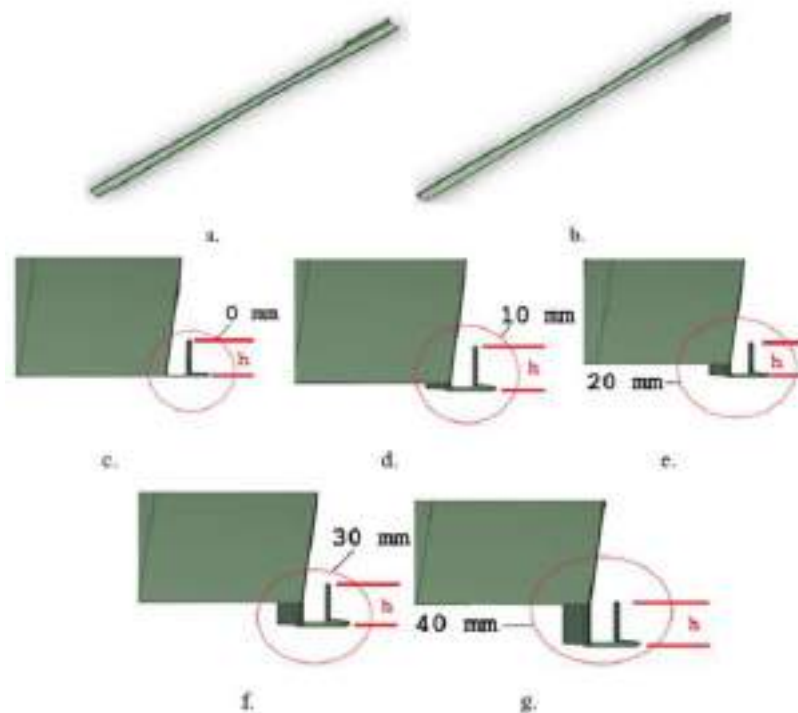


Рисунок 2.4 – Бічна спідниця: (а) - Правий бічний борт, (б) - Лівий бічний бортик, (в) – бічний борт на 0 мм від поверхні землі, (г) – бічна спідниця на відстані 10 мм від поверхні землі, (е) - бічна спідниця на відстані 20 мм від поверхні землі, (ф) - бічна спідниця на 30 мм від поверхні ґрунту, (г) - бортик на 40 мм від поверхні ґрунту.

Таблиця 2.4 – Розміри бортів спідниці.

№	Розміри	Одиниця (мм)
1.	Довжина	1507
2.	Ширина	62
3.	Висота	2

На рисунку 2.5 показаний задній спойлер автомобіля, який зменшує турбулентний потік повітря позаду автомобіля, що, у свою чергу, зменшує опір автомобіля та запобігає його підйому. Розміри спойлера наведено в таблиці 2.5.



Рисунок 2.5 – Спойлер автомобіля.

Таблиця 2.5 – Розміри спойлера за проектом.

№	Розміри	Одиниця (мм)
1.	Довжина	1405, 250
2.	Крило - Діаметр	R10
3.	Крило - дугові кути: верхній	R609
4.	Крило - дугові кути: нижній	R 552
5.	Висота	78

На рисунку 2.6 зображено модель автомобіля із всіма перерахованими вище аеродинамічними компонентами (спліттер, дифузор, бічна спідниця, спойлер).



Рисунок 2.6 – Модель автомобіля з аеродинамічними обвісами.

Спочатку аналізується стандартний автомобіль, модель якого показано на рис. 2.1. Після завершення аналізу, автомобіль разом із аеродинамічними

частинами випробовуються в іншій конфігурації, як зазначено в даному етапі аналізу на чотирьох різних швидкостях, отримані результати встановлюються як базові результати.

### 2.3 Граничні умови та налаштування при моделюванні.

Граничні умови встановлюються для моделі, щоб обмежити вхідні змінні для моделювання відповідно до наших вимог до експерименту. Вхідна швидкість для стандартного автомобіля та автомобіля конфігурації, що встановлюються, як зазначено в таблиці 2.6. Умови для дорожнього покриття встановлені як справжня стіна, надаючи їй таку саму швидкість, як і вхідна швидкість стандартного автомобіля та конфігурацій як зазначено нижче.

**Таблиця 2.6 – Граничні умови.**

Граничне значення	Граничної умови	Величина
Вхід – базова машина	Швидкість	$U_z = 20 \text{ м/с}, 30 \text{ м/с}, 40 \text{ м/с}, 50 \text{ м/с}$
Вхід – конфігурації	Постійна швидкість	$U_z = 40 \text{ м/с}$
Підлога – базова машина	Рухома стінка	$U_z = 20 \text{ м/с}, 30 \text{ м/с}, 40 \text{ м/с}, 50 \text{ м/с}$
Підлога – конфігурації	Рухома стіна	$U_z = 40 \text{ м/с}$
Автомобіль	Без ковзної стіни	-
Інші стіни	Вільна стіна для ковзання	-
Властивості рідини	Тип	повітря
	Щільність	1,22 кг/м <sup>3</sup>
	Тиск	101325 Па
	Температура	293,2 К

Для виконання аналізу CFD створюється новий проект для симуляції потоку в SolidWorks. А обчислювальна область налаштована таким чином, що

попереду моделі відкладається 3 довжини автомобіля а позаду 5 довжин автомобіля (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Обчислювальна область.

Таблиця 2.7 – Розміри обчислювальної області, визначеної для аналізу

Вісь	Відстань між осями (мм)
+ X	4400
- X	- 4400
+ Y	5000
- Y	0
+ Z	15000
- Z	- 25000

Дорожнє покриття сполучається по дотичній до коліс автомобіля і обчислювальна область обмежена поверхнею дороги вздовж осі X і осі Z, таблиця 2.7). Наведені різні вхідні швидкості також вводяться в поверхню дороги, гарантуючи, що поверхня дороги також рухається з тією ж швидкістю, що й вхідна швидкість.

Сітка моделі автомобіля зображена на рисунку 2.8.

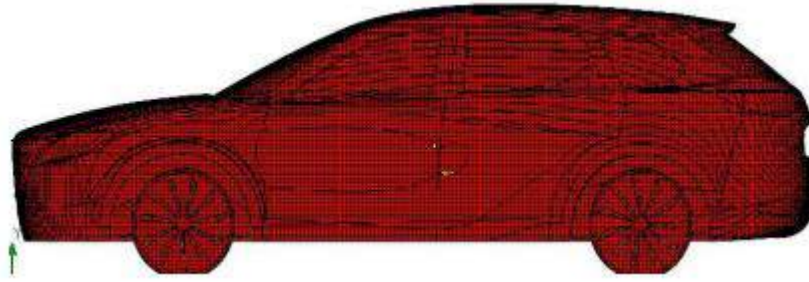


Рисунок 2.8 – Сітка штатного автомобіля.

Сітка для всієї обчислювальної області є налаштування на рівні 4, що є помірною сіткою та рівновіддаленою уточненою локальною сіткою на двох шарах для автомобіля налаштовано на рівень 5, що дає йому щільну рівномірну сітку, а також визначає багат шаровий перехід з подібненням комірки 0,001 м і 0,0011 м.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.

#### 3.1 CFD-аналіз стандартного автомобіля.

Після налаштування обчислювальної області виконується аналіз стандартного автомобіля. Аналіз виконується на чотирьох різних швидкостях, швидкість на вході змінюється на чотирьох різних швидкостях. Це дозволяє порівняти результати стандартного автомобіля з результатами налаштування автомобіля в різних конфігураціях.

Після завершення аналізу буде створено графіки зниження тиску та графіки швидкості для всіх швидкостях.

З наведеного рисунка 3.1 ми можемо бачити, що на графіку зниження тиску створюється високий тиск на передній частині автомобіля, і тиск поступово зменшується, коли повітря надходить над автомобілем і є кілька областей високого тиску, створених на нижній і верхній поверхні автомобіля. Потік повітря над автомобілем є ламінарним, а потім стає турбулентним у задній частині, коли він проходить над автомобілем.

З графіка рисунка 3.2, а) видно, що зі збільшенням швидкості опір зростає від 20 м/с до 40 м/с і зменшується при 50 м/с. Залежність коефіцієнта підйому від швидкості, зазначеної на графіку 3.2, б) спостерігається постійне збільшення коефіцієнта підйомної сили зі збільшенням швидкості. На графіку 3.2, г) крива має постійне збільшення коефіцієнта підйомної сили та опору, оскільки значення обох коефіцієнтів лобового опору і коефіцієнт підйому збільшується. На графіку 3.2, в) показано поступове збільшення сили опору від мінімального значення 214 Н до максимального значення 1375 Н. Так само збільшується підйомна сила від мінімального значення 113 Н до максимального значення 800 Н.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

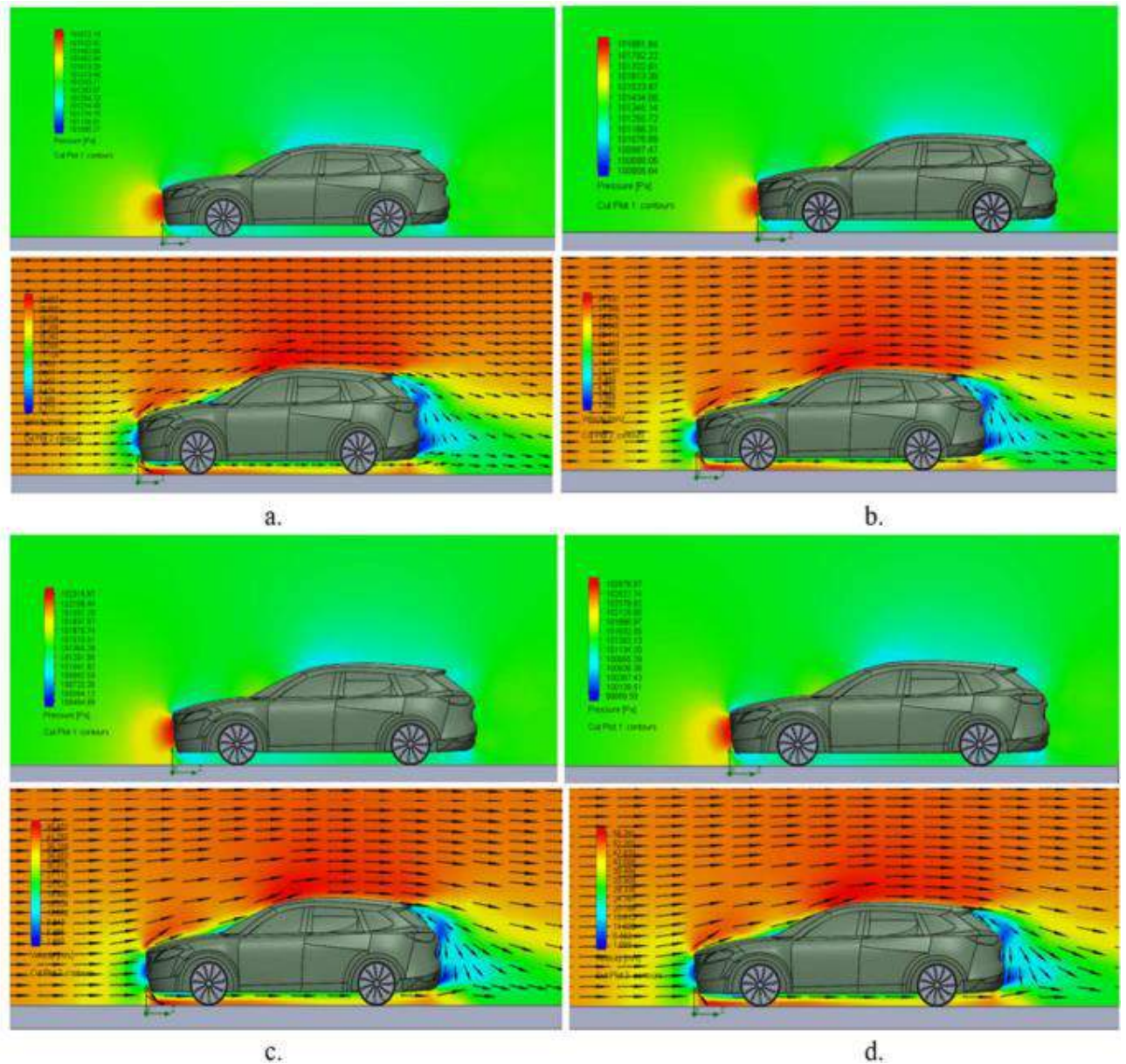


Рисунок 3.1 – Графіки швидкості та тиску, отримані для базового автомобіля при різній швидкості:

(a) - графік швидкості та тиску при 20 м/с, (b) - графік швидкості та тиску при 30 м/с, (c) - графік швидкості та тиску при 40 м/с, (d) - графік швидкості та тиску при 50 м/с.

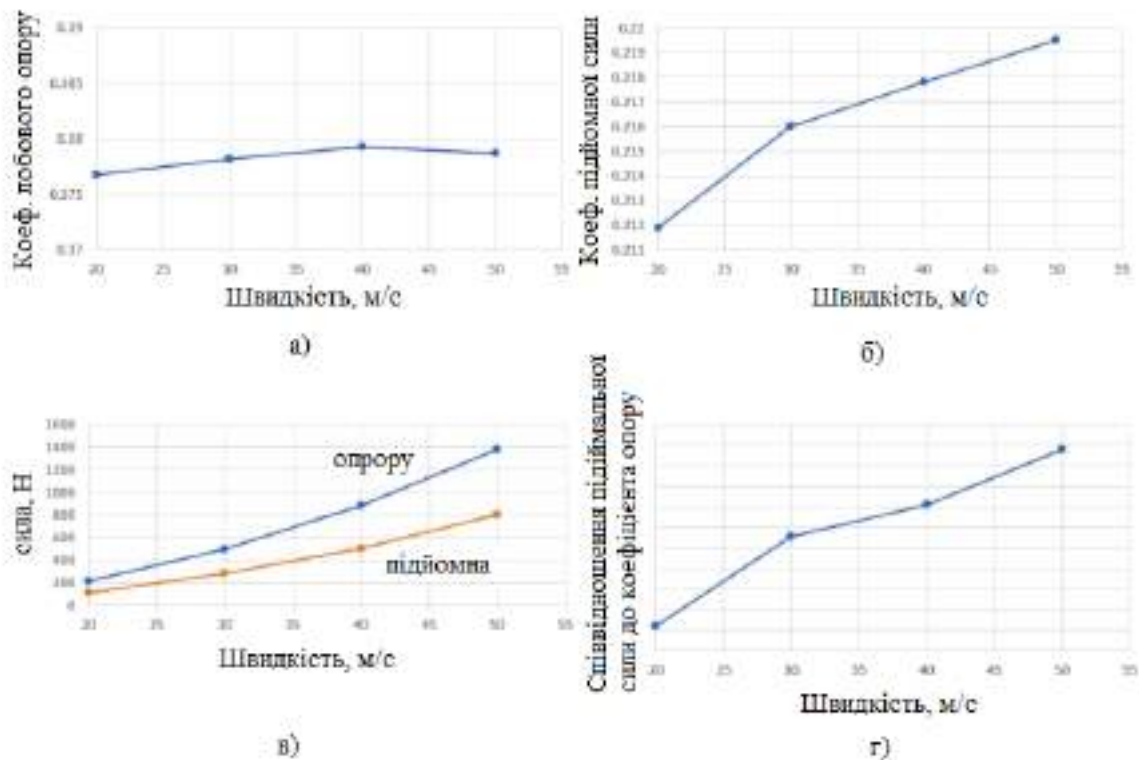


Рисунок 3.2 – Результати, отримані після аналізу стандартного автомобіля:  
 а) – залежність коefіцієнта лобового опору від швидкості, б) – залежність коefіцієнта підйомної сили від швидкості, в) - залежність сили від швидкості, г) - співвідношення підйомної сили до коefіцієнта опору відносно швидкості

### 3.2 CFD аналіз дифузора.

Проведено аналіз стандартного автомобіля з дифузором на чотирьох різних швидкостях. Модель виконується для зазначених швидкостей і під 6 різними кутами  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$ , як описано раніше. Випробування проводять при різних кутах нахилу дифузора по відношенню до швидкості. Це виконується для визначення відповідного кута з найменшими коefіцієнтами підйомної сили та лобового опору. Результати, отримані в результаті аналізу, представлені у вигляді графіка на рисунку 3.3.

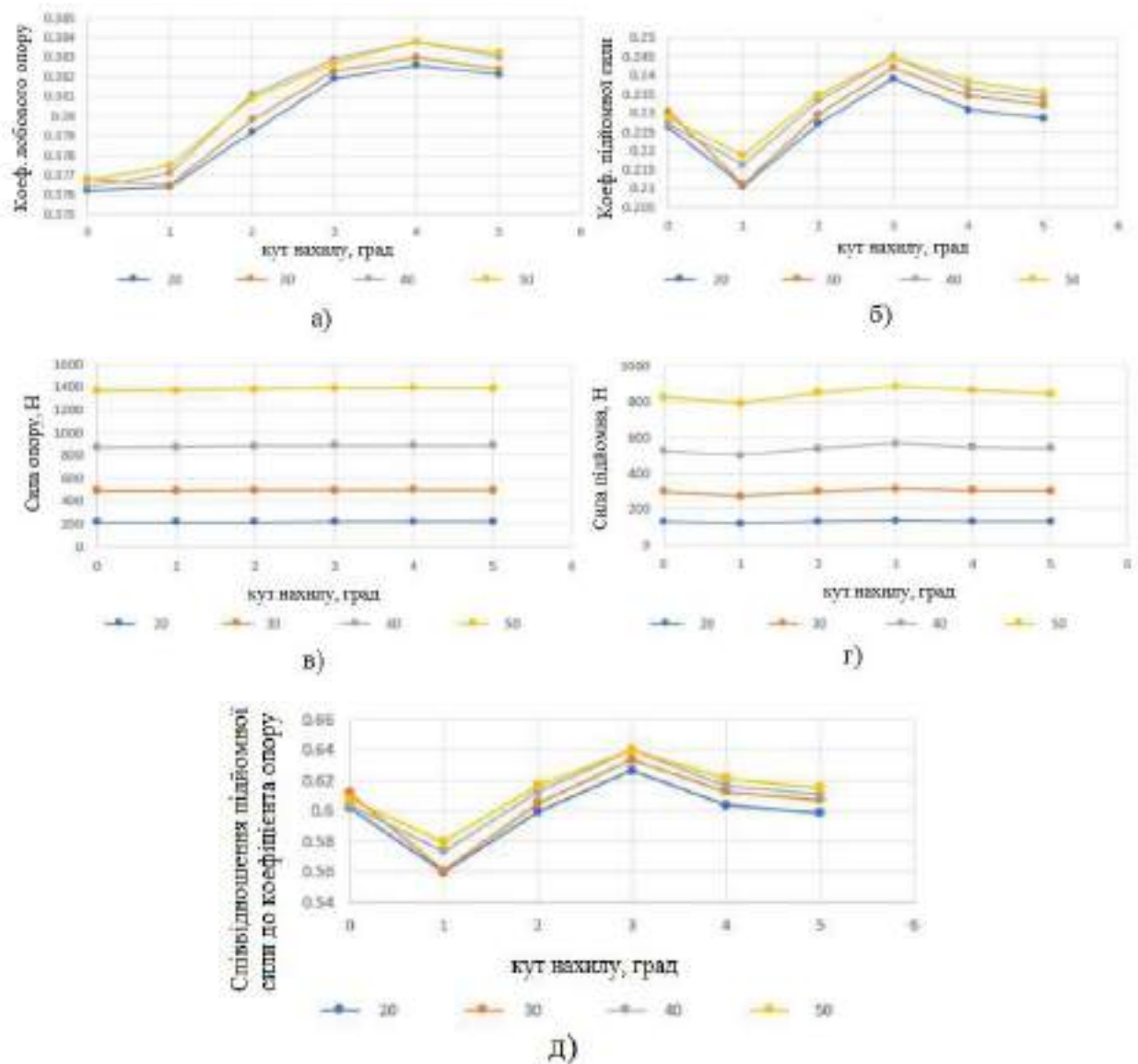


Рисунок 3.3 – Результат роботи дифузора зі штатною машиною для різних кутів нахилу відносно різних швидкостей:

- а) – залежність коефіцієнту лобового опору від кута нахилу, б) – залежність коефіцієнту підйомної сили від кута нахилу, в) – залежність сили опору від кута нахилу, г) – залежність підйомної сили від кута нахилу, д) – співвідношення підйомної сили до коефіцієнта опору відносно швидкості.

Графіки (в) і (г), що представляють силу опору та підйомну силу, сповіщають про постійне зростання зі збільшенням кута нахилу відносно швидкості. Графік (а) відображає зменшення коефіцієнтів опору під кутом 1° і поступово

зростає зі збільшенням кута нахилу дифузора. Коефіцієнт підйому на графіку (б) вказує на подібний результат, як на графіку (а). З отриманих результатів видно, що кут  $1^\circ$  має найменші коефіцієнти опору та підйомної сили порівняно з іншими кутами. Цей кут  $1^\circ$  розглядається як стандартний кут установки для дифузора в налаштуваннях конфігурації.

### 3.3 Аналіз CFD бічної спідниці.

Виконується аналіз стандартного автомобіля з боковою спідницею на чотирьох різних швидкостях. Випробування проводяться на висоті 205 мм, 215 мм, 225 мм, 235 мм і 245 мм відносно землі. Результати аналізу наведено у вигляді графіка, рис. 3.4. Це робиться для ідентифікації відповідної висоти бічної спідниці з найменшими коефіцієнтами підйому та опору по відношенню до поверхні дороги.

Графіки (в) і (г), що представляють силу опору та підйомну силу, сповіщають про постійне їх зростання зі збільшенням висоти бічної спідниці відносно поверхні дороги. При низьких швидкостях на графіку (а) коефіцієнт лобового опору спостерігається збільшення та зменшення зі зміною висоти, тоді як на більших швидкостях опір поступово збільшується. Подібним чином, коефіцієнт підйому на графіку (б) показує подібний результат, як і на графіку (а). З отриманих результатів видно, що на висоті 205 мм, яка є кліренсом автомобіля, найменший коефіцієнт лобового опору та підйомної сили. Ця висота 205 мм вважається стандартною висотою бічної спідниці в налаштуваннях конфігурації.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

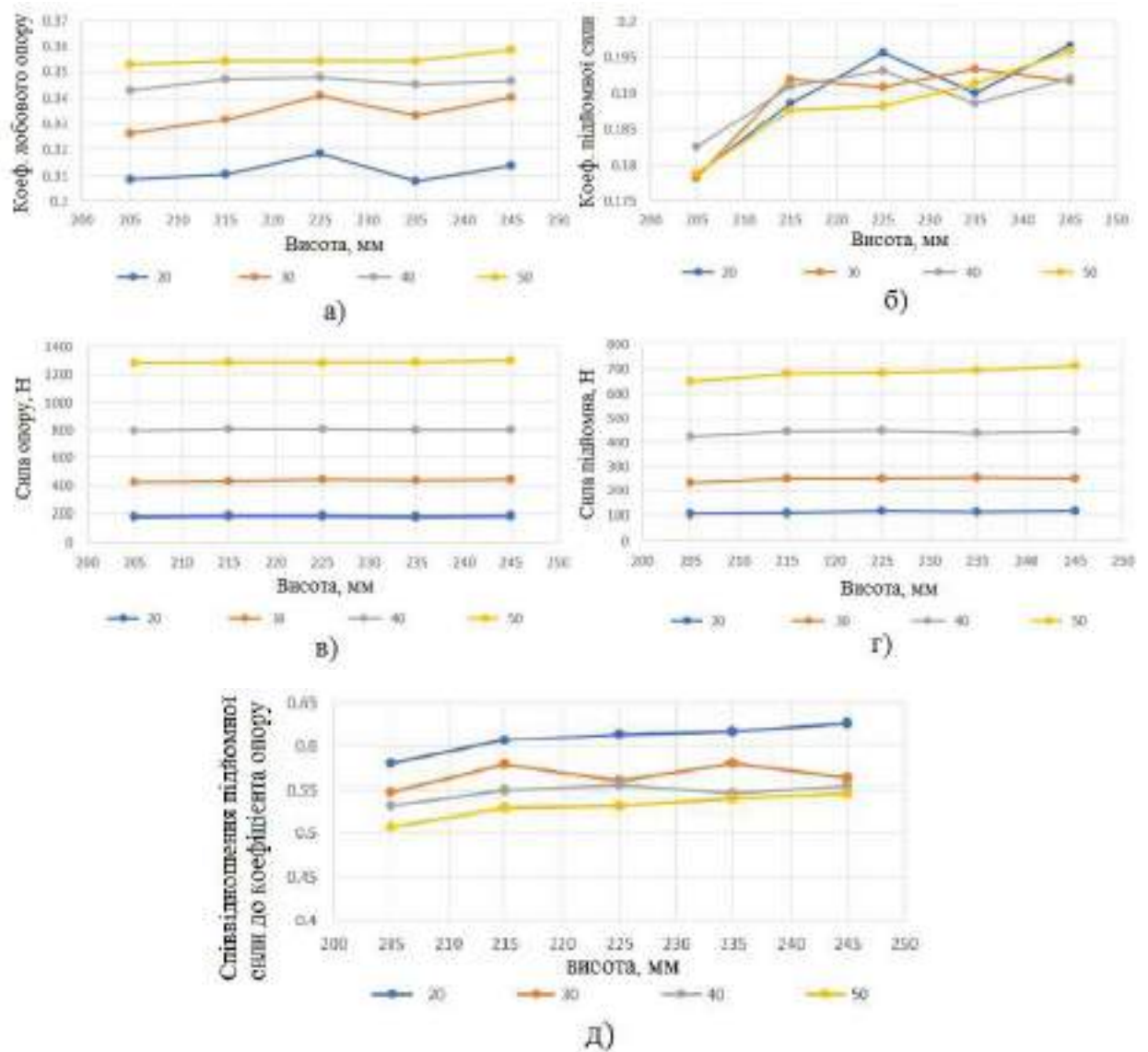


Рисунок 3.4 – Результати моделювання бічної спідниці зі штатним автомобілем для різних висот щодо поверхні дороги:

- а) – залежність коефіцієнту лобового опору від кута нахилу, б) – залежність коефіцієнту підйомної сили від кута нахилу, в) – залежність сили опору від кута нахилу, г) – залежність підйомної сили від кута нахилу, д) – співвідношення підйомної сили до коефіцієнта опору відносно швидкості.

### 3.4 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 1: спойлер.

Конфігурація 1, що складається зі спойлера, тестується під п'ятьма різними кутами нахилу  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ . Транспортний засіб має крутий кут вниз від даху до багажника, що спричиняє відрив потоку повітря. Це призводить до того, що потік повітря стає турбулентним, створюючи область низького тиску. З додавання спойлера, відділення повітряного потоку затримується, створюючи область високого тиску спереду спойлера, що у свою чергу, призводить до притискної сили. На рисунку 3.5 видно, що тиск на задньому верхньому кінці автомобіля біля спойлера збільшується зі збільшенням кута нахилу спойлера. Завдяки цьому збільшення високого тиску, підйомна сила зменшується, а притискна сила поступово збільшується. Так як спойлер зменшує швидкість повітря, відокремлення повітряного потоку затримується далі і викликає притискну силу. Отримані результати наведено у вигляді графіків на рис. 3.6.

Коефіцієнт лобового опору автомобіля також зростає зі збільшенням кута нахилу спойлера.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

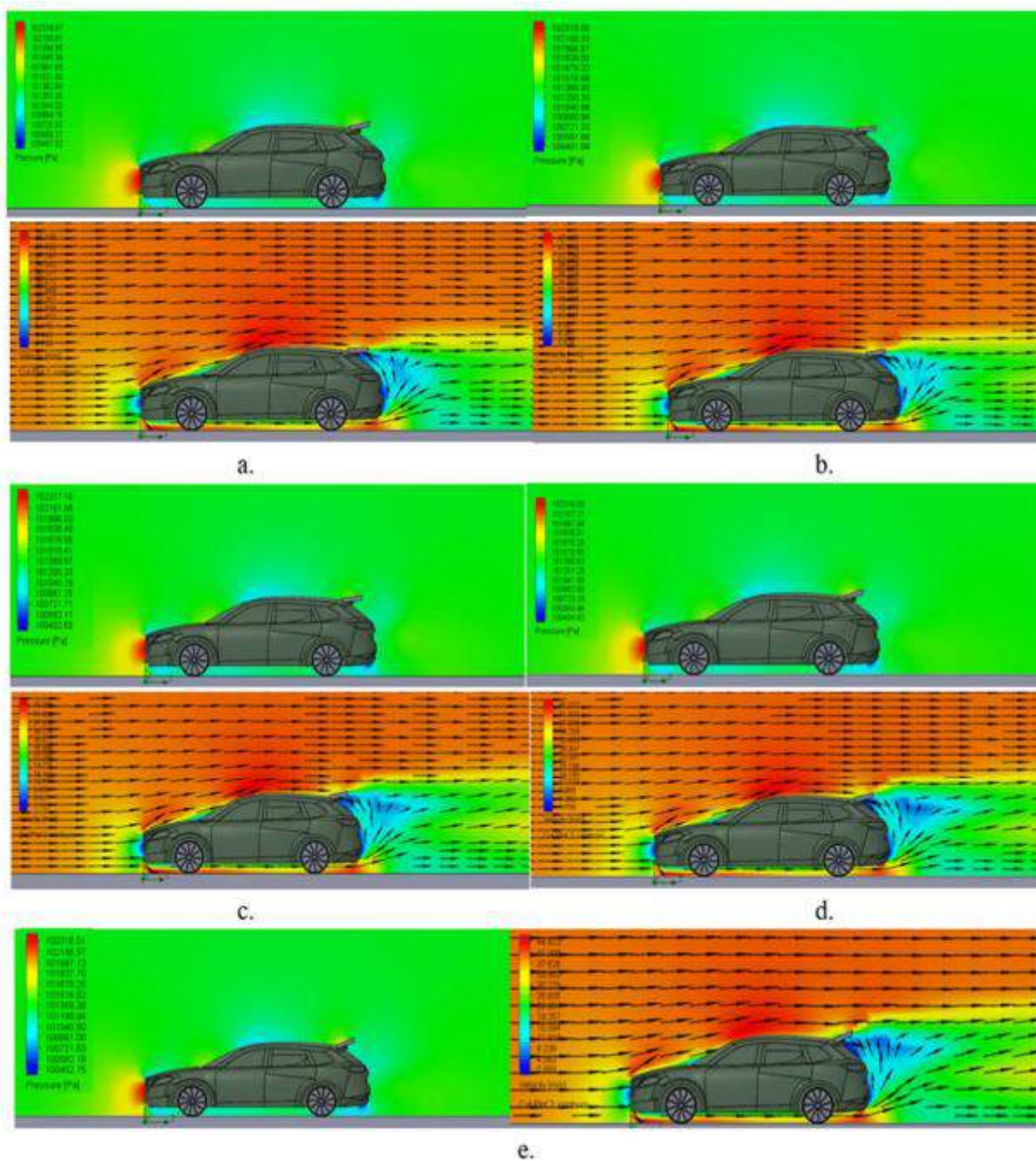


Рисунок 3.5 – Залежності швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером після виконання аналізу при 40 м/с для різних кутів спойлера:

а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

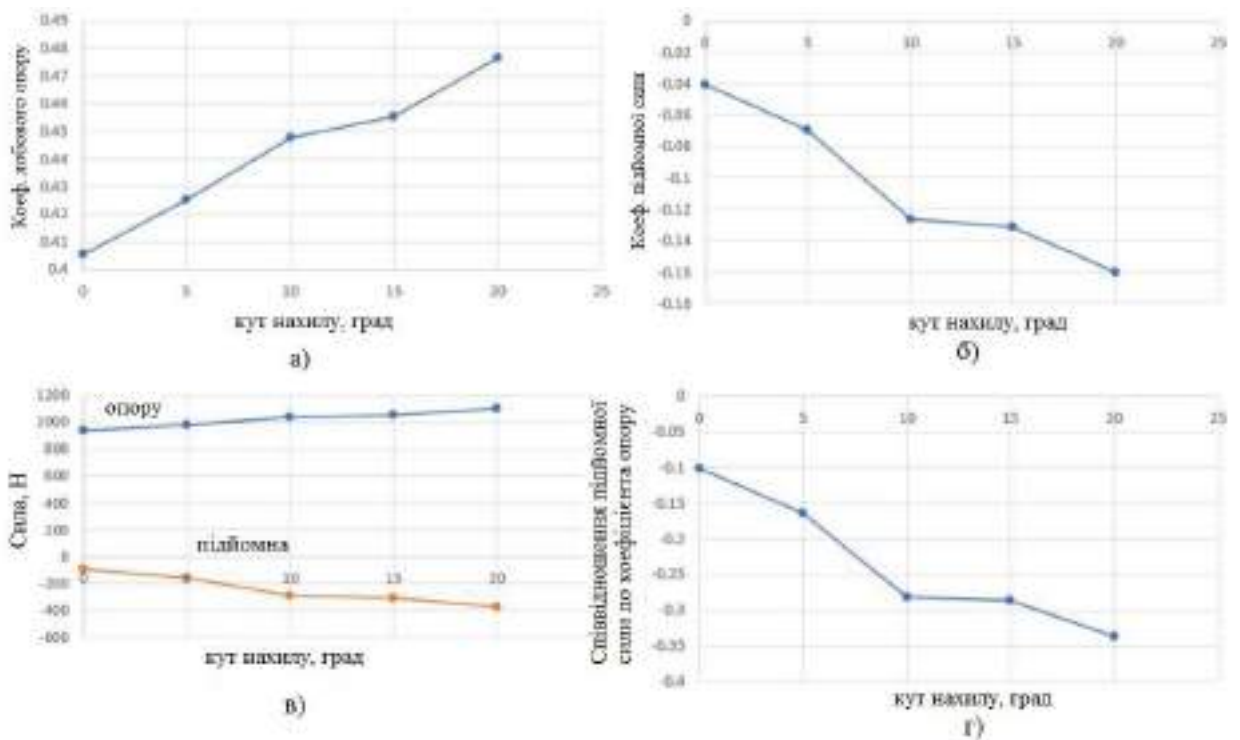


Рисунок 3.6 – Результати конфігурації 1:

а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

### 3.5 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 2: спойлер + дифузор

Конфігурація 2, що складається зі спойлера та дифузора, тестується під п'ятьма різними кутами спойлера, кут нахилу 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, зі стандартним кутом дифузора 1°. З рисунку 3.7, видно, що введення дифузора в задній нижній частині транспортного засобу створює область низького тиску.

Це пояснюється тим, що повітря, що тече під автомобілем, зазвичай рухається з нижчою швидкістю порівняно з повітрям, що над ним тече. Дифузор веде себе як напрямні лопатки, що направляють потік повітря. Отже, низька швидкість повітря, що тече під автомобілем, перетворюється на високу швидкість і область низького тиску.

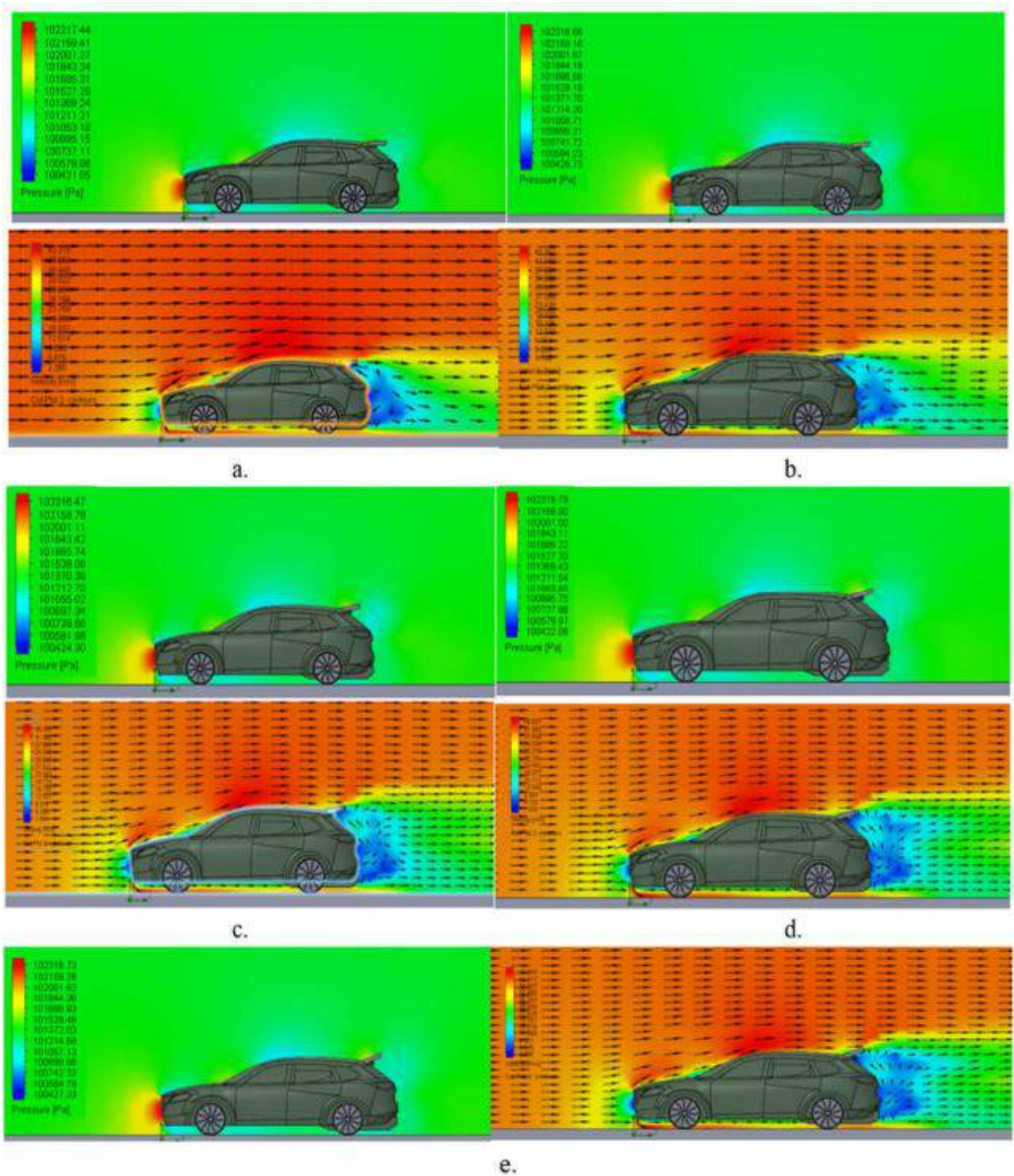


Рисунок 3.7 – Графіки швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером і дифузором після аналізу при 40 м/с для різних кутів спойлера:

а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

Цей низький тиск під автомобілем створює притискання до поверхні дороги, зменшуючи ефект підйому та збільшення притискної сили.

З графіка швидкості на рис. 3.7 видно, що відділення повітряного потоку ще більше затримується з додаванням дифузора. Тиск у задній частині автомобіля біля спойлера зростає зі збільшенням кута нахилу спойлера. За рахунок цього підвищується високий тиск, підйомна сила зменшується, а притискна сила поступово збільшується. Результати на рис. 3.8 показують, що опір коефіцієнту транспортного засобу одночасно зростає зі збільшенням кута нахилу спойлера і становить зворотний у випадку коефіцієнта підйому. Спойлер затримує відрив потоку повітря, створюючи високий тиск у передній частині спойлера, що у свою чергу, призводить до притискної сили.

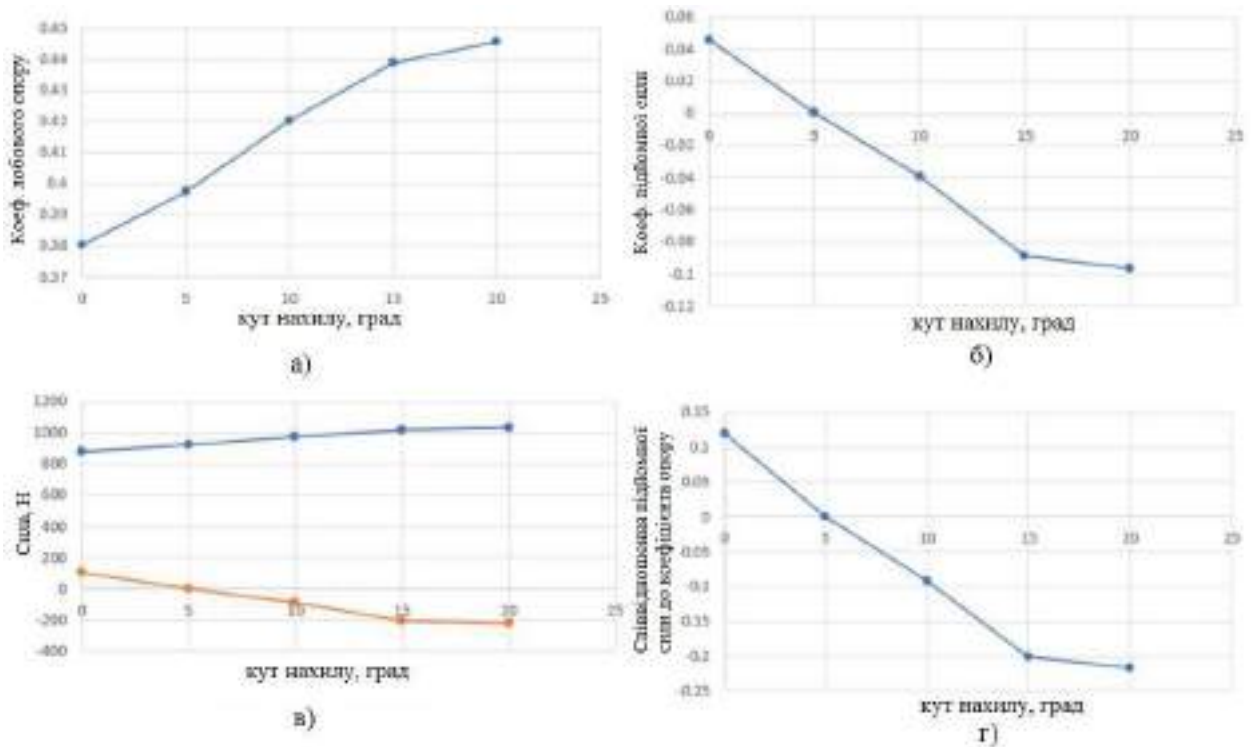


Рисунок 3.8 – Результати конфігурації 2:

- а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

### 3.6. Аналіз CFD автомобіля з конфігурацією 3: спойлер + бічна спідниця

Конфігурація 3 складається зі спойлера та бічної спідниці, яка перевіряється під п'ятьма різними кутами спойлера, кут нахилу  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ , зі стандартною висотою бортика 205 мм. З рисунку 3.9 видно, що графіки тиску та швидкості подібні до графіків конфігурації 1. Причина в тому, що бічні пороги мають тенденцію зменшувати високий тиск повітря, що тече з боків автомобіля, та область низького тиску під автомобілем. Найголовніше те, що бічна спідниця не зменшує величину тиску повітря, що тече по боках автомобіля, але вона умовно розколює днище автомобіля на дві частини.

По-перше, днище забезпечує високу швидкість і низький тиск, а по-друге, високий тиск і область на боці автомобіля. За відсутності цієї барикади між ними, повітря з боків кидається під автомобіль, що призводить до зменшення притискної сили.

Ефективність бічної спідниці найкраще проявляється, коли автомобіль знаходиться близько до землі, тобто, чим ближче бокова спідниця прилягає до землі, тим більша створювана притискна сила. В даному випадку нижня поверхня автомобіля не дуже близько до землі, тому ефективність мінімальна. Спойлер в поєднанні з боковою спідницею, збільшує тиск у задній частині автомобіля біля спойлера зі збільшенням кут нахилу спойлера, як показано на рис. 3.10. За рахунок цього підвищується підйомна сила високого тиску зменшується, а притискна сила збільшується. Потік сепарації повітря затримується за допомогою спойлера, що забезпечує плавний потік повітря.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

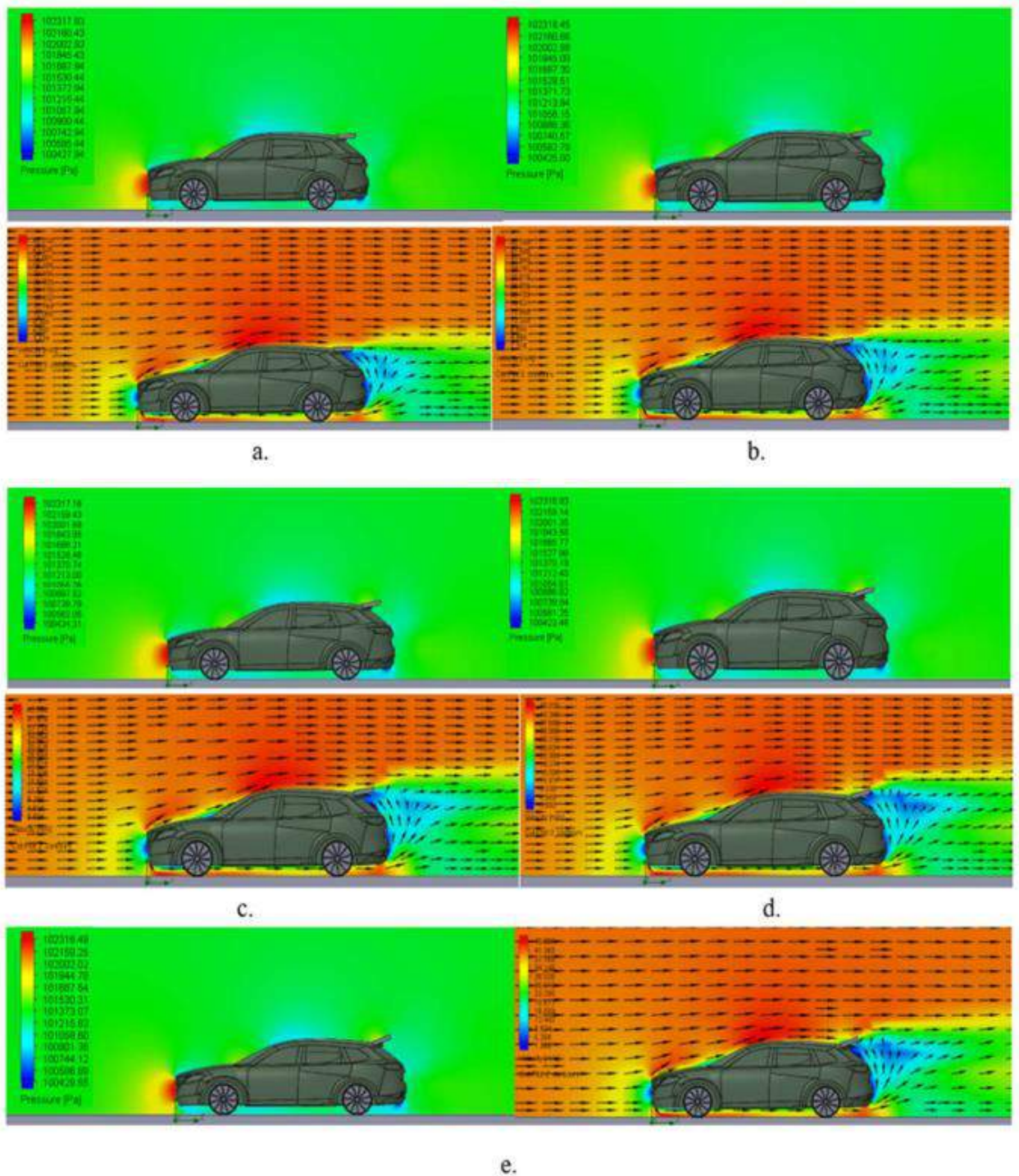


Рисунок 3.9 – Діаграми швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером і боковою спідницею після аналізу при швидкості 40 м/с для різних кутів спойлера: а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

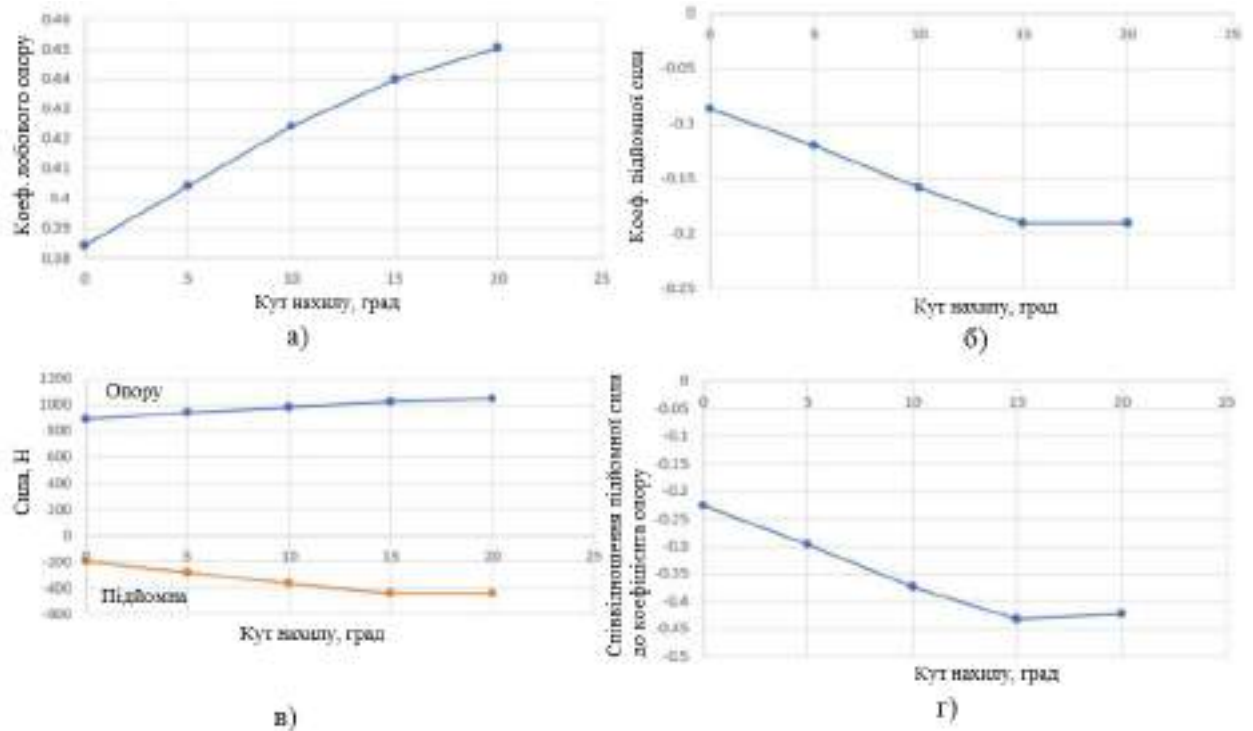


Рисунок 3.10 – Результати конфігурації 3:

а) - коєфіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коєфіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коєфіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

### 3.7 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 4: спойлер + спліттер

Конфігурація 4, що складається зі спойлера та спліттера, тестується під п'ятьма різними кутами спойлера кут нахилу 0°, 5°, 10°, 15°, 20°. Коли автомобіль рухається з більшою швидкістю, у передній частині тиск повітря в автомобілі щільно збудований. Більшість потоків повітря з низькою швидкістю під високим тиском під машиною. Оскільки повітря під високим тиском тече під автомобілем, повітря низького тиску має тенденцію текти над автомобілем. За рахунок цієї різниці низький тиск і високий тиск діють на нижній і верхній кінці автомобіля, автомобіль відчуває підйом, що призводить до зниження тяги.

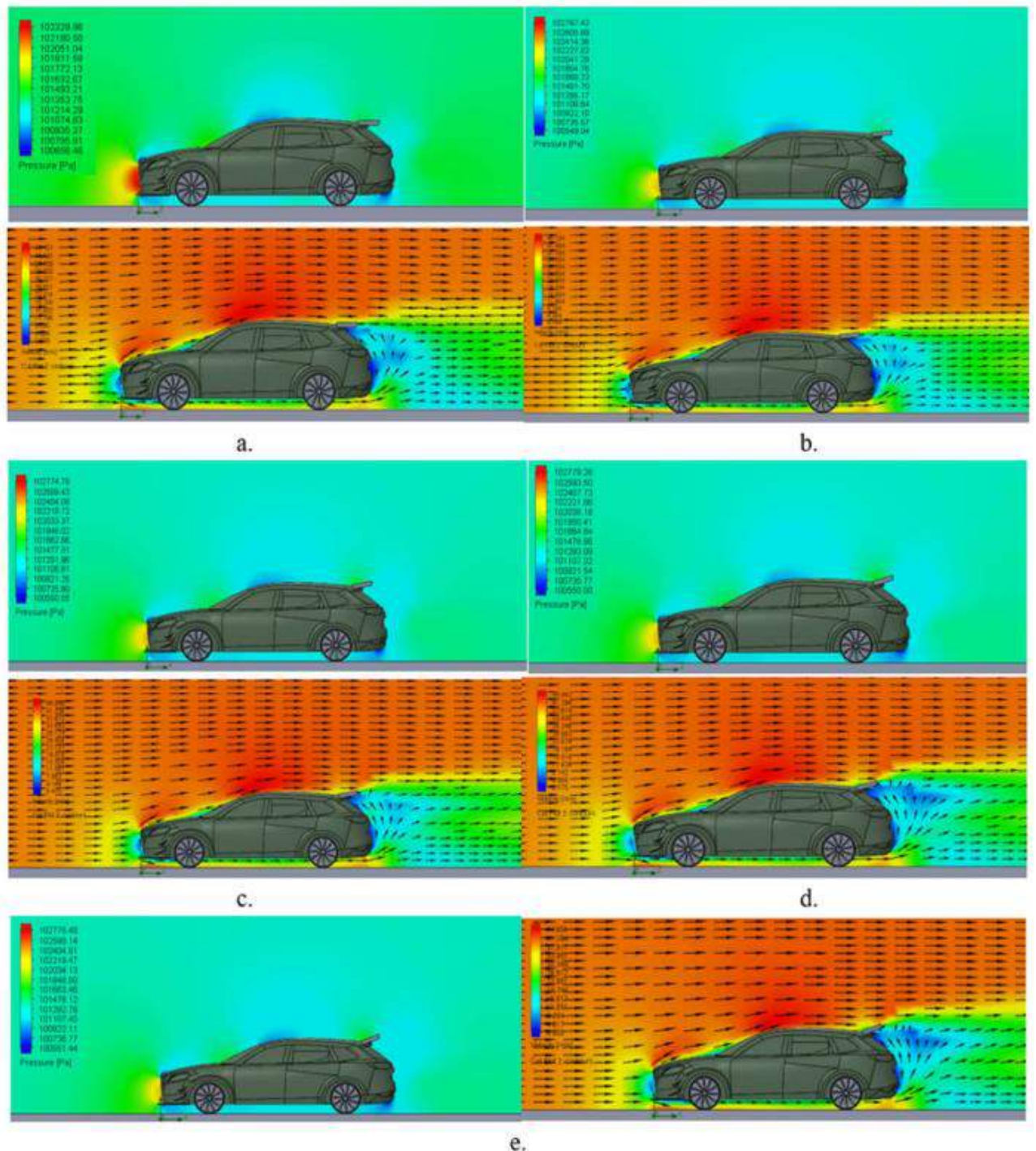


Рисунок 3.11 – Графіки швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером і спліттером після аналізу при швидкості 40 м/с для різних кутів спойлера: а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

З рисунку 3.11 видно, що високий тиск, який утворився навколо переднього бампера починає текти вгору через автомобіль і через спліттер.

					КВАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки повітря надходить під високим тиском над автомобілем високошвидкісне повітря з низьким тиском тече під автомобілем. Це призводить до збільшення притискної сили, яка допомагає автомобілю прилягати до землі, забезпечуючи краще зчеплення та контроль стабільності.

Крім того, до передньої частини автомобіля прикріплені дві маленькі вутки, які підтримують високий тиск, повітря навколо автомобіля не надходить до області низького тиску під автомобілем, забезпечуючи кращу притискну силу. Спойлер в цьому випадку веде себе подібно конфігурації 1, але в поєднанні зі спліттером тиск у задній частині транспортного засобу зростає зі збільшенням кута нахилу спойлера, як показано на графіку (а) на рис. 3.12.

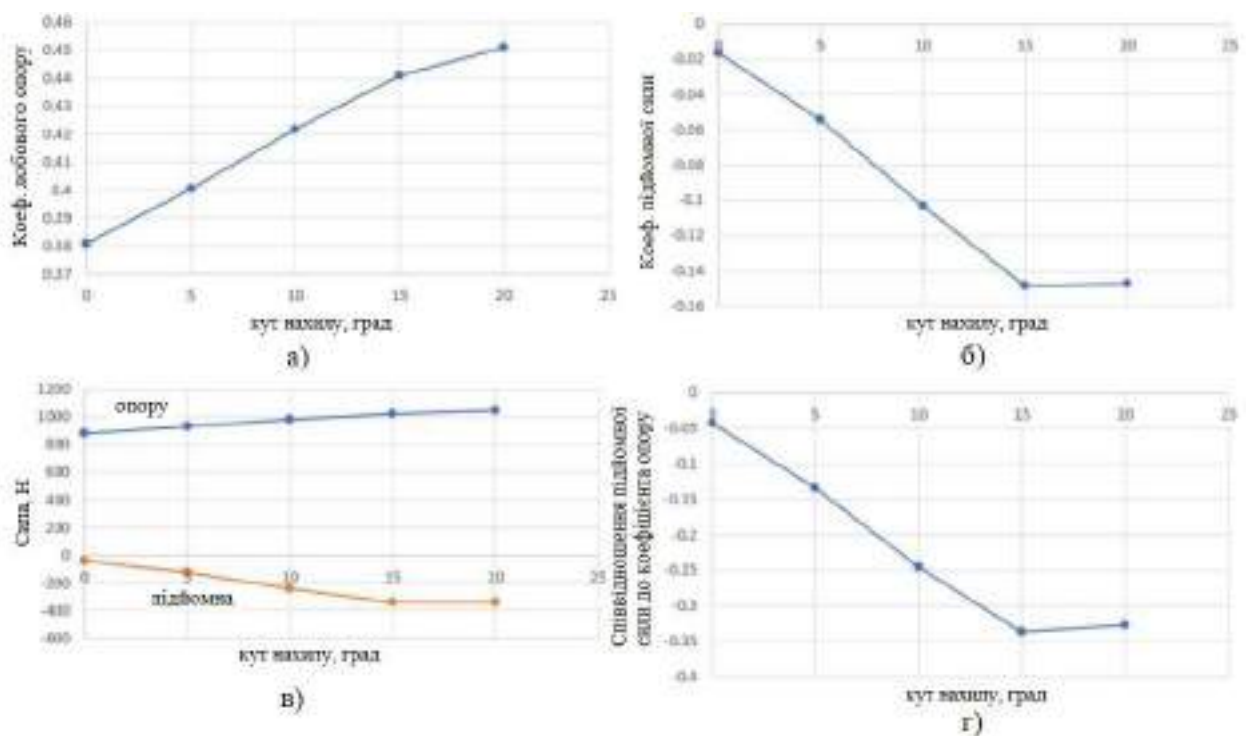


Рисунок 3.12 – Результати конфігурації 4:

- а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

Через це підвищення високого тиску підйомна сила зменшується, що спостерігаються на графіку (в), і притискна сила збільшується. Коефіцієнт опору автомобіля незначно збільшується зі збільшенням кута нахилу спойлера.

### 3.8 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 5: спойлер + дифузор + бічна спідниця

Конфігурація 5 складається з комбінації: спойлера, дифузора та бічної спідниці при п'яти різних кутах нахилу спойлера  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ , зі стандартним кутом дифузора  $1^\circ$  і бічного порога на висоті 205 мм від поверхні дороги. З рис. 3.13, з дифузором, у задній нижній частині автомобіля створюється область низького тиску. Це тому, що повітря, що тече під автомобілем, зазвичай рухається з нижчою швидкістю порівняно з повітрям, що тече над ним.

Дифузор веде себе як напрямні лопатки, що направляють потік повітря. Це низький тиск під автомобілем, що створює присмоктування до поверхні дороги, зменшуючи ефект підйому та збільшуючи притискну силу. Найважливішим фактом є те, що бічна спідниця не зменшить величину тиску повітря, що надходить на сторони автомобіля, але вони вигідно розділяють дно автомобіля на дві частини.

Ефективність бокової спідниці найкраще проявляється, коли вона розташована ближче до землі, чим ближче бокова спідниця прилягає до землі, тим більша створювана притискна сила. В цьому випадку бортик не дуже близько до землі, тому ефективність мінімальна.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

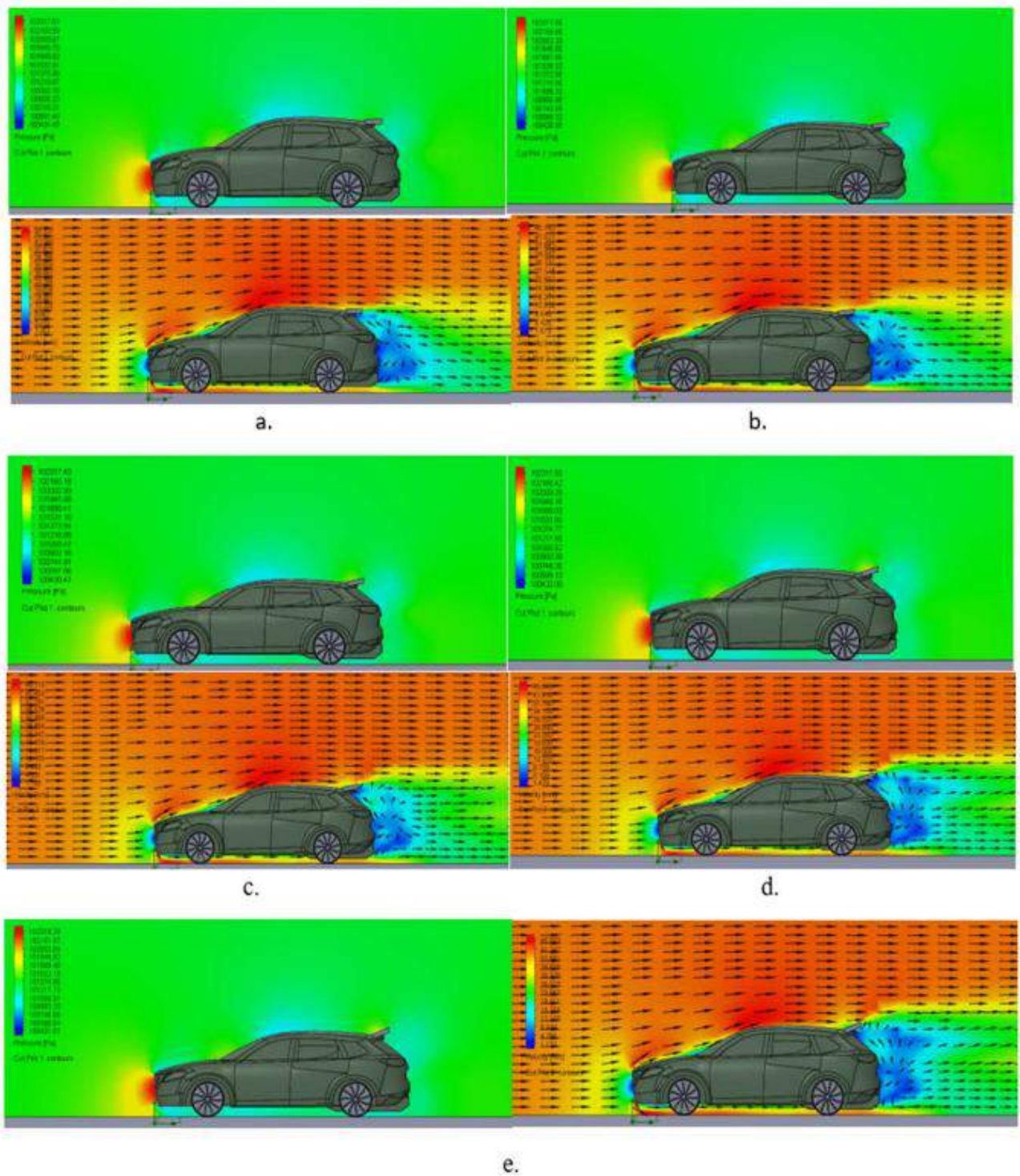


Рисунок 3.13 – Графіки швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером, дифузором і бічним бортом після аналізу виконаного при 40 м/с для різних кутів спойлера: а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

На рис. 3.13 тиск на задньому кінці транспортного засобу біля спойлера збільшується зі збільшенням кута нахилу спойлера. Збільшення підйомної сили високого тиску, показане на рис. 3.14 (в), поступово зменшується, а притискна сила збільшується. З графіка швидкості на рис. 3.13 (а,b,c,d,e) зі збільшенням кута нахилу спойлера, відділення потоку повітря додатково затримується.

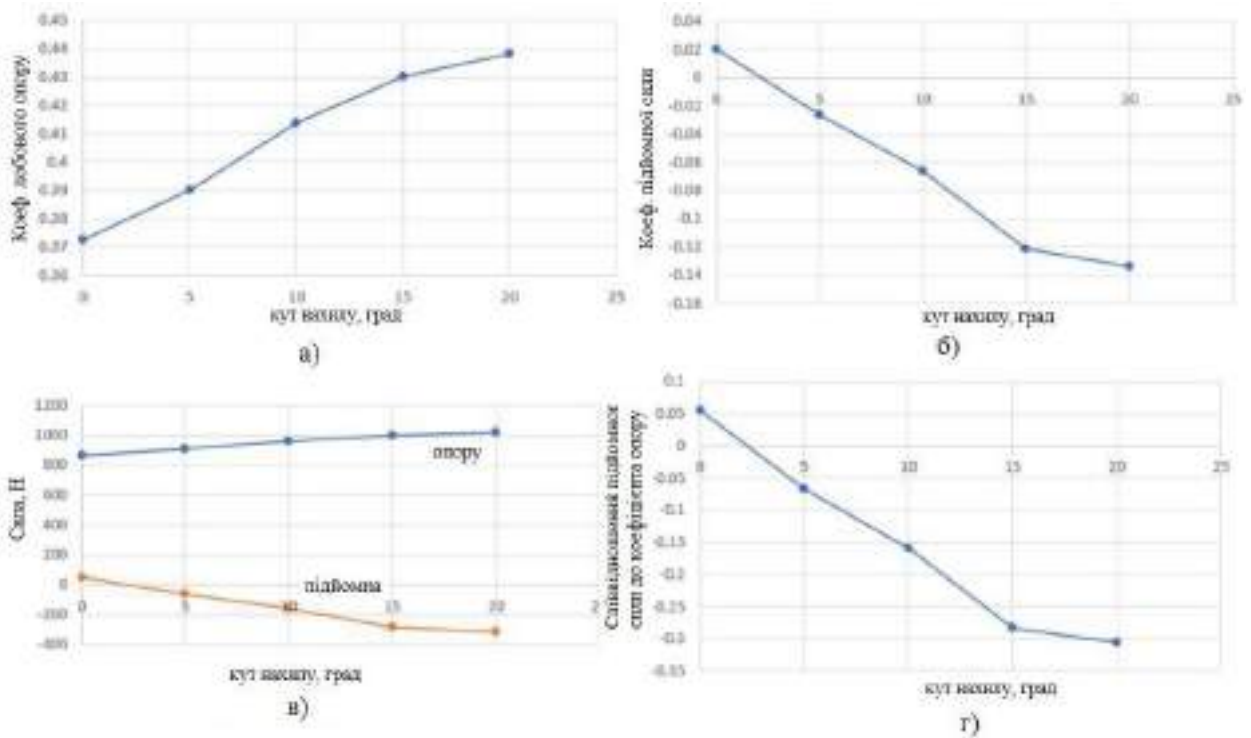


Рисунок 3.14 – Результати конфігурації 5:

а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

### 3.9 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 6: спойлер + дифузор + спліттер

Конфігурація 6 складається з комбінації спойлера, дифузора та спліттера при п'яти різних кутів нахилу спойлера 0°, 5°, 10°, 15°, 20°. З рис.

3.15 видно, що тиск на задній верхній частині автомобіля біля спойлера збільшується зі збільшенням кута нахилу спойлера. Завдяки цьому збільшенню високого тиску підйомна сила зменшується, а сила притиску поступово зменшується.

З графіків тиску на рис. 3.15 видно, що в задній нижній частині транспортного засобу спостерігається зниження тиску. Це тому, що повітря, що тече під автомобілем, рухається з нижчою швидкістю порівняно з повітрям, що тече над ним. Низько швидкісний повітряний потік під автомобілем перетворюється на високу швидкість і область низького тиску. Цей низький тиск під автомобілем створює присмоктування до поверхні дороги, зменшуючи ефект підйому і збільшення притискової сили. Повітря високого тиску тече над автомобілем, повітря низького тиску тече під машиною. Завдяки цій різниці в низькому і високому тиску, що діє на нижній і верхній кінець автомобіля, автомобіль відчуває нижчий підйом, що призводить до кращого зчеплення.

На зображенні вище видно високий тиск, який створювався навколо фронту бампера автомобіля починає текти вгору по машині через розгалужувач. Спойлер, комбінований за допомогою спліттера та дифузора створює область високого тиску в задній частині автомобіля поблизу самого спойлера, який збільшується зі збільшенням кута нахилу спойлера. Це збільшення високого тиску викликає зменшення підйомної сили, а сила притиску збільшується. Поділ потоку повітря в цій конфігурації забезпечує плавний потік повітря та зменшення опору, рис. 3.16.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

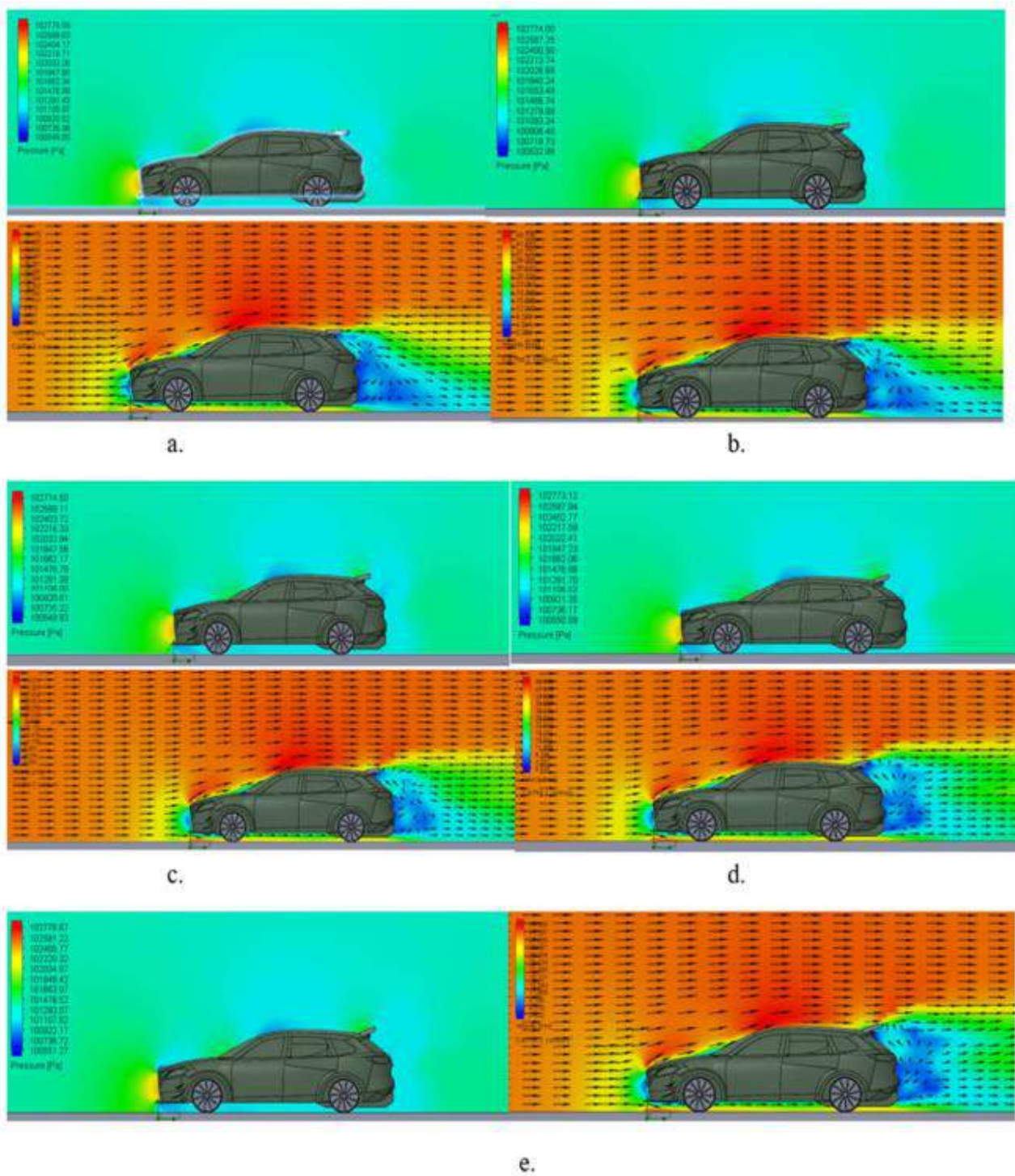


Рисунок 3.15 – Графіки швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером, дифуззором і спліттером після аналізу виконаного при 40 м/с для різних кутів спойлера: а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

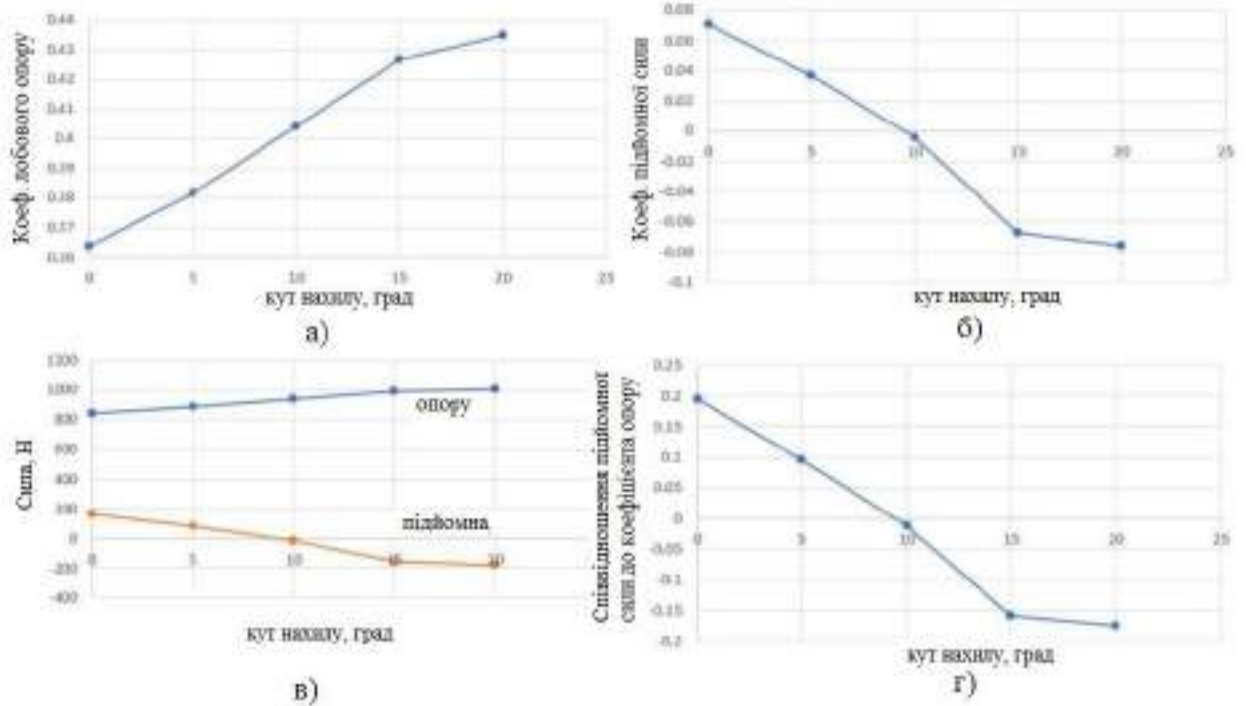


Рисунок 3.16 – Результати конфігурації 6:

а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

### 3.10 CFD аналіз автомобіля з конфігурацією 7: спойлер + дифузор + спліттер + бічні спідниці

Конфігурація 7, що складається з комбінації всіх аеродинамічних особливостей: спойлер, дифузор, бортик і спліттер тестуються під п'ятьма різними кутами нахилу спойлера 0°, 5°, 10°, 15°, 20°. З додаванням спойлера відділення повітряного потоку затримується, створюючи високий рівень області тиску в передній частині спойлера, у свою чергу, призводить до притискної сили. З рисунку 3.17 видно, що тиск у задній верхній частині автомобіля біля спойлера зростає зі збільшенням кут нахилу спойлера.

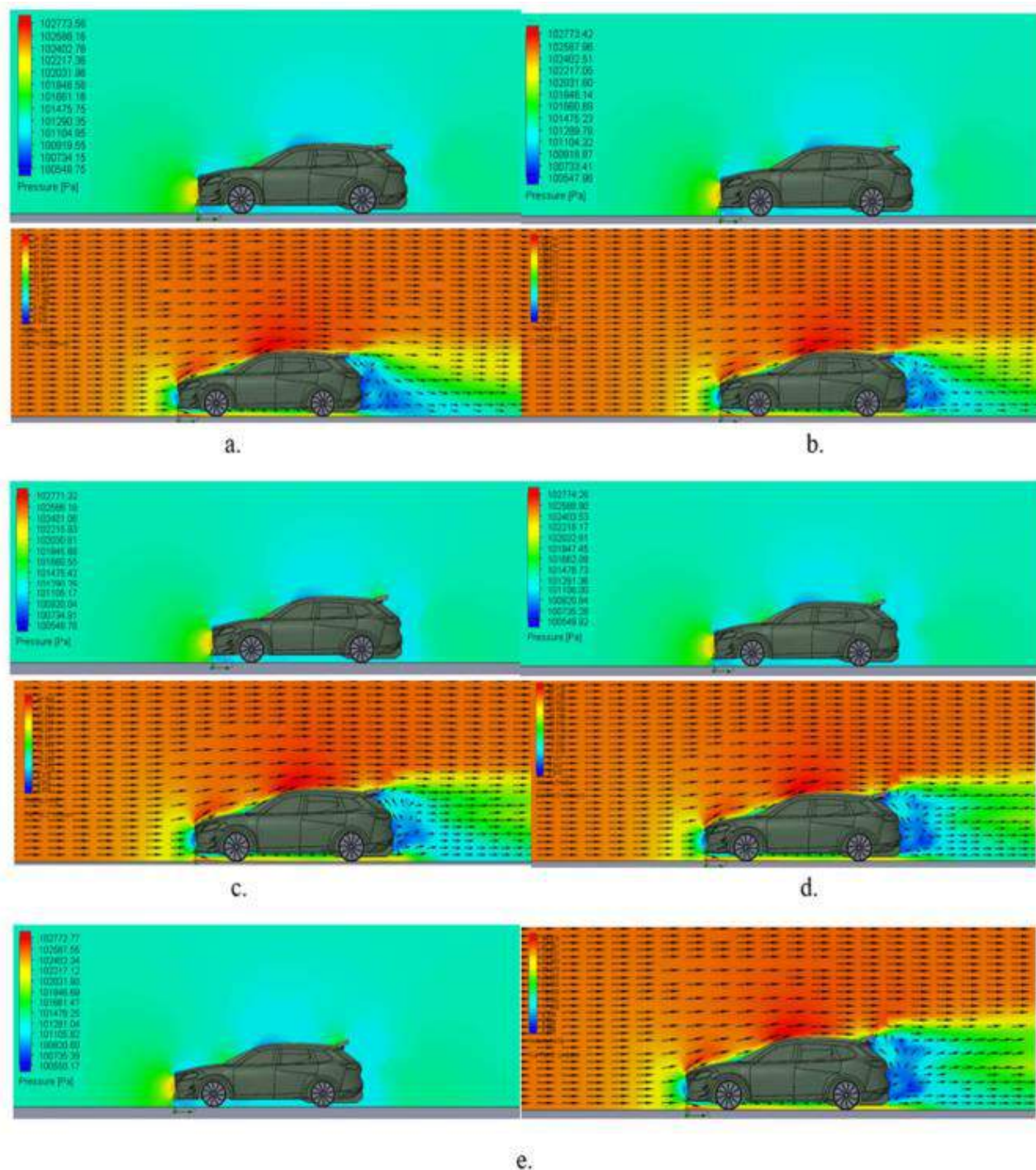


Рисунок 3.17 – Графіки швидкості та тиску, отримані для стандартного автомобіля зі спойлером, дифузором, боковою спідницею та роздільником після аналізу виконаного при 40 м/с для різних кутів спойлера: а) - при куті 0°, (б) –при куті 5°, (с) - при куті 10°, (d) при куті 15°, (е) при куті 20°

З додаванням дифузора в задній нижній частині автомобіля створюється область низького тиску. Повітря, що тече під автомобілем,

рухається з нижчою швидкістю порівняно з повітрям, що тече над ним. Цей низький тиск під автомобілем створює присмоктування до поверхні дороги, зменшуючи ефект підйому та збільшення притискної сили.

На рис. 3.17, показаному вище, спостерігається високий тиск, який створювався навколо фронту бампера автомобіля, потік повітря починає текти вгору по машині через розгалужувач. Від високого тиску повітря тече над автомобілем, високошвидкісне повітря низького тиску тече під автомобілем.

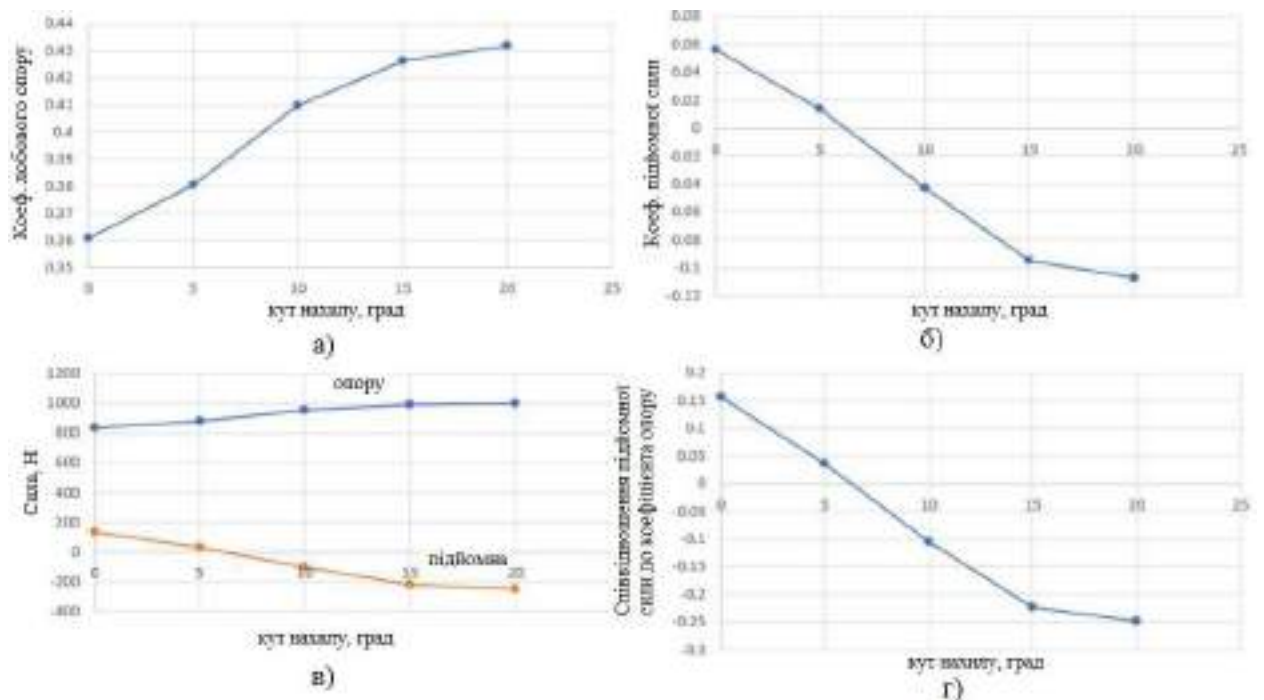


Рисунок 3.18 – Результати конфігурації 7:

- а) - коефіцієнт лобового опору від кута нахилу, б) - коефіцієнт підйомної сили від кута нахилу, в) - сили від кута нахилу, г) - співвідношення коефіцієнта підйомної сили та лобового опору від кута нахилу.

Ефективність бокової спідниці найкраще показана, коли вона розташована ближче до землі, маючи на увазі, що бічна спідниця розташована ближче до ґрунту, більша створювана притискна сила. У цьому випадку бортник не дуже близько до землі тому ефективність мінімальна. На графіку розрізу спойлер в поєднанні з дифузором, спліттер і бічна спідниця

сприяють кращому відокремленню повітря в задній частині автомобіля поблизу спойлера. На рис. 3.18 показано, що підйомна сила високого тиску зменшується, що означає поступове збільшення сили притиску. Поділ потоку повітря затримується за допомогою аеродинамічних особливостей та забезпечення плавного потоку повітря.

Графік на рис. 3.19 відображає сім конфігурацій, перевірених на коефіцієнт підйому. Вісь Y являє собою коефіцієнт підйому  $C_l$ , а вісь X являє собою кут нахилу спойлера. В даному випадку на графіку спостерігається постійне зменшення, причиною чого є те, що притискна сила на кожній протестованій конфігурації збільшується а коефіцієнт підйомної сили зменшується. Це зменшення коефіцієнта підйомної сили зведено в таблицю 3.1.

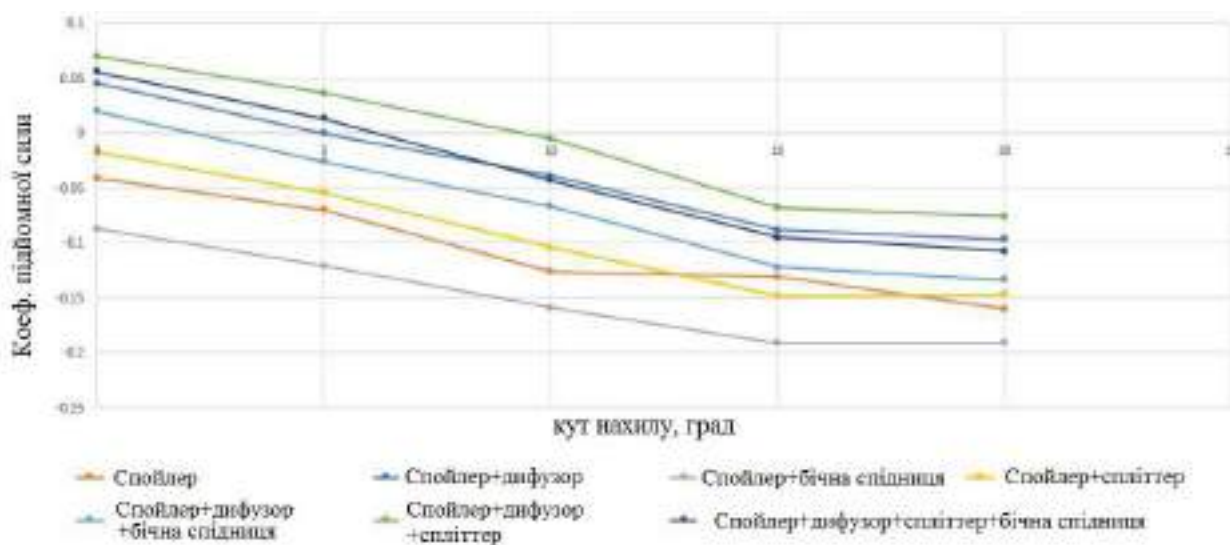


Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнта підйомної сили від кута нахилу спойлера

Кожна конфігурація має різні значення для 5 різних спойлерів. З графіка видно, що конфігурація спойлера і бічної спідниці відчуває максимальну притискну силу, а спойлер, дифузор і конфігурація спліттера відчуває мінімальну притискну силу.

Графік на рис. 3.20 представляє сім конфігурацій, перевірених на коефіцієнт лобового опору. Вісь Y являє собою коефіцієнт лобового опору  $C_d$ , а вісь X являє собою кут нахилу спойлера. У цьому випадку на графіку спостерігається постійне збільшення коефіцієнтів лобового опору. З графіка видно, що спойлер відчуває максимальний опір, а конфігурація зі спойлером, дифузором, боковою спідницею та спліттером відчуває найменший опір.

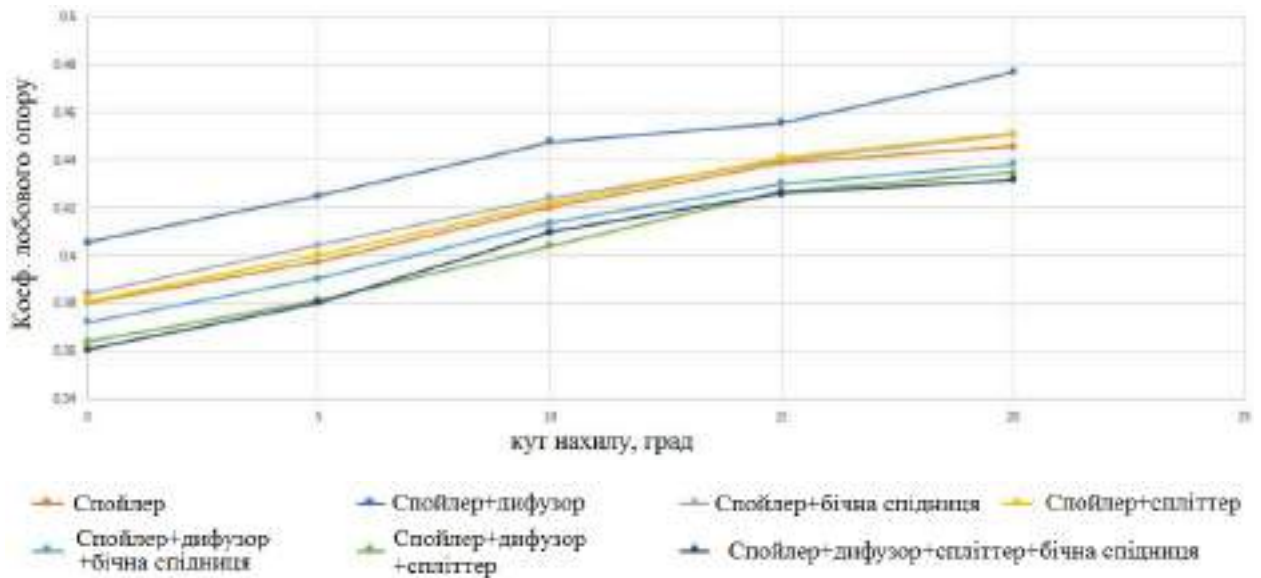


Рисунок 3.20 – Залежність коефіцієнта опору від кута нахилу спойлера

Графіки на рис. 3.21 демонструють сім конфігурацій, перевірених на підйомну силу. Вісь Y представляє коефіцієнт підйомної сили, а вісь X представляє кут нахилу спойлера. У цьому випадку графік має стійке зниження, причина в тому, що в міру притискної сили на кожній трестованій конфігурації, при збільшенні зусилля, підйомна сила зменшується. Це зменшення підйомної сили розглядається як притискна сила. Кожна конфігурація має різні значення для перевірених 5 різних кутів нахилу спойлера. З графіка видно, що спойлер і бічна сторона конфігурації спідниці відчуває максимальну притискну силу, тому що вони мають найменший коефіцієнт підйому, а спойлер, дифузор і конфігурація розгалужувача відчують найменшу притискну силу з простої причини, що вони мають максимальний коефіцієнт підйомної сили.

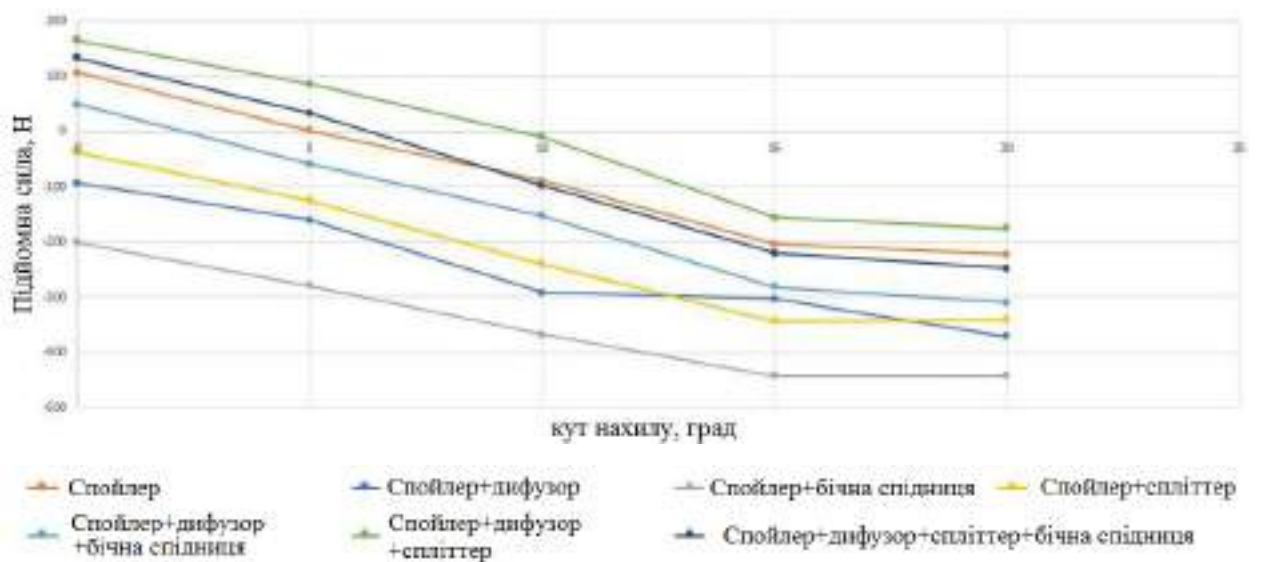


Рисунок 3.21 – Підйомна сила від кута нахилу спойлера

Графік на рис. 3.22 відображає сім конфігурацій, перевірених на силу опору. Вісь Y представляє коефіцієнт підйомної сили, а вісь X - кут нахилу спойлера. У цьому випадку на графіку спостерігається постійне збільшення сили опору. З графіка видно, що конфігурація спойлера переживає максимальну силу лобового опору, оскільки вони мають найвищий коефіцієнт лобового опору, а також спойлер, дифузор, бокова спідниця та конфігурація спліттера відчувають найменшу силу опору з простої причини, що вони мають найменший коефіцієнт лобового опору.

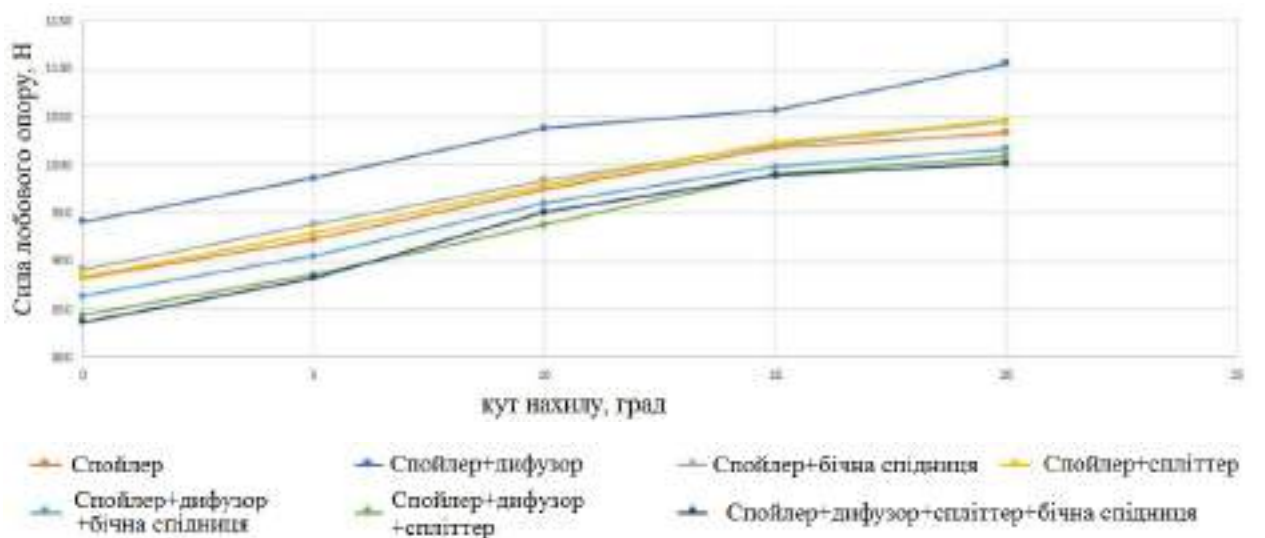


Рисунок 3.22 – Залежність сили опору від кута нахилу спойлера.

Графік на рис. 3.23 показує співвідношення підйомної сили та лобового опору від кута нахилу для всіх проаналізованих конфігурацій. Вісь X представляє кут нахилу спойлера, а вісь Y являє собою коефіцієнт підйомної сили. Цей графік відображає середні характеристики підйому коефіцієнта і коефіцієнт лобового опору, складені разом як співвідношення. Як видно з графіка, він має стійкий характер, спочатку зменшується і стабілізується під кутом 15°. Цей кут 15° вважається критичним кутом.

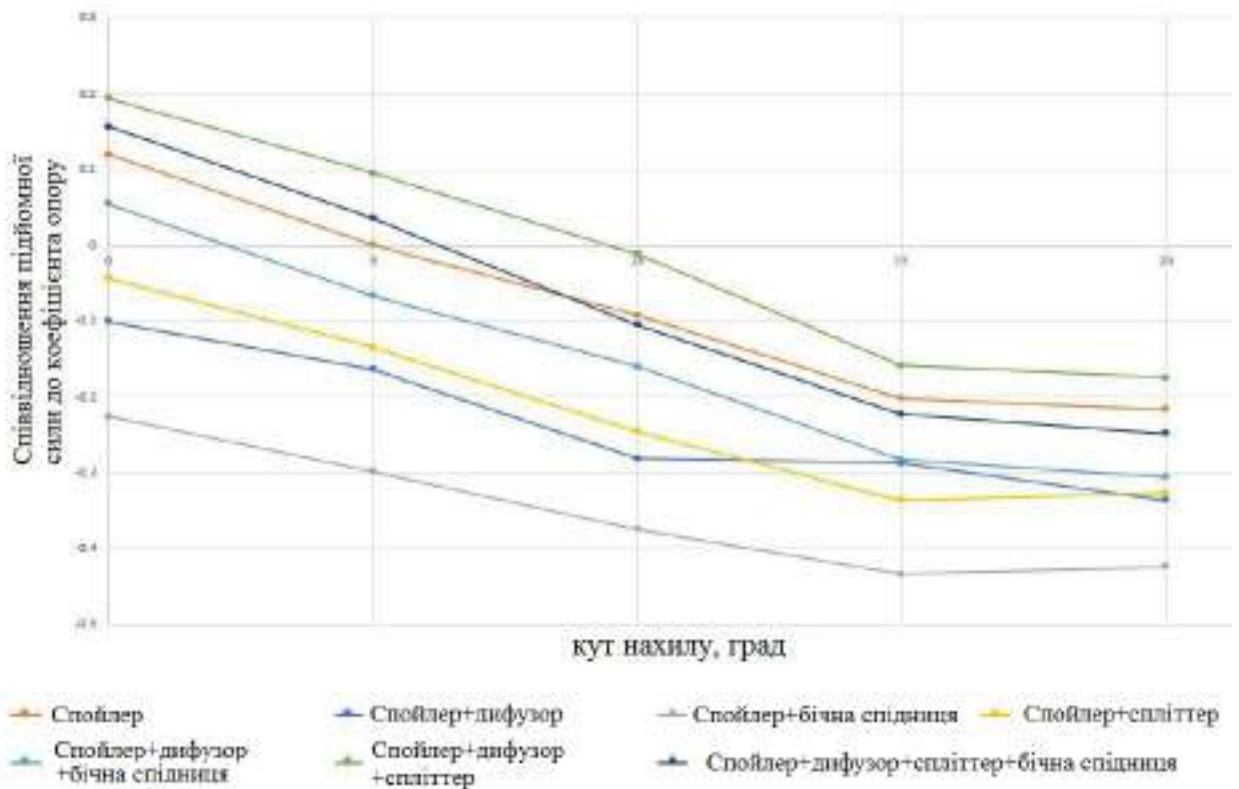


Рисунок 3.23 – Відношення підйомної сили до лобового опору від кута нахилу

Коефіцієнти тиску є добре відомим параметром при обчисленні аеродинаміки автомобіля, що вивчає стисливість і нестисливість рідини. Це безрозмірна величина і виражається як [3, 5]:

$$C_p = \frac{(p - p_{ref})}{\frac{1}{2}\rho v^2}; \quad (3.5)$$

де:  $p_{ref}$  – опорний тиск,  $p$  – розрахунковий середній тиск,  $v$  – швидкість рідини,  $\rho$  – густина рідини.

На рисунках 3.24 – 3.30 показано коефіцієнт тиску стандартного автомобіля та порівняння всіх конфігурацій, окремо на центральній лінії кузова з кутом спойлера  $0^\circ$ , кутом дифузора  $1^\circ$  і бічною спідницею на висоті 205 мм відносно поверхні дороги. Будується графік коефіцієнта тиску автомобіля вздовж поздовжньої осі Z автомобіля для відповідних верхньої та нижньої частин автомобіля. Тенденція розподілу коефіцієнта тиску  $C_p$  має дуже невеликі зміни від капота до заднього лобового скла. Однак істотна варіація  $C_p$  починається з початку переднього бампера до капота автомобіля. Це означає область високого тиску, яка відчувається на передньому кінці. Вплив конструкції днища автомобіля очевидний на проточну структуру поверхні кузова. У задній частині автомобіля коефіцієнт тиску нижче в порівнянні з передньою частиною автомобіля, таким чином це означає, що на задній частині тиск нижчий, оскільки повітря надходить із заднього вітрового скла до поверхня ґрунту. Це виражається для всіх комплектацій автомобіля з невеликими варіаціями тиску в передній і в задній частині автомобіля.

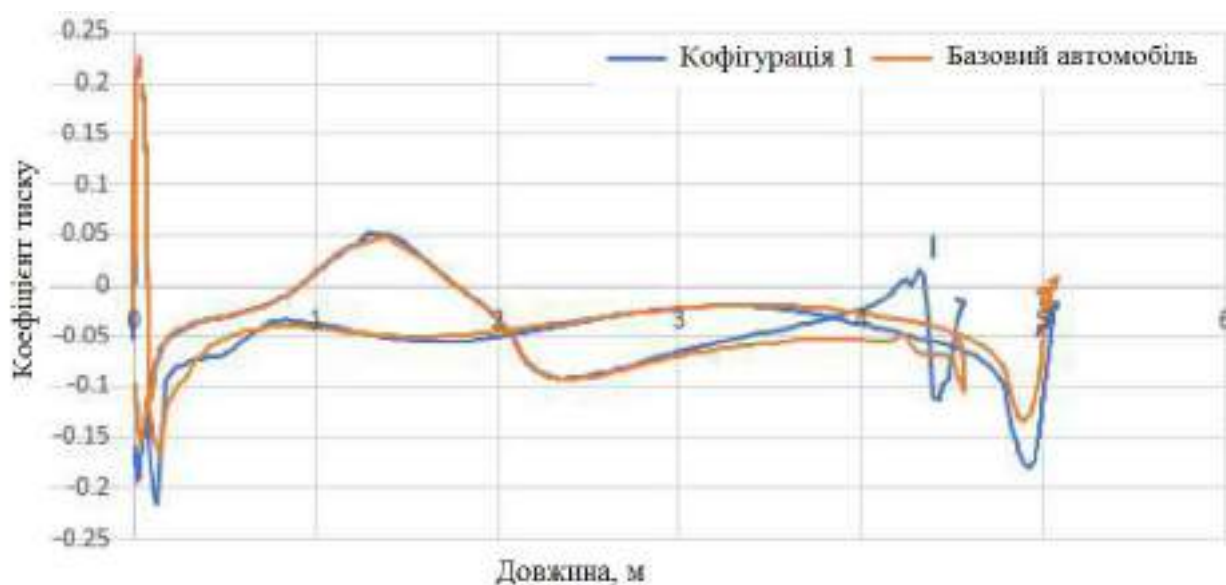


Рисунок 3.24 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 1 по довжині автомобіля

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

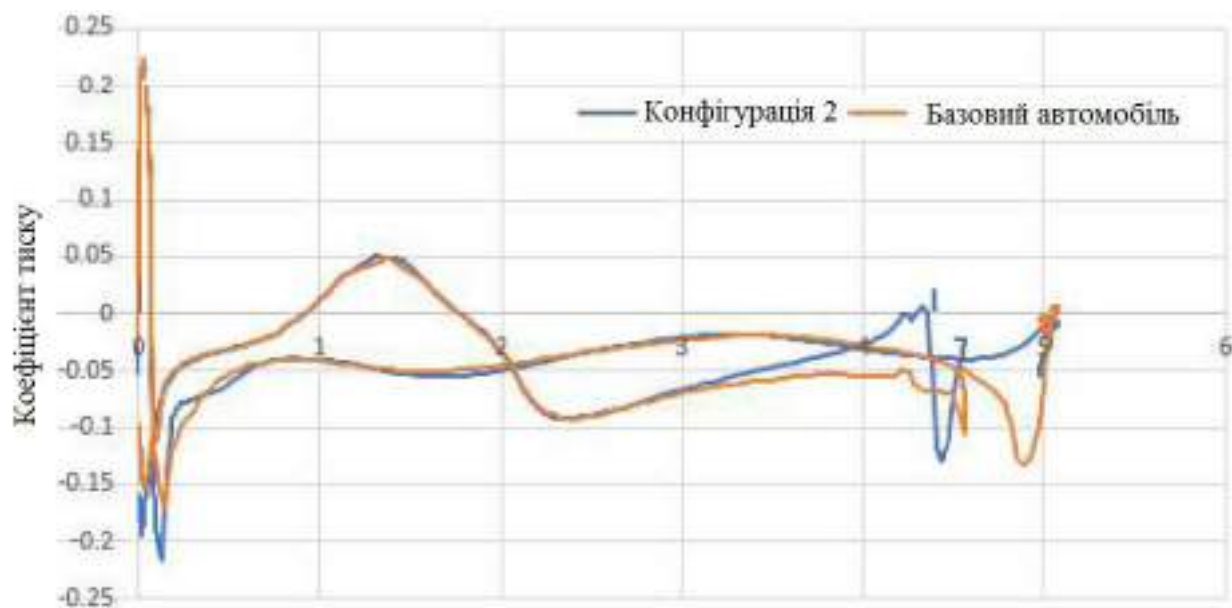


Рисунок 3.25 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 2 по довжині автомобіля

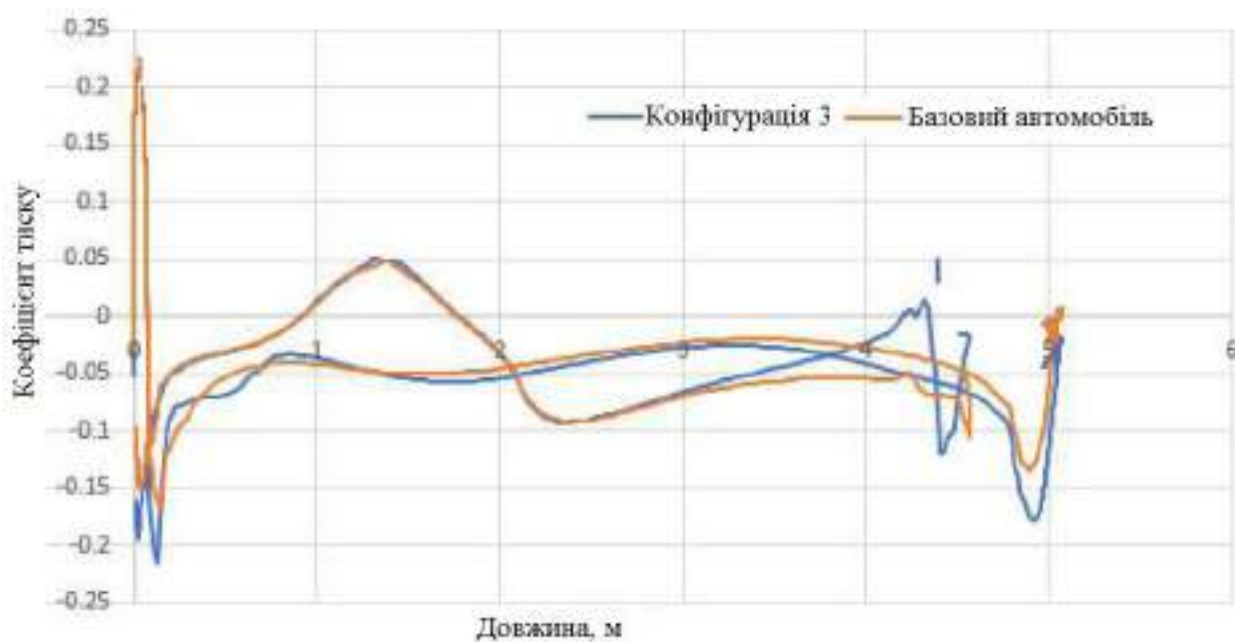


Рисунок 3.26 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 3 по довжині автомобіля

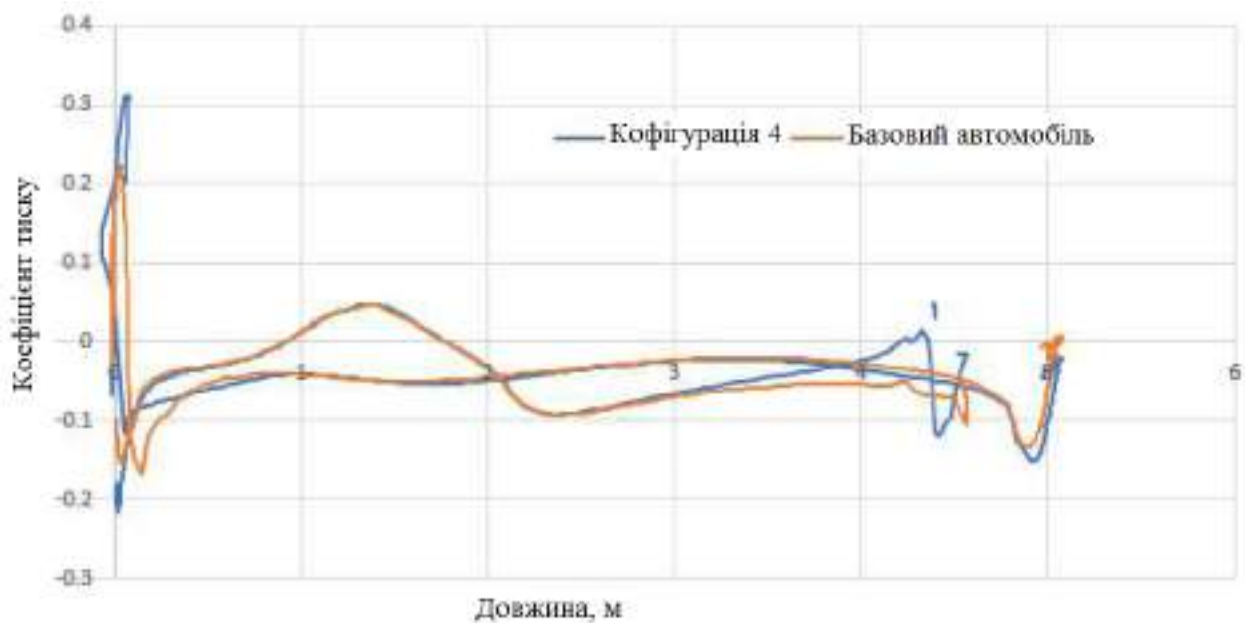


Рисунок 3.27 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 4 по довжині автомобіля

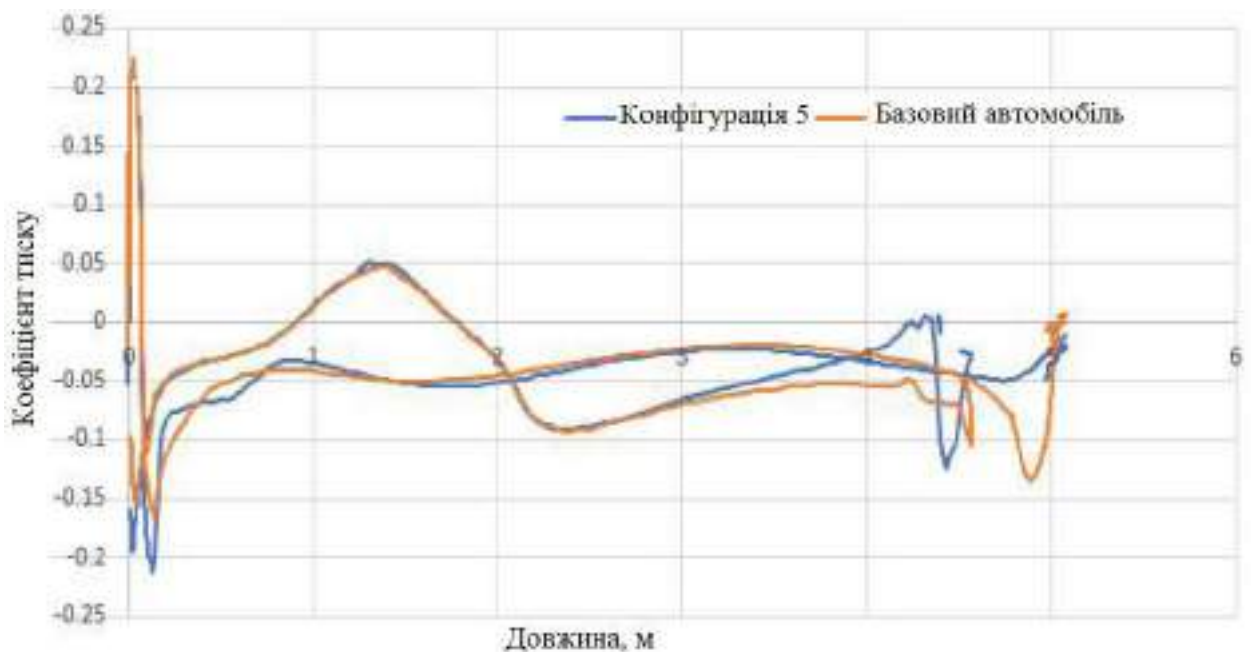


Рисунок 3.28 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 5 по довжині автомобіля

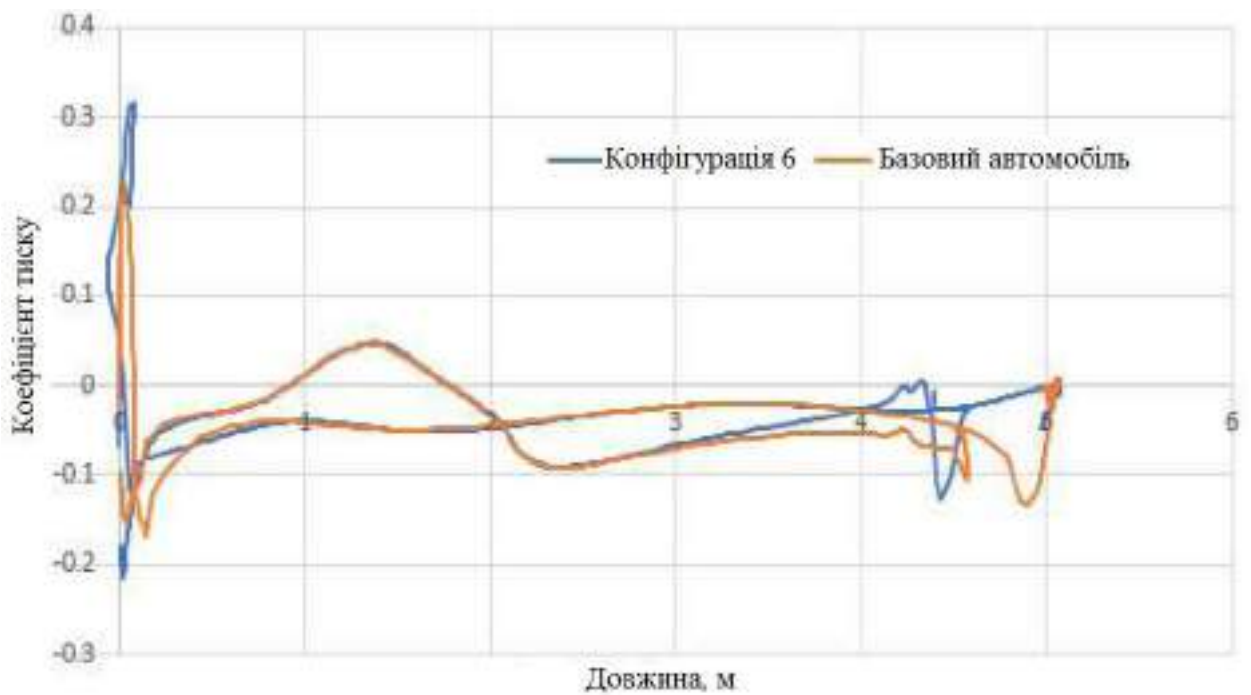


Рисунок 3.29 – Коефіцієнт тиску штатного автомобіля та конфігурації 6 по довжині автомобіля

### 3.11 Порівняння конфігурацій.

Виконавши всі необхідні тести, ми складаємо в таблицю результати семи конфігурацій і порівнюємо зі стандартною машиною. Вибирається конфігурація з найменшим коефіцієнтом опору та підйомної сили. В таблиці 3.1 наведений порівняльний аналіз всіх семи конфігурацій для коефіцієнта лобового опору та зусилля лобового опору при різних кутах нахилу спойлера. З цієї таблиці видно, що в конфігурації 7 найменший коефіцієнт опору 0,3607 і сила опору 836,9 Н. При меншому коефіцієнті лобового опору спостерігається краща паливна ефективність автомобіля.

					КвРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Порівняння характеристик аеродинамічного опору автомобіля в різних комплектаціях

Налаштування	Кут	Коефіцієнт лобового опору	Сила перетягування	Коефіцієнт найменшого лобового опору	Найменша сила опору
Конфігурація 1 - Спойлер	0	0,4055	940,9	0,4055	940,9
	5	0,425	986		
	10	0,4475	1038,3		
	15	0,4555	1056,7		
	20	0,4766	1105,8		
Конфігурація 2- Спойлер + Дифузор	0	0,3803	882,4	0,3803	882,4
	5	0,3975	922,3		
	10	0,4203	975,1		
	15	0,4389	1018,2		
	20	0,4457	1034,0		
Конфігурація 3- Спойлер + бічна спідниця	0	0,3843	891,7	0,3843	891,7
	5	0,4044	938,3		
	10	0,4243	984,5		
	15	0,44	1020,8		
	20	0,4505	1045,2		
Конфігурація 4- Спойлер + Спліттер	0	0,381	883,9	0,381	883,9
	5	0,4004	929,1		
	10	0,4219	978,9		
	15	0,4409	1023		
	20	0,4509	1046,1		
Конфігурація 5- Спойлер + Дифузор+Бічна спідниця	0	0,3723	863,8	0,3723	863,8
	5	0,3903	905,5		
	10	0,4138	960,1		
	15	0,4303	998,3		
	20	0,4384	1017,1		

Конфігурація 6- Спойлер + Дифузор+ Спліттер	0	0,3638	844,1	0,3638	844,1
	5	0,3816	855,8		
	10	0,4042	937,9		
	15	0,4268	990,3		
	20	0,4349	1009		
Конфігурація 7 - Спойлер + Дифузор + Спліттер + Бічна спідниця	0	0,3607	836,9	0,3607	836,9
	5	0,3804	882,5		
	10	0,41	951,2		
	15	0,4262	988,9		
	20	0,4318	1001,7		

Як видно з таблиці 3.2, зі збільшенням кута нахилу коефіцієнт підйомної сили зменшується. Але при більших кутах нахилу спойлера збільшується коефіцієнт опору. Оскільки коефіцієнт лобового опору є найменшим при куті спойлера  $0^\circ$  для всіх конфігурацій, найменший підйом також необхідно враховувати з відповідним кутом  $0^\circ$ . Таблиця нижче порівнює всі сім конфігурацій для коефіцієнта підйому та підйомної сили при різних кутах нахилу спойлера.

Таблиця 3.2 – Порівняння підйомних характеристик автомобіля при різних комплектаціях

Налаштування	Кут	Коефіцієнт підйомної сили.	Сила підйому	Коефіцієнт найменшої підйомної сили	Найменша підйомна сила
Конфігурація 1- Спойлер	0	-0,0406	-94,4	-0,0406	-94,4
	5	-0,0694	-161,1		
	10	-0,1258	-291,9		
	15	-0,1307	-303,3		
	20	-0,1602	-371,6		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						70

Конфігурація 2- Спойлер + Дифузор	0	0,0457	106,1	0,0457	106,1
	5	0,0004	1,1		
	10	-0,0388	-90,1		
	15	-0,0883	-204,8		
	20	-0,0963	-223,5		
Конфігурація 3- Спойлер + Бічна спідниця	0	-0,0867	-201,2	-0,0867	-201,2
	5	-0,1204	-279,3		
	10	-0,1586	-368,1		
	15	-0,1907	-442,5		
	20	-0,1908	-442,7		
Конфігурація 4- Спойлер + Спліттер	0	-0,0165	-38,3	-0,0165	-38,3
	5	-0,0539	-125		
	10	-0,1035	-240,1		
	15	-0,1483	-344		
	20	-0,1472	-341,6		
Конфігурація 5- Спойлер + Дифузор + Бічна спідниця	0	0,0206	48	0,0206	48
	5	-0,0259	-60,1		
	10	-0,066	-153,2		
	15	-0,1216	-282,2		
	20	-0,1337	-310,2		
Конфігурація 6- Спойлер + Дифузор + Спліттер	0	0,0707	164,2	0,0707	164,2
	5	0,0365	84,8		
	10	-0,0045	-10,4		
	15	-0,0675	-156,6		
	20	-0,0758	-175,8		
Конфігурація 7 - Спойлер + Дифузор + Спліттер + Бічна спідниця	0	0,0566	131,6	0,0566	131,6
	5	0,0138	32		
	10	-0,0427	-99,1		
	15	-0,0949	-220,3		
	20	-0,1073	-249		

З таблиці 3.2 видно, що у конфігурації 3 спойлер і бічна спідниця прикріплені до стандартного автомобіля відчуває найменший коефіцієнт

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підйому  $-0,0867$  і підйомну силу  $-201,2$ . З цим низьким підйомом коефіцієнт притискної сили автомобіля збільшується, що забезпечує кращу стабільність, керуваність та зчеплення з дорожнім покриттям.

Визначивши результати найменшого коефіцієнта лобового опору та коефіцієнта підйомної сили, ми порівнюємо їх з результатами для базового автомобіля. А ось коефіцієнт лобового опору у автомобіля найменший при комплектації 7 і коефіцієнт підйому відповідає конфігурації 3. Коефіцієнт лобового опору конфігурації 7 менше за конфігурації 3, тоді як коефіцієнт підйомної сили трохи більше. Оскільки метою є вдосконалення загальної аеродинамічної ефективності автомобіля, комплектація 7 є найбільш вдалою.

Коефіцієнт тиску стандартної машини та конфігурації 7 порівнюються, як показано на рис. 3.30. Тиск конфігурації 7 в інтервалі від 0 до 1 спочатку високий, оскільки відбувається додавання спліттеру до нижньої частини переднього бампера. Це збільшує тиск на передній верхній кінець автомобіля в порівнянні зі стандартним автомобілем. Так само в цьому ж інтервалі коефіцієнт тиску автомобіля є найнижчим для конфігурації 7 через спліттер, прикріплений спереду, який виштовхує повітря під автомобілем на більшій швидкості порівняно зі стандартним автомобілем, отже створюючи область низького тиску під автомобілем біля переднього бампера. Середній сектор аналогічний для обох конфігурацій (базова і 7). На задньому кінці, в інтервалі від 4 до 5, коефіцієнт для конфігурації 7 ближче по довжині, якщо порівнювати зі штатним, оскільки приєднаний дифузор відіграє важливу роль у зниженні тиску, за рахунок збільшення швидкості повітря під автомобілем.

Зведені результати наведено в таблиці 3.3.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

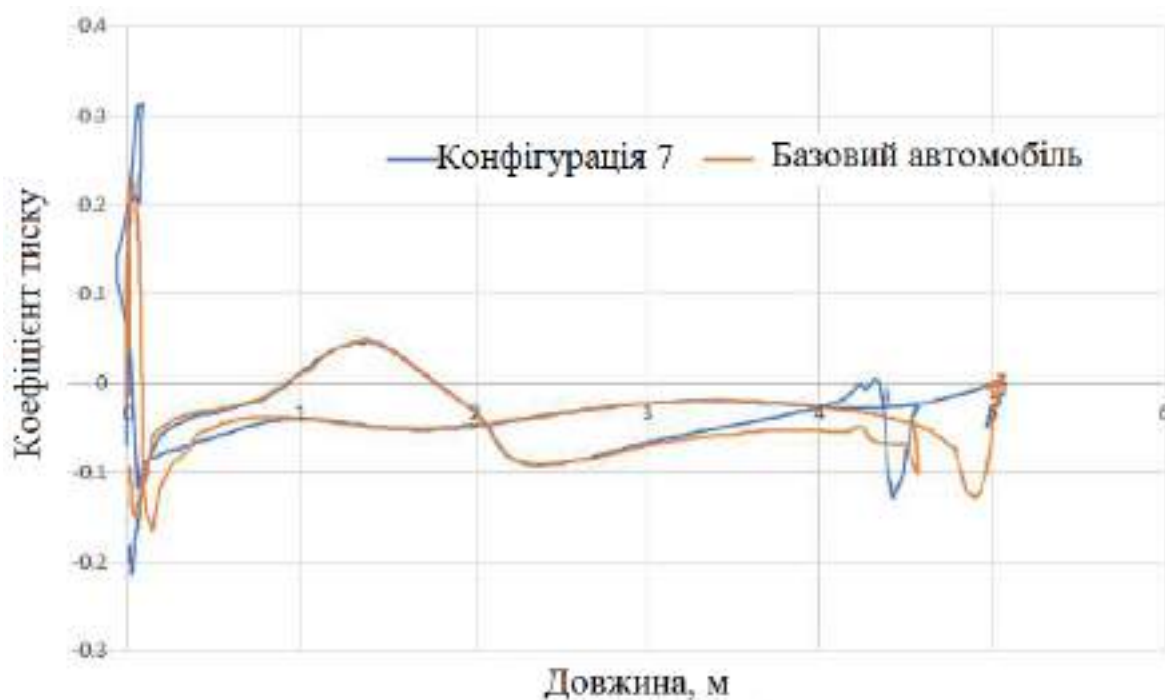


Рисунок 3.30 – Порівняння коефіцієнта тиску між стандартним автомобілем і з конфігурацією 7.

Таблиця 3.3 – Порівняння результатів

Налаштування	Коефіцієнт опору	Коефіцієнт підйомної сили	Сила опору	Підйомна сила
Базовий автомобіль	0,3793	0,2178	880,1	505,5
Конфігурація 7 (Спойлер, дифузор, спліттер, бокова спідниця)	0,3607	0,0566	836,9	131,6
Відсоткова зміна	4,90%	74,01%	4,91%	73,95%

Коефіцієнт аеродинамічного опору автомобіля при виробництві становить 0,35, а результати стандартного автомобіля після CFD аналіз 0,3793.

У рекомендованій нами конфігурації коефіцієнт лобового опору автомобіля нижчий на 4,9% порівняно зі стандартним, відповідно витрата палива менше. Також, зі зменшенням коефіцієнта підйомної сили на 74 %, збільшується притискна сила. Таким чином, забезпечується краща керуваність і покращене зчеплення.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз аеродинамічних характеристик автомобіля показав, що характер обтікання легкового автомобіля залежить від типу, форми та параметрів кузова, а також кута натікання та швидкості повітряного потоку.

2. Установка додаткових навісних елементів може покращити аеродинамічні характеристики автомобіля, але вимагає оптимальних налаштувань для забезпечення мінімально можливого коефіцієнта лобового опору та максимальної притисної сили.

3. За допомогою програмне забезпечення Solidworks виконано аналіз аеродинамічних характеристик базового автомобіля та автомобіля з 7 різними конфігураціями навісного обладнання на чотирьох різних швидкостях. Для базового автомобіля встановлено, що коефіцієнт опору 0,3793, сила опору 880,1 Н, коефіцієнт підйому 0,2178 і підйомна сила 505,5 Н.

4. Аналіз для дифузора виконується на 4 різних швидкостях для 5 різних кутів дифузора. Кут  $1^\circ$  вибрано як кут дифузора для налаштування конфігурації оскільки він пропонує кращий коефіцієнт лобового опору 0,3771 і коефіцієнт підйомної сили 0,2163. Аналіз бокової спідниці також було виконано на 4 різних швидкостях для 5 різних висот відносно поверхні. Було обрано висоту 205 мм, оскільки вона демонструє найменший коефіцієнт лобового опору 0,3428 і підйомну силу 0,1825. Коефіцієнт лобового опору від кута нахилу спойлера постійно зростає, тоді як коефіцієнт підйому поступово зменшується.

5. Конфігурація 7 (Спойлер + Дифузор + Спліттер + бічні спідниці) обрана з решти семи конфігурацій з тієї причини, що коефіцієнт лобового опору автомобіля нижчий на 4,9 % порівняно зі стандартним, відповідно витрата палива менше. Також, зі зменшенням коефіцієнта підйомної сили на 74 %, збільшується притисна сила. Таким чином, забезпечується краща керуваність і покращене зчеплення з дорогою.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ю. І. Ковальов, О. І. Петренко – Аеродинаміка автомобілів: Теорія і практика. Київський університет, 2016. – 176 с.
2. Аеродинаміка літальних апаратів [Електронний ресурс] : навч. посіб. Для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Літаки і вертольоти» спец. 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: П. В. Лук'янов. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 188 с.
3. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів: ЛНУП, 2022. - 109 с
4. Лемко О.Л. Навчальний посібник «Аеродинамічні характеристики транспортних літаків та їх розрахунок». Електронне навчальне видання. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. - 75 с.
5. П. М. Скорик, В. С. Кравченко – Аеродинамічна оптимізація автомобільних спойлерів та антикрил. Автомобільний світ, 2017. – 240 с.
6. Edwin M-L Yiu, Yuet-Ming Yuen, Tara Whitehill, Alison Winkworth. Reliability and applicability of aerodynamic measures in dysphonia assessment. September 2004 Clinical Linguistics & Phonetics 18(6-8):463-78 DOI:10.1080/02699200410001703592
7. Rubel Chandra Dasa, Mahmud Riyada, " CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler", ,Khulna ,Bangladesh. Procedia Engineering 194 ( 2017 ) 160 – 165.
8. Basson J. Analysis of the aerodynamic attributes of motor vehicles. 2013. Engineering. ID: 107292184
9. Yakkundi, vivek. mantha, S S. Effect of Spoilers on Aerodynamic Properties of Car Effect of Spoilers on aerodynamic properties of a car. s.l. : International Journal of Scientific Research and Review, 2018. Vol. 7. 2279-543X.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Ragavan, T et al. Aerodynamic Drag Reduction on Race Cars. s.l. : Journal of Basic and Applied Engineering Research, 2014. Vol. 1. 2350-0255.

11. Corno, matteo et al. Performance Assessment of Active Aerodynamic Surfaces for Comfort and Handling Optimization in Sport Cars. s.l. : IEEE, 2016. Vol. 24. 10636536

12. Dharmawan, mohammad arief et al. Aerodynamic analysis of formula student car. s.l. : AIP Conference Proceedings, 2018. Vol. 1931. 15517616.

13. Katz, joseph. Aerodynamics in motorsports. s.l. : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 2019. 1754338X.

14. Alkan, bugra. Aerodynamic Analysis of Rear Diffusers for a Passenger Car by Using CFD. s.l. : 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), 2019.

15. Samuel hellman et. Experimental Study comparing racecar aerodynamic downforcegenerating devices using scale model nascar co. s.l. : International Journal of Automotive Technology, 2016. Vol. 17. DOI 10.1007/s12239-016-0028-7.

16. Das, rubel chandra. riyad, Mahmud. CFD analysis of passenger vehicleat various angle of rear end spoiler. s.l. : Procedia Engineering, 2017. Vol. 194. 18777058.

17. Huminic A, Huminic G. CFD Investigations of an Open-Wheel Race Car. In4th European Automotive Simulation Conference, EASC 2009 Jul 6 (pp. 85-94).

18. Ljungskog E, Sebben S, Broniewicz A. Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020 Feb, (pp. 320-334).

19. 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. 127– 142 с.

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КВРАТ. 22129.02.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78