

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Інженерний аналіз та модернізація каналів повітряної системи охолодження гібридного автомобіля»

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

Шифр КвРАТ. 23067.02.06.00

Виконав студент 3 курсу група АТс-23-2


Підпис

Андрій КИРИЛЬЧУК

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

10.06.2026 р

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

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


75.04 Диха О.В.
2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кирильчуку Андрію Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Інженерний аналіз та модернізація каналів повітряної системи охолодження гібридного автомобіля.**

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедрі 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали курсових проектів, робіт, практики.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Теоретичні основи руху повітря в системі охолодження автомобіля.

2) Геометрія повітряних каналів на автомобілі.

3) Методологія моделювання.

4) Аналіз результатів моделювання, повна модель транспортного засобу.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Теоретичні основи руху повітря в системі охолодження автомобіля</i>	28.05.2026	вик
2	<i>Геометрія повітряних каналів на автомобілі</i>	3.06.2026	вик
3	<i>Методологія моделювання</i>	12.06.2026	вик
4	<i>Аналіз результатів моделювання, повна модель транспортного засобу</i>	13.06.2026	вик
5	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	16.06.2026	

Студент


Підпис

Андрій КИРИЛЬЧУК

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

тему «
охолод
розділ
наймен
сторінк
тексту,

сило
охолод
зумов
засоби
двигун

зокре
Встан
через
опору
масов
актуа

мінім
відсі
вико
пара
ефек

ПОВ
ПОВ
МОД

РЕФЕРАТ

Судент групи АТс-23-2: Кирильчук А.С.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Інженерний аналіз та модернізація каналів повітряної системи охолодження гібридного автомобіля» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 16 сторінках. Роботу викладено на 68 сторінках, з них 62 сторінки основного тексту, на яких розміщено 53 рисунки і 9 таблиць.

У роботі розглянуто питання підвищення ефективності охолодження силових агрегатів легкових автомобілів шляхом оптимізації потоків охолоджувального повітря в моторному відсіку. Актуальність теми зумовлена необхідністю зниження аеродинамічного опору транспортних засобів при одночасному забезпеченні належного теплового режиму роботи двигуна та інших елементів, зокрема у гібридних електричних автомобілях.





Проаналізовано сучасні підходи до організації систем охолодження, зокрема використання радіаторів, жалюзі решіток та повітропроводів. Встановлено, що значні втрати енергії охолоджувального потоку виникають через нераціональну організацію руху повітря, що призводить до збільшення опору охолодження. Особливу увагу приділено можливостям зниження масового потоку повітря без погіршення ефективності охолодження, що є актуальним для гібридних транспортних засобів.

Метою роботи є зниження опору охолоджувального повітря та мінімізація турбулентності шляхом керування потоками повітря в моторному відсіку гібридного транспортного засобу. Для досягнення поставленої мети виконано аналіз формування потоків, визначено вплив конструктивних параметрів системи охолодження та запропоновано підходи до проектування ефективних впускних і випускних каналів.

Ключові слова: СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ, ОХОЛОДЖУВАЛЬНЕ ПОВІТРЯ, АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР, МОТОРНИЙ ВІДСІК, ПОВІТРОПРОВОДИ, РАДІАТОР, ГІБРИДНИЙ АВТОМОБІЛЬ, CFD-МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, ТУРБУЛЕНТНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУХУ ПОВІТРЯ В СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛЯ	8
1.1 Аеродинаміка транспортних засобів.	8
1.2 Коефіцієнт тиску та опір охолодження.	10
1.3 Термічний менеджмент транспортних засобів.	11
1.3.1 Радіатор.	12
1.3.2 Конденсатор.	14
1.3.3 Охолоджувач наддувного повітря та повітря забірника.	14
1.3.4 Випускні отвори для повітря.	16
1.4 Гібридна силова установка.	16
2 ГЕОМЕТРІЯ ПОВІТРЯНИХ КАНАЛІВ НА АВТОМОБІЛІ	18
2.1 Симетрична геометрія.	18
2.2 Повний транспортний засіб.	20
2.2.1 Пакет охолодження.	22
2.2.2 Моторний відсік та вихідний отвір колісної арки.	23
2.2.3 Вихід у підлозі.	25
3 МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ	27
3.1 Моделювання поверхонь.	27
3.2 Створення сітки.	28
3.3 Налаштування ANSYS Fluent.	30
3.4 Післяобробка та процес моделювання.	34
3.5 Конфігурації конструкції для управління охолоджувальним повітрям.	36
3.5.1 Проста модель.	36
3.5.2 Повна модель транспортного засобу.	38

КВРАТ. 23067.02.06.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Кирильчук		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Інженерний аналіз та модернізація каналів повітряної системи охолодження гібридного автомобіля				
		Літера	Аркуш	Аркушів
			4	68
ХНУ, АТс-23-2				

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ, ПОВНА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	47
4.1 Тестування параметрів конструкції.	47
4.2 Вибір оптимальних каналів для позашляховика.	56
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТКИ	68

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Інтерес до гібридних та електричних автомобілів зріс за останні кілька років після амбіцій щодо зменшення викидів CO₂ на Землі. З розвитком гібридних автомобілів моторний відсік змінився, щоб відповідати новим розробленим акумуляторним двигунам, але не збільшився в розмірах. Акумуляторні двигуни значно вдосконалилися протягом багатьох років, але все ще працюють гірше, ніж традиційні двигуни внутрішнього згорання, коли йдеться про запас ходу та вартість. Якби опір можна було зменшити, то можна було б покращити запас ходу та час роботи від акумулятора, саме тому зменшення опору є пріоритетним для гібридних та електричних автомобілів. Це також пояснюється тим, що зменшення опору є одним із найпростіших способів зменшення споживання енергії, окрім зменшення розміру автомобіля. Опір зменшується опором автомобіля із закритими решітками радіатора та опором охолодження, що відбувається під капотом автомобіля. Опір охолодження становить близько 10% від загального опору, і завдяки розробці належного управління охолоджувальним повітрям можна досягти значних результатів для зниження загального споживання енергії [1].

Сучасні силові агрегати легкових автомобілів зазвичай охолоджуються радіаторами та іншими теплообмінниками, розташованими всередині моторного відсіку, які використовують нижчу температуру потоку навколишнього повітря. Однак це призводить до втрат енергії охолоджувального потоку, що, у свою чергу, призводить до збільшення опору охолодження автомобіля. Втрати енергії можна мінімізувати за допомогою різних жалюзі решітки радіатора та використання повітропроводів радіатора. Найменший можливий опір – це їздити із закритими жалюзі решітки радіатора, але це практично неможливо, оскільки це призведе до перегріву двигуна. У гібридних автомобілях кількість охолоджувального повітря не обов'язково має бути меншою, ніж у

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бензинових автомобілях, але це є складнішим питанням. Через те, що є радіатор акумулятора, який вимагає більшої робочої температури, та радіатор з температурою понад 150 °С, відкриваються можливості для зменшення масового потоку до рівня, при якому двигун достатньо охолоджується, і таким чином, опір охолодження також може бути зменшений.

На сьогодні більшість досліджень потоків охолоджувального повітря проводилися без рівняння енергії та коливань температури. Це фактор похибки, який цікаво дослідити та побачити, як термодинаміка впливає на потік охолодження та загальний опір автомобіля. Сучасне зовнішнє аеродинамічне CFD-моделювання є відносно трудомістким, і кожне моделювання вимагає кількох тисяч годин процесора. Однак аеродинамічний розв'язувач з рівнянням енергії, введеним без збільшення часу обчислення, був би дуже затребуваним у індустрії. Цей розв'язувач дозволив би аналізувати коливання температури та щільності у моторному відсіку, а також теплопередачу від радіаторів та назовні автомобіля.

Метою цієї роботи є можливість керування охолоджувальним повітрям для гібридних електричних транспортних засобів. Мета полягає в тому, щоб спробувати максимально знизити опір охолоджувального повітря та мінімізувати турбулентність, що виникає внаслідок опору охолоджувального повітря, що виходить з вихідних отворів моторного відсіку.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- 1) проаналізувати систему охолодження гібридного автомобіля;
- 2) створити 3D-модель гібридного автомобіля;
- 3) виконати CFD-моделювання повітряних потоків;
- 4) проаналізувати вплив конструктивних змін;
- 5) визначити оптимальні варіанти конструкції.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУХУ ПОВІТРЯ В СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛЯ

1.1 Аеродинаміка транспортних засобів.

Аеродинаміка – це вивчення потоку рідини навколо тіла на відкритому повітрі та того, як сили впливають на тіло. Аеродинамічні дослідження є важливою частиною розробки нових транспортних засобів, починаючи від нового шасі, днища кузова або підкапотної частини. Аеродинамічний аналіз може бути важливим для керованості транспортного засобу, стійкості та підвищення економії палива. У цій роботі основна увага приділяється силі опору, але інші параметри, такі як підймальна сила та тертя об поверхню, також представляють інтерес. Всі ці аеродинамічні параметри будуть представлені на різних графіках та діаграмах у цій статті.

Опір – це сила, що діє нормально до напрямку потоку, коли тіло рухається в середовищі, що складається з рідини та газу, по суті, будь-якому середовищі, крім вакууму. Сила опору визначається в напрямку, протилежному напрямку потоку потоку, де підйомна сила визначається перпендикулярно вгору напрямку [2]. Коефіцієнт опору (C_D) та коефіцієнт підйомної сили (C_L) можна визначити як:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho u^2 A} \quad (1.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho u^2 A} \quad (1.2)$$

Аеродинамічну силу опору транспортного засобу можна розділити на два різні типи: профільний опір та індукований опір. Профільний опір також можна розділити на дві частини: опір форми та в'язкий опір. Опір форми також іноді називають опором тиску, який виникає через розподіл тиску по

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

транспортному засобу. В'язкий опір також можна назвати та описати як опір тертя поверхні. Опір тертя поверхні викликається напруженнями зсуву стінки між повітрям та транспортним засобом.

Ще однією змінною, що використовується в зовнішній аеродинаміці, є сила опору, помножена на площу $C_D \cdot A$, та підймальна сила, помножена на площу $C_L \cdot A$, що є коефіцієнтами, помноженими на лобову площу автомобіля, що стоїть перед потоком. У випадку транспортного засобу він розташований спереду. C_D корисно використовувати під час аналізу того, чи є транспортний засіб більш аеродинамічним, ніж інший транспортний засіб, незалежно від розміру. $C_D A$ – це більш точне значення щодо того, який транспортний засіб створює найменший опір і, отже, може переміщувати більше потужності ефективно в повітрі. Іншими словами, вантажівка може мати кращий C_D , ніж седан, але матиме більший $C_D A$. У промисловості $\Delta C_D A$ зазвичай порівнюють через те, що якщо порівнювати C_D , то порівняння відбувається лише за аеродинамічною формою, а не за аеродинамічною силою.

Параметри, які також використовуються для оцінки аеродинамічних характеристик автомобіля, це коефіцієнт підйомної сили ззаду C_{Lr} та коефіцієнт підйомної сили спереду C_{Lf} . Коефіцієнт підйомної сили ззаду – це здатність автомобіля створювати підйомну силу ударного потоку в задній частині автомобіля, тому коефіцієнт підйомної сили спереду описує підйомні сили, що діють на передню частину автомобіля [3]. Потік під капотом та опір охолодження впливають на ці параметри, і в сучасній автомобільній промисловості зазвичай існує особливо великий інтерес до зменшення C_{Lr} для підвищення стійкості автомобіля. C_{Lr} або C_{Lf} можуть бути високими або низькими. Однак важливо, щоб був баланс між обома силами, щоб запобігти виникненню моменту навколо центру мас автомобіля.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Коефіцієнт тиску та опір охолодження.

Коефіцієнт тиску C_p – це безрозмірний коефіцієнт тиску. Він описує відносний тиск у полі потоку та визначається наступним чином

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2} \quad (1.3)$$

Тут індекс 1 означає вільний потік, а p – тиск у точці інтересу. Коефіцієнт тиску вказує на те, де на автомобілі та в моторному відсіку потік виштовхує поверхню під високим тиском.

Опір охолодження визначається як сила опору, що впливає на тіла, що звернені до потоку охолодження. Потік охолодження надходить через решітки радіатора та днище моторного відсіку. Охолоджувальне повітря пізніше виходить через днище автомобіля за передніми шинами та між ними, а також через колісні арки автомобіля. Отже, коефіцієнт опору охолодження можна визначити як різницю між загальним опором автомобіля з відкритими решітками радіатора та із закритими решітками. Іншими словами, це різниця опору між моделлю автомобіля з потоком охолодження та без нього [4].

$$C_{D,coolingdrag} = C_{D,with cooling flow} - C_{D,without cooling flow} \quad (1.4)$$

Наведене вище рівняння є рівнянням, яке зазвичай використовується та приймається в автомобільній промисловості.

Хоча воно має свої обмеження через складність розрахунку взаємодії з навколишнім потоком зовні автомобіля [5]. Іншими словами, опір охолоджувального повітря виникає від сили повітря на тіла всередині моторного відсіку, а також турбулентності та в'язкого опору, що виникають при виході з моторного відсіку [6]. Існує багато переваг, які можна отримати

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

з меншим опором охолодження, як-от менша підйомна сила, краща стійкість автомобіля, керованість, чутливість до бокового вітру та економія палива. [1]

1.3 Термічний менеджмент транспортних засобів.

Головною метою повітряного потоку для теплового менеджменту в підкапотному середовищі є забезпечення достатньої кількості охолоджувального повітря через решітки з якомога меншим аеродинамічним опором [7]. Як згадувалося, повітря зазвичай вводиться в передню частину транспортного засобу та найчастіше випускається під автомобіль та через колісні арки. Загалом, весь термічний менеджмент у транспортному засобі збалансований відведенням енергії (тепла) потоком набігаючого повітря.

Цього зазвичай достатньо для охолодження трансмісії та важливих компонентів за нормальних умов, хоча в екстремальних умовах, коли автомобіль, наприклад, піднімається на пагорб або на низькій швидкості, потрібен вентилятор, щоб компенсувати ефективність охолодження, створюючи примусовий повітряний потік [8]. Також корисно мати ефективні повітроводи перед охолоджувальним блоком, щоб створити менший опір охолодження.

Оскільки потік охолоджувального повітря є основною функцією терморегуляції тепла, що надходить, наприклад, від трансмісії, під капотом автомобіля є багато різних компонентів, які забезпечують ефективну роботу двигуна. Компоненти, описані в моделі SUVA, це радіатор двигуна, конденсатор, переохолоджувач трансмісії та система кондиціонування повітря. Сам пакет охолодження складається з конденсатора, радіатора, радіатора акумулятора, радіатора електроприводу та охолоджувача наддувного повітря. На рисунку 1.1 показано схему пакета охолодження в SUVA з описом нижче.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

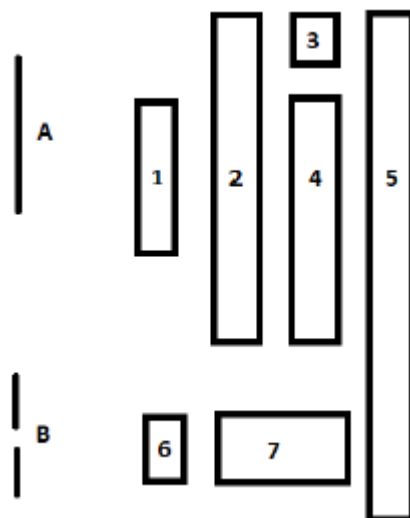


Рисунок 1.1 – Схема пакета охолодження SUVA:

A - Верхня решітка; B - Нижня решітка; 1 – Решітка; 2 – Конденсатор; 3 – Радіатор; 4 – Радіатор; 5 – Вентилятор; 6 – Вентилятор; 7 - Охолоджувач повітря.

Після пакета охолодження повітря потрапляє в моторний відсік, де двигун розташований дуже близько до нього.

1.3.1 Радіатор.

Радіатор двигуна – це теплообмінник, призначений для охолодження охолоджувальної рідини, таким чином забезпечуючи радіатор у водяній сорочці двигуна та охолоджуючи гарячі циліндри.

Радіатор робить це за допомогою зовнішнього потоку повітря, що проходить через радіатор. Сучасні радіатори зазвичай виготовляються з алюмінію та мають вигляд звужених трубок, скріплених пайкою алюмінієвих циліндрів.

Охолоджувальна рідина протікає через багато алюмінієвих циліндрів, розташованих паралельно. Тепло проводиться через трубки циліндрами, а потім передається повітря, що протікає через радіатор. Радіатор також зазвичай має вентилятор позаду нього, що продуває повітря [9]. Радіатор

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

зменшує тепло, що поглинається охолоджувальною рідиною під час її протікання через двигун.

Радіатор має велике значення для системи охолодження автомобіля. Ефективність залежить від кількох факторів. З точки зору роботи, вона значною мірою залежить від свіжого повітря, що протікає через нього, але на високих швидкостях також від рівномірності потоку по поверхні радіатора. Ефект охолодження також можна збільшити, максимізуючи площу контакту з потоком охолодження [10]. Система також є найефективнішою, коли існує великий градієнт температур між навколишнім повітрям та охолоджувальною рідиною. Однак для гібридного автомобіля робоча температура значно нижча, ніж для автомобіля з класичним двигуном внутрішнього згорання. Наприклад, для Jaguar XJ радіатори та конденсатори становлять 19 % від загального коефіцієнта опору порівняно з 45 % для кузова автомобіля та 16 % для коліс. Розміщення та поводження з радіатором можуть впливати на загальний опір автомобіля [11]. Звичайним терміном в аеродинаміці транспортних засобів є також опір ходу. Це вільний потік повітряного потоку радіатора, пропорційний опору охолодження автомобіля [10]. Сам радіатор важливий для охолодження двигуна та призводить до опору. Наприклад, відділ досліджень та розробок Honda нахилив центр радіатора на 25°, щоб зменшити опір охолодження [12]. Це був максимально можливий кут для забезпечення відповідного зазору до інших частин моторного відсіку та для того, щоб мати достатню поверхню до потоку для максимального відведення тепла.

У пакеті охолодження позашляховика А є один радіатор (єрадіатор) та брід (брад). Радіатор (єрадіатор) – це електричний радіатор, який охолоджує електродвигун, а брід – це радіатор акумулятора, який охолоджує акумулятор.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.3.2 Конденсатор.

Конденсатори є подібним теплообмінником, але зазвичай мають неоднорідну внутрішню частину через те, що їхня внутрішня рідина є багатофазною рідиною, яка потребує стискання та конденсації під високим тиском. Оскільки конденсатор працює в умовах нижчої температури, його зазвичай розміщують перед охолоджувальним блоком у транспортному засобі. Мета тут полягає у вивільненні тепла, яке холодоагент кондиціонера поглинув, проходячи через випарник, а в гібридних установках забезпечуючи охолодження акумулятора. Було показано, що конденсатор має велике значення для опору охолодження [11], де опір збільшувався після видалення конденсатора.

1.3.3 Охолоджувач наддувного повітря та повітря забірника.

Перш ніж повітря потрапить у двигун і впорскується в циліндри, воно також проходить через охолоджувач наддувного повітря. Його метою є зниження температури наддувного повітря після того, як воно пройде через турбокомпресор, але до того, як досягне моторного відсіку. Мета охолоджувача наддувного повітря (ОНП) полягає у зниженні температури повітря для оптимізації циклу згоряння в циліндрах. Тому ОНП є дуже важливим фактором з точки зору теплового менеджменту і, як і решта охолоджувального пакету, також функціонує як пористе середовище для охолоджувального потоку. Пористе середовище, яке знижує тиск за охолоджувальним пакетом.

Повітрязабірники розташовані в передній частині автомобіля для подачі холодного повітря в моторний відсік. Вони зазвичай розташовуються в місцях з високим тиском застою [11]. Ці положення можна визначити за законом Бернуллі як такі, що знаходяться там, де швидкість потоку дорівнює

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нулю, що призводить до максимального тиску. Для позашляховика А є повітрязабірники на двох рівнях, що є поширеною конструкцією майже для всіх моделей автомобілів через аварійну балку та захист пішоходів, розташовані між рівнями. Радіатор також розташований на різних рівнях, а не паралельно або послідовно. Також є випадки, коли решітки розміщені на одному рівні, а радіатори розміщуються послідовно. Цю конструкцію повітрязабірників можна побачити у Tesla Model S [13]. Повітря впускається через сітку решітки, яка призначена для утримання пилу та бруду поза моторним відсіком, а також для захисту охолоджувального блоку від, наприклад, ударів птахів та снігу, але достатньо велика, щоб впускати достатню кількість повітря. Після повітря забірників є повітроводи, які підводять повітря до радіатора. Повітроводи можуть бути спроектовані для оптимізації опору охолодження і зазвичай розташовані під кутом або нахилом. Повітроводи також можуть бути розділені на два різні повітряні канали, від верхньої решітки до радіатора та від нижньої решітки до ОНП.

Підсумовуючи конструктивні аспекти, які враховують автомобільні інженери, вхідний отвір слід розміщувати в точці застою або близько до неї в закритому транспортному засобі. Розмір повітрязабірника, звичайно, є найважливішим, але форма також повинна бути сприятливою, щоб не створювати занадто великих перешкод для повітря, оскільки градієнт тиску є несприятливим перед автомобілем, збільшуючись у напрямку потоку, і в цій області ймовірні непотрібні втрати. Позашляховик А також має повітрязабірник через днище моторного відсіку, виконаний як повітрязабірник NASA Pro. Повітрязабірник призначений для додаткового охолодження двигуна та інших деталей у моторному відсіку знизу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.4 Випускні отвори для повітря.

Охолоджувальне повітря також потрібно випускати з моторного відсіку. На вході до охолоджувального блоку тиск підвищується, а на виході виникає градієнт падіння тиску від охолоджувального блоку до виходу [14]. Зазвичай вихідний отвір для повітряного потоку має бути внизу та через колісну арку. Випускний отвір унизу допомагає зменшити притискну силу для транспортного засобу, тоді як вихідний отвір через колісну арку допомагає зменшити тиск. Він також може збільшити опір, якщо компоненти швидкості з моторного відсіку погано вирівняні з вільним потоком зовні [8]. Коли охолоджувальний потік суперечить зовнішньому потоку, це може призвести до сильної турбулентності. Тому ретельне вивчення вихідного потоку має важливе значення для загальних характеристик опору повітря автомобіля. Також є приклади, коли близько 45 % охолоджувального повітря виходить через колісні арки [15].

Випускний отвір повинен бути спроектований таким чином, щоб створювати потік з необхідною швидкістю повітря через моторний відсік. Конструкція також повинна враховувати тиск на виході.

Повітроводи загалом також повинні бути спроектовані таким чином, щоб уникнути несприятливих градієнтів тиску та без зайвих геометричних порушень, які можуть створювати турбулентний потік.

1.4 Гібридна силова установка.

Гібридний автомобіль (HEV/PHEV) має двигун внутрішнього згорання, а також електродвигун.

Двигун внутрішнього згорання приводить в дію електрогенератор, який живить електродвигун. Електродвигун підключений до акумуляторної батареї та перетворювача потужності. Перетворювач потужності необхідний

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

для перетворення електричної енергії. Важливо підтримувати температуру електродвигуна в правильному робочому діапазоні, щоб уникнути розмагнічування магнітного матеріалу та зниження продуктивності в процесі.

Тому управління охолоджувальним повітрям також важливе для електродвигуна.

Двигун внутрішнього згорання та електродвигун краще працюють на різних швидкостях. Електродвигун дуже ефективно обертає двигун, тоді як двигун внутрішнього згорання добре підтримує високу швидкість. Гібридна силова установка зазвичай займає менше місця, ніж двигун внутрішнього згорання, що працює на паливі, і потребує менше нагрівання. Позашляховик А має силовий агрегат гібридного електромобіля, що підключається до мережі (PHEV). Силова установка розташована в передній частині автомобіля під капотом. Через менший розмір рушійної системи в електромобілі йому потрібен менший простір для розміщення, ніж двигуну внутрішнього згорання, що, з іншого боку, не обов'язково стосується HEV. Розмір моторного відсіку насправді не зменшився, просто додано електродвигун з деякими додатковими деталями. Однак це вимагає більш складного теплового управління через те, що радіатор електроприводу та звичайний радіатор потребують дуже різних робочих температур.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ГЕОМЕТРІЯ ПОВІТРЯНИХ КАНАЛІВ НА АВТОМОБІЛІ

2.1 Симетрична геометрія.

Простіша модель для моделювання є напівсиметричною з рівною поверхнею під транспортним засобом, яку можна побачити на рисунку 2.1. Різні кольори на автомобілях вказують на різні ідентифікатори деталей моделі. Різні назви деталей використовуються для виконання якісного складання сітки, моделювання та постобробки транспортного засобу та його різних частин.

Зовнішній вигляд автомобіля все ще дуже деталізований на простій моделі, але має спрощення спереду та ззаду транспортного засобу. Проста модель також має лише кілька деталей порівняно з великою моделлю. На простій моделі решітка радіатора, аварійна балка, захист пішоходів тощо можуть бути відсутніми. Це лише зовнішній вигляд автомобіля, капот та верхня та нижня поверхні решітки радіатора спереду. Модель Ansa можна побачити спереду та ззаду на рисунку 2.2.

Вона також має спрощений моторний відсік з радіатором, позначеним тонким синім об'ємом, та рожевим об'ємом нижче на рисунку 2.3. Повітря входить через верхню та нижню решітки в повітропровід.



Рисунок 2.1 – Симетрична модель позашляховика А.

У верхньому каналі є тонкий об'єм, який є спрощеним об'ємом радіатора, потім повітря входить через інший повітропровід у моторний

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

відсік. У нижньому каналі також є тонкий об'єм, який є охолоджувачем наддувного повітря. Потім повітря входить в інший повітропровід, перед тим, як потрапити в моторний відсік. Повітря виходить через двері та колісну арку.

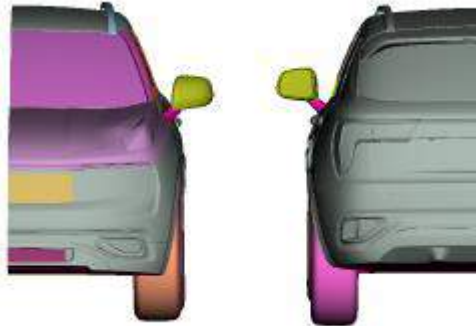


Рисунок 2.2 – Симетрична модель спереду та ззаду.

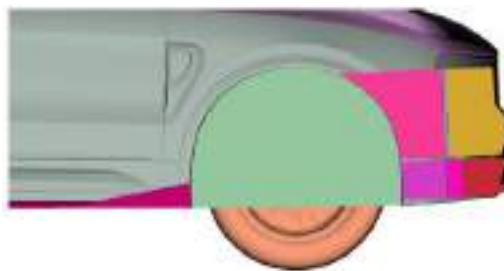


Рисунок 2.3 – Внутрішній дизайн позашляховика, симетрична модель.

Вся стінка колісної арки є вентиляторною поверхнею, яка випускає повітря. Підсумовуючи, проста модель має спрощений пакет охолодження з повітрям, що надходить з двох окремих рівнів: верхнього та нижнього решітки. Повітря з охолоджувача наддувочного повітря та радіатора потім зміщується в моторному відсіку.

Колісна арка та колесо також спрощені, рис. 2.4. У CAD-моделі немає механічних деталей, що підтримують колесо, немає деталей рульового керування. На простій моделі немає звичайних ободів, вони замінені рівною поверхнею, де отвори між шипами заповнені поверхнями. Таким чином, повітря не може проходити через колесо.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

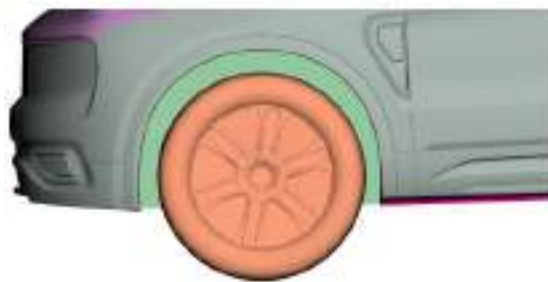


Рисунок 2.4 – Колісна арка симетричної моделі.

2.2 Повний транспортний засіб.

Несиметрична модель - це повна 3D-модель автомобіля, включаючи всі його різні частини та відсіки. Моторний відсік, повітроводи та колісні арки повністю деталізовані з усіма деталями.

Передня частина кузова, колеса та бічні дзеркала також повністю деталізовані. Модель Ansa – це повна 3D-збірка всіх частин позашляховика А, рис. 2.5.

Передня частина автомобіля порівняно із симетричною моделлю набагато детальніше зображена і може бути побачена на рисунку 2.6 нижче.

Дизайн задньої частини кузова позашляховика А можна побачити на наступному рисунку 2.7. Зовнішній вигляд можна побачити у сірому кольорі, а всі нижні ідентифікатори моделі – в інших кольорах, а також задні шини та бічні вікна.

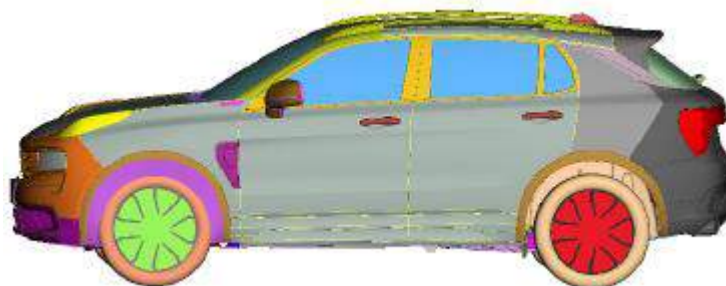


Рисунок 2.5 – Повна модель позашляховика А, вид збоку.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20



Рисунок 2.6 – Повна модель позашляховика А, вид спереду.



Рисунок 2.7 – Повна модель позашляховика А, вид ззаду.

Повний автомобіль також має дуже складну нижню частину, що складається з різних панелей, вихлопної системи, паливного бака та акумулятора. Позашляховик А можна побачити знизу на рисунку 2.8.

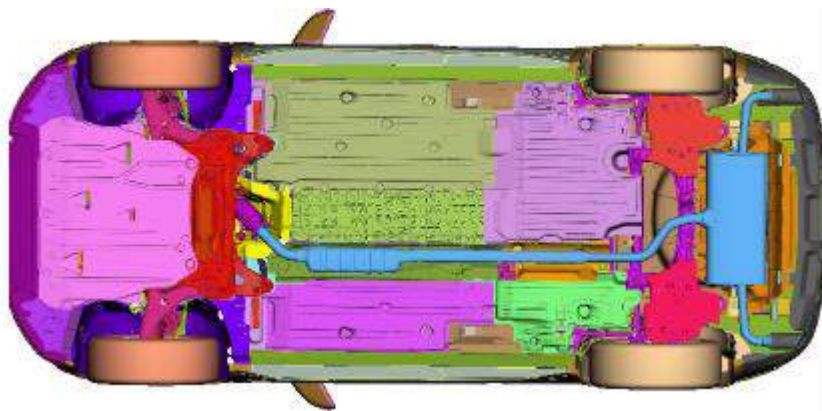


Рисунок 2.8 – Повна модель позашляховика А, вид знизу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2.2.1 Пакет охолодження.

У цій моделі також є повний пакет охолодження. Вигляд спереду пакета охолодження можна побачити на рис. 2.9.

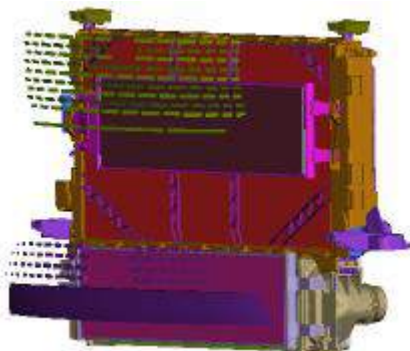


Рисунок 2.9 – Поверхні решітки та пакет охолодження, вид спереду.

Пунктирна поверхня, що видно спереду вгорі та знизу, а також фіолетовий прямокутник внизу – це верхня та нижня поверхні решіток. Саме тут повітря потрапляє в моторний відсік автомобіля. У верхній частині пакета охолодження повітря спочатку потрапляє в конденсатор, а потім у радіатор, перш ніж потрапити у вентилятор. Порівняно з нижнім повітропроводом, де повітря спочатку потрапляє в охолоджувач наддувного повітря, а потім потрапляє у вентилятор, де воно змішується з повітрям з верхнього повітряного каналу та потрапляє в моторний відсік.

На рис. 2.10 видно вентилятор та те, як він спроектований для відкачування повітря з усіх частин пакета охолодження.

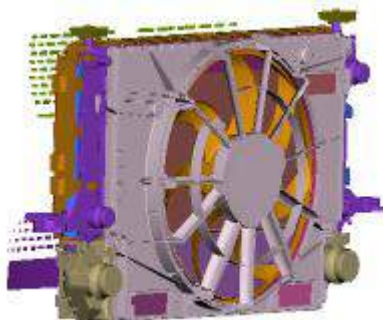


Рисунок 2.10 – Пакет охолодження, вид ззаду з вентилятором.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2.2.2 Моторний відсік та вихідний отвір колісної арки.

Моторний відсік – це складна зона. На рисунку 2.11 показано, наскільки щільною є область, де повітря виходить з охолоджувального блоку, а потім витікає з моторного відсіку.

Фіолетові області – це моторні відсіки, які оточують внутрішній моторний відсік. Цей малюнок показує, наскільки щільним і складним є об'єм для надходження повітря.

Спочатку ми можемо поглянути на колеса та диски позашляховика А. Колеса будуть змодельовані як такі, що обертаються, і порівняно з простою моделлю вони будуть симульовані за допомогою дисків. Шини та диски можна побачити нижче на рисунку 2.12.

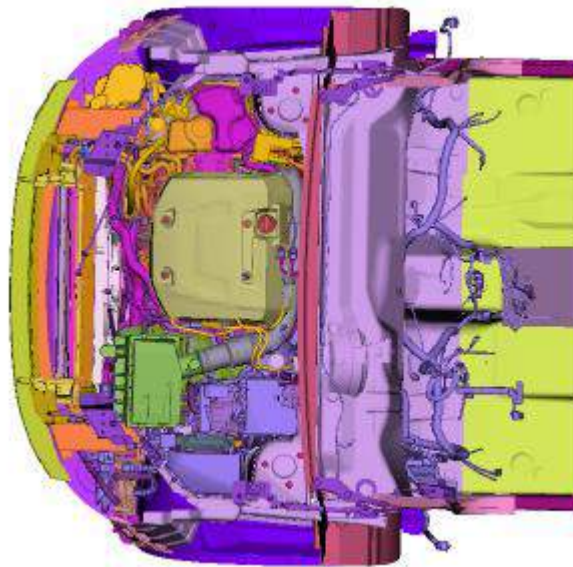


Рисунок 2.11 – Моторний відсік, вид зверху, з охолоджувальним блоком спереду посередині та моторним відсіком позаду нього.

Фактичний вихідний отвір колісної арки має складнішу конструкцію, ніж симетрична геометрія.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

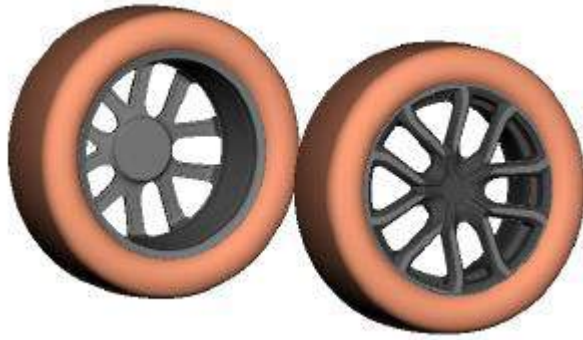


Рисунок 2.12 – Колеса та диски, що використовуються для моделі позашляховика А.

Повітря виходить через отвір у колісній арці всередині. Отвір не призначений для виходу охолоджувального повітря, він існує через те, що підвіска, рульове керування та гальма повинні проходити через зовнішню частину автомобіля. Схема отвору показана на рисунку 2.13.

Щоб зрозуміти, як виглядає вихідна поверхня, гальма та підвіску було видалено, рис. 2.14. Повітря виходитиме через отвір у фіолетовій поверхні та під рожевою конструкцією двигуна.

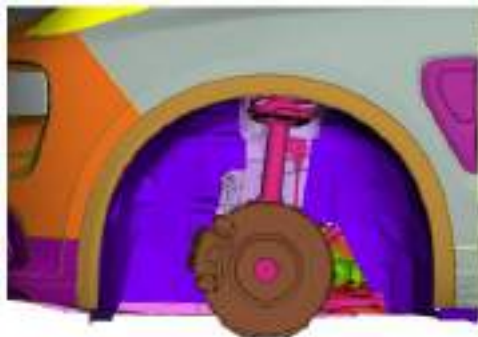


Рисунок 2.13 – Колісна арка без колеса



Рисунок 2.14 – Колісна арка без колеса, гальм та підвіски

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2.2.3 Вихід у підлозі.

Повітря також виходить через двері автомобіля, як і в симетричній моделі. Фактичний вхід, звичайно, набагато складніший. Повітря витікає навколо фіолетової вихлопної системи, як показано на рисунку 2.15.

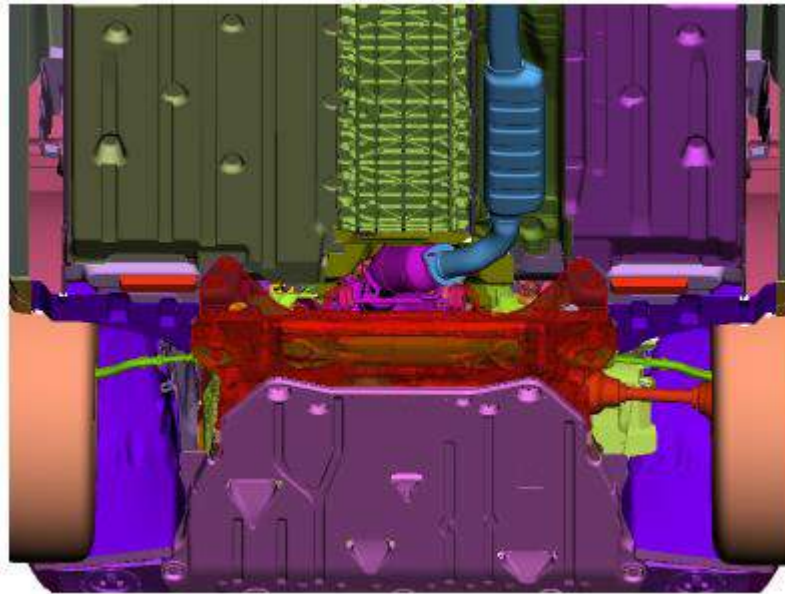


Рисунок 2.15 – Вихід через двері автомобіля, вид ззаду, з вихлопною системою, що проходить через нього.

Щоб спростити вигляд вихідної поверхні, вихлопну систему було видалено.

Повітря виходить там, де видно рожевий елемент, між червоною нижньою пластиною та зеленим корпусом моторного відсіку, як показано на рисунку 2.16.

Окрім цих двох основних вихідних отворів, є також невеликі отвори та щілини для витіку, які випускають повітря з моторного відсіку. Ці ділянки витіку будуть визначені під час процесу моделювання, а на вихідних отворах будуть розроблені поверхні вентиляторів, щоб максимально мінімізувати витік.

									Арк.
									25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАТ. 23067.02.06.00				



Рисунок 2.16 – Вихідний отвір через двері автомобіля зі знятою вихлопною системою.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

3 МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Моделювання поверхонь.

Коли CAD-модель надається інженерами-конструкторами, її спочатку потрібно обробити в Ansa для побудови сітки поверхонь, а перед побудовою сітки об'єму. Зазвичай у кадрі є невеликі отвори, які потрібно заповнити. Ще одна річ, яку можна зробити в Ansa, це зробити CAD-модель легшою для моделювання у Fluent, зробивши поверхні в складних областях, які не є цікавими та важливими для результату. Це можуть бути такі області, як під автомобілем, колісною аркою, обідком або складними областями в моторному відсіку. У роботі використовуються дві моделі: симетрична модель та повна модель автомобіля. Для простої моделі розміри решітки та випускного отвору будуть скориговані для досягнення кращих результатів. Також буде розроблена та протестована конфігурація випускного отвору колісної арки. Для повної моделі автомобіля буде виконано більше проектних робіт, створено різні конструктивні рішення для кращого спрямування повітря до та від радіатора, а також нові конструкції випускних повітроводів. Результати проектування цієї роботи з моделювання поверхонь можна прочитати в наступному підрозділі.

У цій роботі під час тестування параметрів проектування будуть впроваджені та протестовані різні нові конструкції. Ці нові конструкції та коригування конструкції будуть виконані в Ansa шляхом створення нових поверхонь та модифікації старих. В Ansa також буде проведена робота з проектування необхідних поверхонь вентиляторів для вимірювання витрати в різних областях, що становлять інтерес, таких як колісна арка, вихідний отвір у дні тощо. Віялова поверхня у Fluent – це поверхня, через яку потік може проходити, але її можна використовувати як поверхню для вимірювання та розрахунку різних параметрів, що цікавлять. У Fluent немає опції

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

моделювання під назвою «віяло», вона моделюється як поверхня радіатора таким же чином, як стіни моделюються як стіни, а рідинні об'єми моделюються як рідини.

3.2 Створення сітки.

Побудова сітки виконується у двох різних програмах. Спочатку поверхня створює сітку в Ansa. Потім файл зберігається як файл .msh та імпортується в програмне забезпечення для створення сітки Nastran. В Ansa, під час використання нової моделі або після реалізації проектування, завжди буде потреба спочатку створити сітку поверхні, яку об'ємна сітка може використовувати для побудови своєї сітки навколо та з неї. У Nastran створюється об'ємна сітка. Сітка являє собою огорожувальну структуру з призматичними шарами навколо транспортного засобу. Сітка найбільше уточнюється навколо транспортного засобу та у моторному відсіку. Сітку на загальній картині можна побачити на рисунку 3.1.

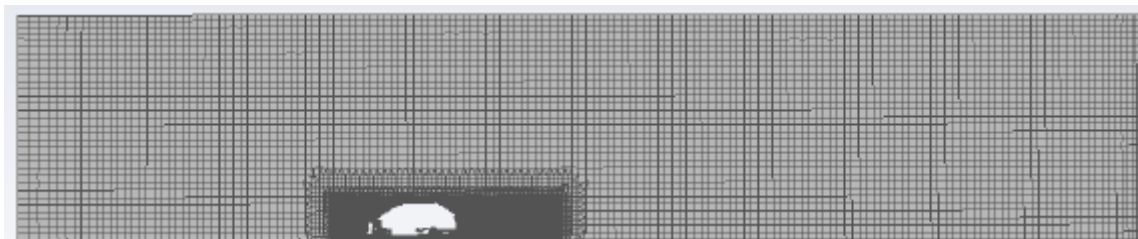


Рисунок 3.1 – Сітка.

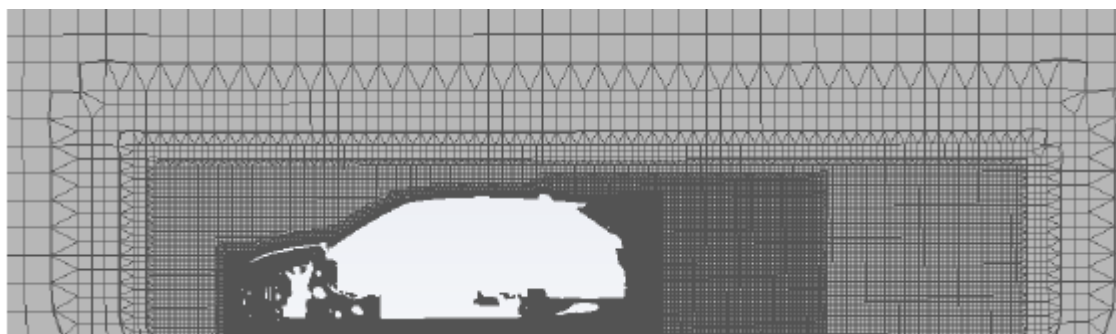


Рисунок 3.2 – Збільшення сітки навколо позашляховика А.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Скрипт сітки, використаний у цій роботі, орієнтований на максимальну асиметрію 0,9995 та загальну цільову асиметрію 0,98. Для обертових частин транспортного засобу, коліс та вентиляторів побудована сітка MRF (рухома система відліку). Призматичні шари побудовані як реконструкція навколо поверхні транспортного засобу, яка є зовнішнім кузовом, вихлопною системою силового агрегату, днищем кузова та колесами, що можна побачити на рисунку 3.2. Вона також шукає проблемні області сітки навколо підвісок, днища кузова, моторного відсіку, силового агрегату, бампера та паливного бака та реконструює їх.

Сітка також реконструйована, але без граничних шарів всередині моторного відсіку, рис. 3.3, де геометрія дуже складна та несиметрична. Сітка також повинна бути дуже точною всередині моторного відсіку, щоб впоратися з поведінкою потоку та теплопередачею.

Для простої моделі зони MRF виключені, і оскільки геометрія набагато простіша, розмір сітки не надто великий порівняно з повним транспортним засобом, лише 7,1 мільйона елементів. Для повної моделі транспортного засобу сітка побудована, як описано детальніше, і вимагає більшої сітки через складну геометрію. Побудована сітка має загалом 161 мільйон елементів, 456 мільйонів граней та 124 мільйони вузлів. Вона має загалом 10 зон та 379 зон граней. Варіацію u^+ на зовнішній поверхні транспортного засобу також можна побачити на рисунку 3.4.

Вона коливається в діапазоні приблизно 11-100+. Покращена обробка стінки зможе краще впоратися з цією варіацією u^+ , ніж нерівноважна функція стінки, яка найкраще функціонує для u^+ між 30-300.

Цю сітку було змодельовано та порівняно з аеродинамічними даними аеродинамічної труби CEVT, що означало, що абсолютні значення знаходяться в правильному діапазоні. Сітка також схожа на ту, що вже використовується в CEVT, щоб комбінований метод був сумісним для використання в майбутніх промислових роботах.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

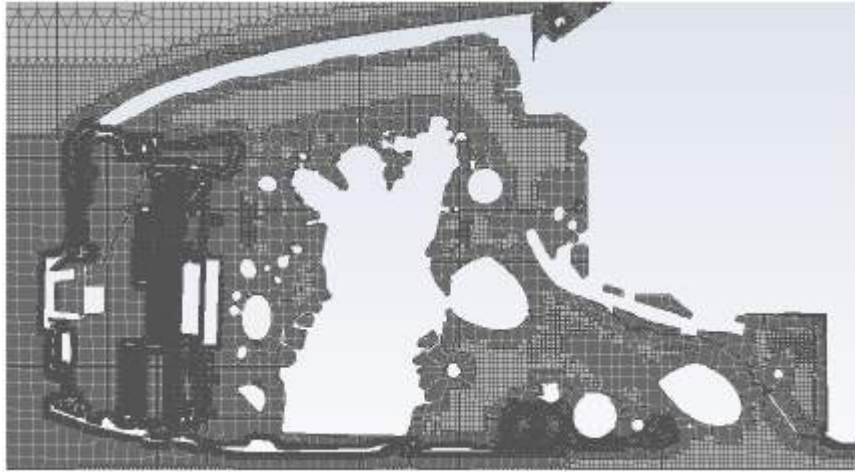


Рисунок 3.3 – Сітка всередині моторного відсіку позашляховика А.

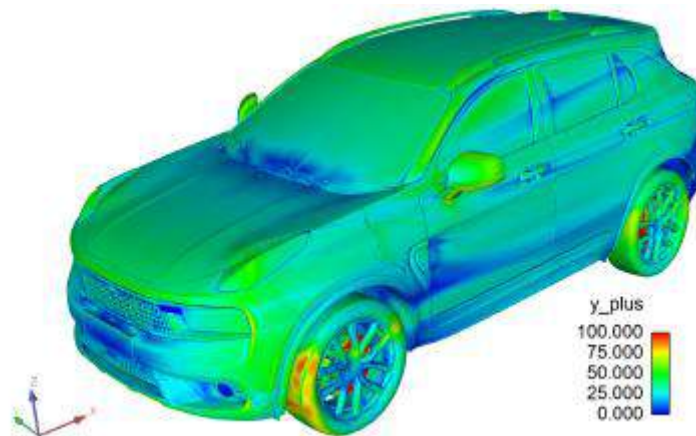


Рисунок 3.4 – Зміна y^+ на зовнішній поверхні для сітки.

Вона також має значення, тому значення, використані в цій роботі, можна порівняти з даними CFD, які вже існують, без занадто великої кількості змінених факторів, які могли б вплинути на результати.

3.3 Налаштування ANSYS Fluent.

У Fluent налаштовується випадок, визначаються граничні та робочі умови, а також встановлюються параметри розв'язання. Основні налаштування CFD для моделювання такі: 1) тиск на основі в'язкого потоку; 2) еалізована обробка стінок з покращенням k .

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАТ. 23067.02.06.00				

1) Граничні умови входу та виходу.

Корпус автомобіля являє собою 3D-об'єм і має 6 стінок. Двовимірну схему в $y = 0$ можна побачити на рисунку 3.5. Розріз знаходиться посередині автомобіля, а рідинний об'єм розширюється на однакову довжину в позитивному та негативному напрямках y . Існують різні граничні умови, встановлені для об'єму, де мінімальна поверхня x перед автомобілем є вхідним отвором швидкості, а максимальна поверхня x позаду - вихідним отвором тиску, далеке поле $\min z$ - це дорога та рухома земля. Дальні поля $\min y$, $\max y$ та $\max z$ задаються симетрично. Колеса автомобіля та вентилятор в охолоджувальному пакеті також налаштовані на обертання та керуються MRF.

Стіни встановлені симетрично, тому що таким чином легше обробляти їх у Fluent та Excel. Це пояснюється тим, що при встановленні симетрії замість стіни вони не будуть переплутані з деталями автомобіля під час розрахунку сил тощо. Також симетрія не має через себе ix і розраховується на відстані, більшій за поле потоку, на яке впливає транспортний засіб.

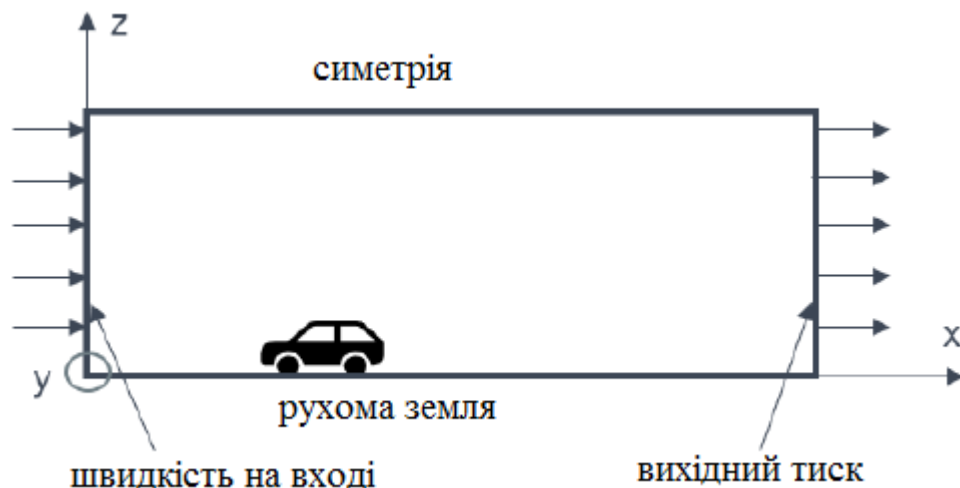


Рисунок 3.5 – Зовнішня рідина, розрахована у Fluent.

Сам автомобіль має довжину 4,5 м та ширину 2,5 метри. Розмір корпусу, як згадувалося вище, розраховано до необхідного розміру для

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

моделювання на позашляховику А. Якщо моделювання виконується на іншій моделі автомобіля, розмір корпусу буде перераховано таким чином, щоб симетрія знаходилася на відстані, що відповідає потужності цього транспортного засобу. Корпус та робоча рідина однакові як для простої, так і для несиметричної моделі, єдина різниця в об'ємах полягає в деталі внутрішніх об'ємів. Усі стіни не мають умови ковзання та мають розширені функції стінок.

2) Умови експлуатації.

Потік повітря має температуру 288 К. Для простої моделі сітка генерує вісім об'ємів: великий корпус - рідина з навколишнім повітрям, та сім внутрішніх об'ємів з верхнім та нижнім повітропроводами, радіатором, верхніми та нижніми повітропроводами до моторного відсіку та, нарешті, самим моторним відсіком. Радіатор та конденсатори виконані у вигляді пористих середовищ. Для повної моделі автомобіля об'єми будуються аналогічним чином.

Значення пористості взяті з промислових випробувань, проведених виробниками охолоджувального пакету. При реалізації комбінованого аеродинамічного та термодинамічного методу до кожної частини охолоджувального пакету також буде додано джерело. Джерело - це швидкість тепловиділення, розрахована на основі загальної енергетичної ємності.

3) Налаштування розв'язувача.

Аеродинамічний розв'язувач, подібний до того, що використовується сьогодні в CEVT, використовує звичайний стаціонарний розв'язувач для Fluent. Імпульс ставиться до другого порядку, а тиск – до стандартного, інакше всі схеми дискретизації ставляться до першого порядку. Зв'язок тиск-швидкість встановлено на 0,25 для тиску та імпульсу, а число куранта – на 20.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інші налаштування рішення, обрані для використання, – це схема зв'язування та градієнт на основі комірок Гріна Гауса.

Також перевіряється корекція градієнта Warped-Face.

Для версії Fluent 2019R1, випущена в січні 2019 року, псевдо-транз'єнтний розв'язувач було встановлено як стандартний розв'язувач [16]. Псевдо-транз'єнтний розв'язувач – це поширений метод розв'язання залежних від часу диференціальних рівнянь з частинними похідними.

Він все ще працює з RANS, як і в нормальному стаціонарному стані, але з дозволеними коефіцієнтами часової шкали для твердих та рідких комірок. Псевдо-транз'єнтний розв'язок дозволяє встановити коефіцієнт часової шкали для швидшої збіжності. Якщо моделювання має проблеми зі збіжністю, коефіцієнт часової шкали можна встановити нижче 1 одночасно зі збільшенням кількості ітерацій.

У такому порядку моделювання може зійтись, але це займе більше часу.

Якщо моделювання натомість має стабільну збіжність, коефіцієнт часової шкали можна збільшити вище за одиницю. Коефіцієнт часової шкали від 3 до 10 може бути, наприклад, дуже корисним для швидшої збіжності. В основному, найвищий коефіцієнт часової шкали, який не розходиться, є достатньо хорошим для використання. Число куранта не використовується для псевдо-транз'єнтного розв'язувача, коефіцієнт часової шкали керує збіжністю [16].

Коефіцієнти релаксації мають різні значення за замовчуванням для розв'язувача нормального стаціонарного стану та псевдо-транз'єнтного розв'язувача. Для нормального стаціонарного стану всі недо-релаксації встановлюються на 1. Для псевдо-транз'єнтного розв'язувача коефіцієнти псевдо-релаксації встановлюються на 1 для всіх, крім турбулентної в'язкості, де вона встановлюється на рівні 0,75.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

3.4 Післяобробка та процес моделювання.

Постобробка виконується в програмі Ensign. Різні контури створюються та зберігаються у файлах .png за допомогою командного скрипта Python, створеного для цього дослідження. Різні контури результатів будуть переглянуті в розділі результатів. Створені контурні графіки - це поля швидкості, щільності та температури. Інші створені показники - це графіки шкіри на транспортному засобі для визначення тертя шкіри, cr , y^+ , CD тощо. Післяобробка також виконується в Excel, де розраховуються різні сили та інші параметри для оцінки результатів. Тут порівнюються дельти між методами та пізнішими тестами параметрів проектування, а також оцінюються ефекти.

На основі цих дельт та результатів метод буде налаштовано та оптимізовано перед наступним моделюванням, а реалізації проектування будуть інтегровані для покращення проекту.

Ці результати та значення температури, масового потоку, CDA та CLA також будуть переглянуті в розділі результатів.

Перші моделювання будуть виконані на симетричній моделі позашляховика A зі спрощеною внутрішньою геометрією. Моделювання, виконане на простій моделі, проводиться для того, щоб полегшити геометричну практику під час налаштування комбінованого аеродинамічного та термодинамічного розв'язувача, а також для початкового тестування конструктивних параметрів, що впливають на потік охолодного повітря. Симетрична модель занадто далека від фактичної конструкції, щоб зробити будь-які реальні висновки, але може перевірити ідеї з літературного дослідження щодо того, як слід проектувати потік охолодного повітря з низьким опором. Моделювання також займе значно менше часу, ніж повна модель автомобіля, що є найбільш корисним при налаштуванні комбінованого аеродинамічного та термодинамічного методу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Першим кроком роботи є впровадження рівняння енергії в оригінальний аеродинамічний метод, налаштований для цього дослідження. Тут перша модель може бути використана, щоб побачити, як створити сітку, необхідну для конвергенції в моторних відсіках для комбінованого аеродинамічного та термодинамічного методу моделювання. Для розробки функціонального методу необхідно врахувати та впровадити методи, що використовуються для термодинамічного CFD-моделювання, в метод аеродинамічного моделювання.

Після успішного впровадження комбінованої аеродинамічної та термодинамічної моделі моделювання з хорошою збіжністю, її буде порівняно з аеродинамічним методом. Параметри, які будуть порівнюватися, це наявність різниці в CDA та CLA між методами, а також те, наскільки фактично змінюється температура в моторному відсіку, а також зовні автомобіля. Залежно від результату порівняння буде прийнято рішення про те, який метод буде використано для тестування параметрів конструкції.

Нарешті, для аналізу управління охолоджувальним повітрям та способів керування повітрям, що надходить до радіаторів та від них, буде проведено моделювання на несиметричній моделі позашляховика А з деталізованою внутрішньою геометрією та моторним відсіком. Щоб мати змогу дати рекомендації щодо того, які параметри конструкції відіграють важливу роль в управлінні охолоджувальним повітрям, буде проведено різноманітні тести. Спочатку буде змінено ширину отворів впускних та випускних отворів для повітря.

Потім між решітками та охолоджувальним пакетом будуть спроектовані повітроводи для ефективного направлення повітря. Сподіваємося, що це збільшить кількість повітря, що проходить через охолоджувальний пакет.

Потім решітку-заслінку можна буде частково герметизувати, і будуть проведені випробування щодо того, як її герметизувати найефективніше. Як

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

останній крок, будуть розроблені та впроваджені різні конструкції повітряних випускних отворів. Будуть проведені всі випробування параметрів конструкції та порівняні один з одним, щоб побачити, наскільки великий їхній вплив на загальний опір автомобіля. Потім найкращі варіанти конструкції будуть об'єднані, а оптимальна конструкція управління охолоджувальним повітрям буде оцінена та порівняна з оригінальною конструкцією позашляховика А.

3.5 Конфігурації конструкції для управління охолоджувальним повітрям.

3.5.1 Проста модель.

Для простої моделі будуть проаналізовані вхідні та вихідні отвори та їх вплив на потік. Спочатку моделювання буде проведено з обома відкритими вхідними отворами та закритим або вихідним отвором у колісній арці, або вихідним отвором у дні по одному, після чого обидва вихідні отвори будуть відкриті, а верхня та нижня решітки будуть закриті по черзі. Після чотирьох початкових моделювань будуть змодельовані комбінації. Комбінації відкриття: верхня решітка - вихідний отвір у дні, верхня решітка - вихідний отвір у колісній арці, нижня решітка - вихідний отвір у дні та нижня решітка - вихідний отвір у колісній арці. Коефіцієнти розподілу повітря (CD) та координації розподілу повітря (CDA) цих моделювань будуть порівняні з повністю відкритими та повністю закритими моделями, щоб побачити, чи може це дати деякі ранні рекомендації щодо параметрів проектування, що слід шукати під час аналізу проектування складної, несиметричної моделі.

Щоб перевірити, як потік впливає на переміщення всередині моторних відсіків, а також на прикордонний шар зовні автомобіля, решітки радіатора були перероблені, щоб мати однаковий масовий потік при одноразовому

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

відкритті. Нижню решітку було складніше зробити більшою через конструкцію передньої частини кузова. Тому верхню решітку зменшили, доки масовий потік не відповідав масовому потоку нижніх решіток, рис. 3.6.

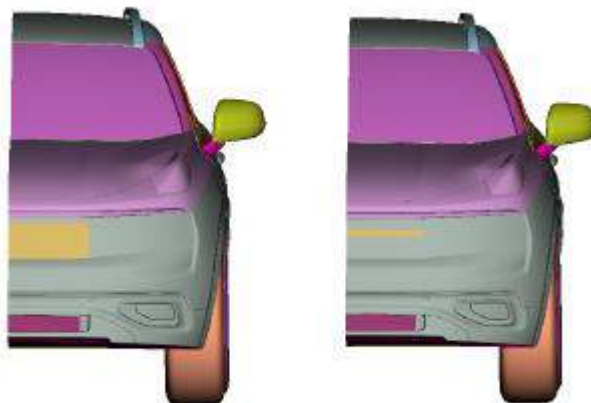


Рисунок 3.6 – Початковий розмір решітки ліворуч та модифікований розмір решітки праворуч.

Модифікована решітка значно менша за оригінальну та здебільшого цікава для тестування параметрів конструкції, а не для фактичного впровадження. Результат цих моделювань можна побачити в таблиці 3.1.

Модифікації також були внесені до випускного отвору кермової рубки. У реальній моделі вся поверхня кермової рубки не є випускним отвором. Вона значно менша. Також для тестування параметрів конструкції на простій моделі є сенс мати таку ж площу випускного отвору на випускному отворі кермової рубки, як і на випускному отворі дна. Тому було впроваджено та випробувано нову конструкцію поверхні випускного отвору кермової рубки. Конструкція являє собою високий прямокутний випускний отвір, який має на меті зробити вертикальний шлях вниз для потоку від верхньої решітки коротшим, він також розроблений так, щоб мати таку ж площу випускного отвору, як і випускний отвір дна, рис. 3.7.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

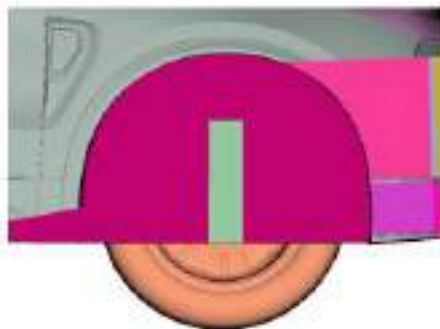


Рисунок 3.7 – Випускний отвір кермової рубки, спроектований як високий прямокутник.

3.5.2 Повна модель транспортного засобу.

Поверхні вентилятора. Для повної моделі транспортного засобу спочатку будуть проведені симуляції з різними відкритими вхідними та вихідними отворами, як і для симетричної моделі. У цьому дослідженні більшість симуляцій буде проведено на повній моделі транспортного засобу, оскільки вона найближче до реальності. Тут різні реалізації конструкції будуть реалізовані на основі дослідження літератури та результатів варіації вхідних та вихідних отворів. Оскільки це фактична модель, всі параметри конструкції, що нас цікавлять, повинні бути протестовані на цій моделі, щоб зробити будь-які реальні висновки. Ця модель, як показано, набагато детальніша, тому реалізації тут складніше виконати та займає більше часу. Симуляції також займають набагато більше часу, ніж для симетричної моделі. Тому конструкції, які тестуються, потребують постійної оцінки та врахування через обмеження в часі в цьому дослідженні. Щоб мати змогу виміряти масовий потік на вихідних отворах, поверхні вентилятора повинні бути спроектовані в Ansa. Вони були розроблені в ході ітеративного процесу, в якому проводилися симуляції, щоб побачити, чи відповідає масовий потік, що надходить у моторний відсік, масовому потоку, що виходить з нього. Ще один аспект, який слід враховувати під час проектування поверхонь вентиляторів, полягає в тому, щоб сконструювати їх таким чином, щоб витік

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря не був занадто великим. Розроблені поверхні вентиляторів пов'язані з поверхнями транспортного засобу, щоб мати змогу закривати вхідні та вихідні отвори для симуляцій, розміщуючи їх до стінок у Fluent. Невелика прийнятна кількість витоків - це повітря, яке виходить в інших місцях, через невеликі пружини тощо. Поверхні вентиляторів можна побачити на рисунку 3.8.

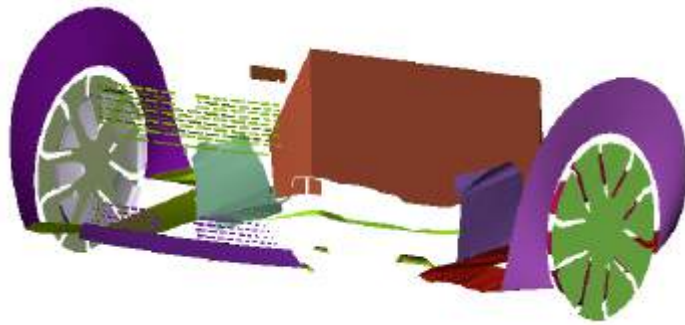


Рисунок 3.8 – Поверхні вентиляторів повної моделі автомобіля.

Якщо ми почнемо з вхідних отворів, світло-зелена пунктирна поверхня - це верхня поверхня вентилятора решітки, пунктирна фіолетова поверхня, а прямокутник нижче - нижня поверхня вентилятора решітки. Треті поверхні вхідного вентилятора - це світло-зелені поверхні, що стоять після решітки. Це повітря, яке надходить під автомобіль через днище кузова.

Коричнева поверхня вентилятора ззаду – це поверхня вентилятора вихідних отворів дверей, призначена для захоплення всього повітря, яке спускається вниз у моторному відсіку та виходить під автомобіль. Через складність геометрії найпростішим способом було спроектувати її у вертикальному напрямку, що збігається зі структурою моторного відсіку та тепловим екраном днища. Яскраво-зелена поверхня – це зазор між днищем кузова та підрамником днища, який захоплює повітря, що виходить звідти.

Що стосується колісної арки, то в обох випадках можна побачити різні поверхні.

Яскраво-синьо-зелена та темно-фіолетова – це поверхні вентилятора, створені на виході з моторного відсіку, як показано на рисунках 2.15 та 2.16.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інші чотири поверхні створені для вимірювання того, як повітря виходить з колісної арки. Світло-зелена та червона поверхні вимірюють, скільки потоку виходить вниз до землі перед колесом. Фіолетові закручені поверхні вимірюють, скільки потоку виходить за межі колеса. Поверхні всередині них – це поверхні вентиляторів, які вимірюють кількість повітря, що виходить через ободи.

Потім транспортний засіб буде змодельовано з одним відкритим вхідним отвором одночасно, одним закритим вихідним отвором і з низкою комбінацій, так само, як згадувалося для простої моделі.

Можливі реалізації позашляховика А.

Як згадувалося раніше в розділі методології, будуть зроблені різні реалізації конструкції, щоб побачити, чи можна ефективніше спрямовувати охолоджувальне повітря. Різні конструкції будуть представлені та описані на наступних сторінках. Конструкції були виконані в ansa. Для початку були реалізовані різні конструкції впускних каналів. Перша конструкція DT1 – це модель позашляховика А з єдиною відмінністю, що повітропровід між решітками та охолоджувальним пакетом мав заповнені всі отвори. Це зроблено для того, щоб зробити його герметичним об'ємом без витоку повітря.

Перший канал був спроектований так, щоб мати стінки, що слідували за решітками та максимально розширювалися в розмірі, перш ніж досягти охолоджувального пакету. Ця конструкція буде позначена як DT2.

Бічні стінки, а також верхня та нижня стінки були розроблені таким чином, щоб вони вирівнювалися з охолоджувальним блоком. Хоча нижній край верхньої решітки та верхній край нижньої решітки залишаються нез'єднаними з жодною стінкою. У DT2 була розроблена поверхня, яка виходить наполовину до охолоджувального блоку, і ця поверхня є дотичною до решітки. Конструкцію впускного каналу можна побачити нижче на

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рисунку 3.9. Вид ззаду між передньою частиною автомобіля та охолоджувальним блоком ліворуч, вид спереду з поверхнею решітки ліворуч.

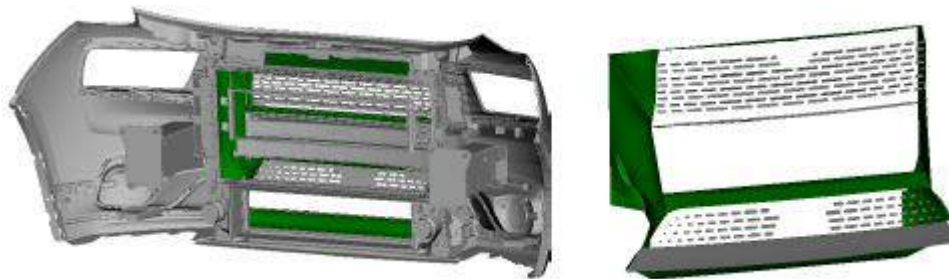


Рисунок 3.9 – Розширений поліноміальний канал наполовину, конструкція DT2.

У другій конструкції каналу ці поверхні, що йдуть наполовину до охолоджувального блоку, з'єднані одна з одною дотичною вигнутою поверхнею. Поверхня каналу огинає аварійну балку і все ще дозволяє охолоджувальному потоку рухатися вертикально та дозволяє впускному повітрю з обох впускних отворів вирівнюватися один з одним, перш ніж досягти охолоджувального блоку. Другий повітропровід буде позначено як конструкція DT3 і його можна побачити нижче на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 – Розширюваний поліноміальний канал, з'єднаний між рівнями впуску, конструкція DT3. Вид ззаду між передньою частиною автомобіля та охолоджувальним блоком ліворуч, вид спереду з решітчастою поверхнею ліворуч.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

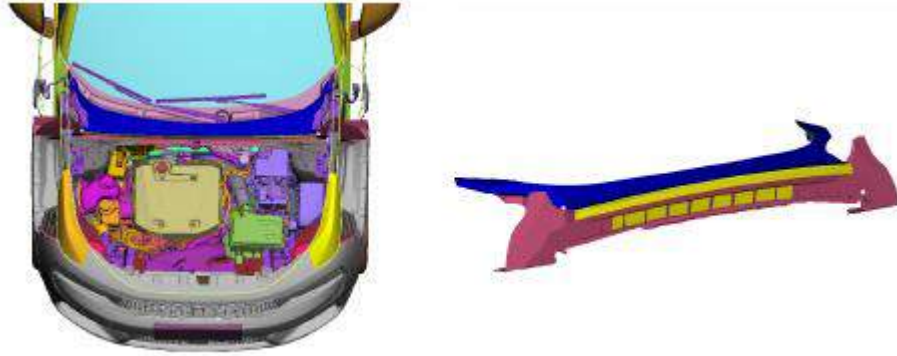


Рисунок 3.12 – Випускний канал лобового скла, вид з ізотопного ракурсу праворуч, та його положення, вид зверху ліворуч.

Його було випробувано як для випуску повітря на все переднє скло, так і лише по краях, де тиск найнижчий. Різні розміри випускних отворів можна побачити нижче на рисунках 3.13 та 3.14, де світло-блакитна поверхня позначає вихідну поверхню вентилятора.



Рисунок 3.13 – Випускний отвір лобового скла, вид ззаду, конструкція DT5.



Рисунок 3.14 – Випускний отвір лобового скла, вид ззаду, конструкція DT6

Оскільки переднє скло є зоною високого тиску, можуть виникнути труднощі з випуском повітря тут. Тому для випуску повітря із зовнішніх боків зроблено третій вихідний отвір лобового скла. Сам повітропровід лобового скла можна побачити синім кольором на рисунку 3.15.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



Рисунок 3.15 – Випускний повітропровід лобового скла для конструкції DT7.

Повітропровід лобового скла DT7 однаковий для DT5 та DT6, за винятком того, що повітря виходить через бічні сторони повітропроводу, а не ззаду. Тому задні кінці були перероблені, щоб направляти повітря в потрібне місце назовні. Конструкцію можна побачити на рисунку 3.16, як розташування в моторному відсіку, так і розташування випускного отвору.

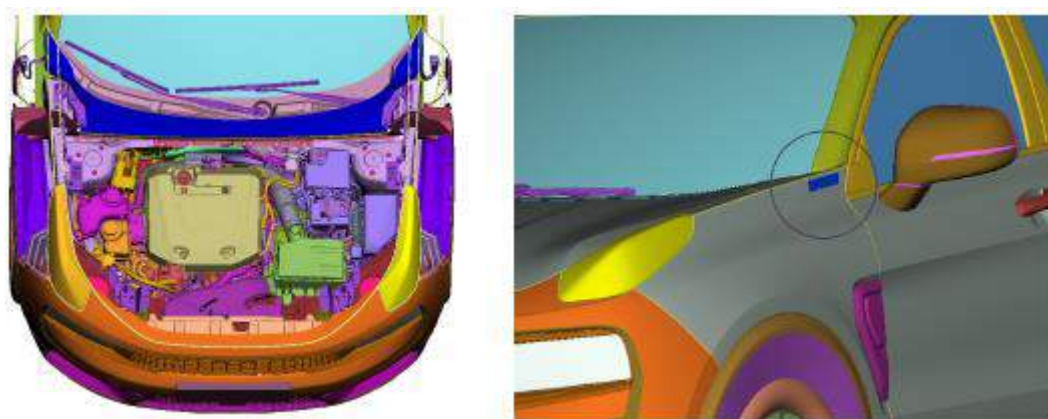


Рисунок 3.16 – Вихідний отвір збоку лобового скла, DT7, вихідний отвір, що видно зовні, праворуч, та повітропровід, що видно зверху, ліворуч.

Ще одна конструкція, яка буде випробувана, - це повітропровід залишкового вентилятора. Повітропровід залишкового вентилятора має те саме призначення, що й випускні отвори лобового скла, і замінить випускні отвори лобового скла, якщо він буде краще функціонувати як оптимізатор потоку охолодження. Повітропровід залишкового вентилятора розроблений для запобігання підйому повітря до ущільнення моторного відсіку, спричиненню турбулентності потоку та втраті енергії тут. Він спроектований як поліноміальний повітропровід, який буде виводити потік після

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вентилятора охолоджувального блоку, стискати його над двигуном, а потім направляти його вниз до рівня підлоги. Конструкцію можна побачити з охолоджувальним блоком та підкапотною пластиною на рисунку 3.17.

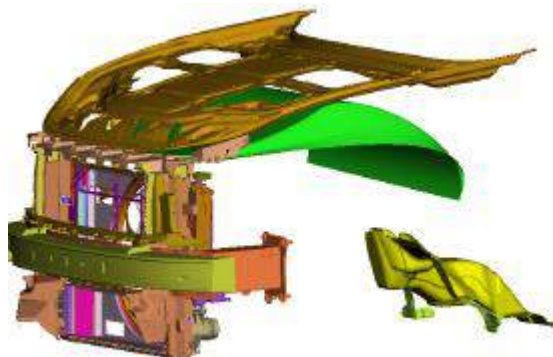


Рисунок 3.17 – Після цього зеленим кольором видно повітропровід вентилятора з охолоджувальним блоком перед ним, який спрямовує повітря до теплового екрану днища кузова, де розташований вихідний отвір для дверей. Конструкція DT8.

Саму частину повітропроводу після вентилятора можна побачити зеленим кольором на рисунку 3.18.

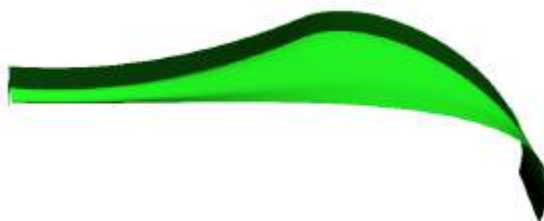


Рисунок 3.18 – Повітропровід після вентилятора, DT8.

Остаточна реалізація проекту перевірить, як ефективніше виводити повітря через рульову рубку. Проблеми, що спричиняють підвищений опір навколо передніх коліс, це, наприклад, повітря, що потрапляє прямо вниз всередину колеса, та повітря, що виходить перед колесом. Тому було розроблено конструкцію, яка намагається спрямувати повітря за колесом і запобігти його потраплянню прямо вниз до землі. Конструкцію вихідного

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

каналу рульової рубки можна побачити збоку та знизу на рисунку 3.19. Ця конструкція отримала назву «канал рульової рубки» та є конструкцією DT9.

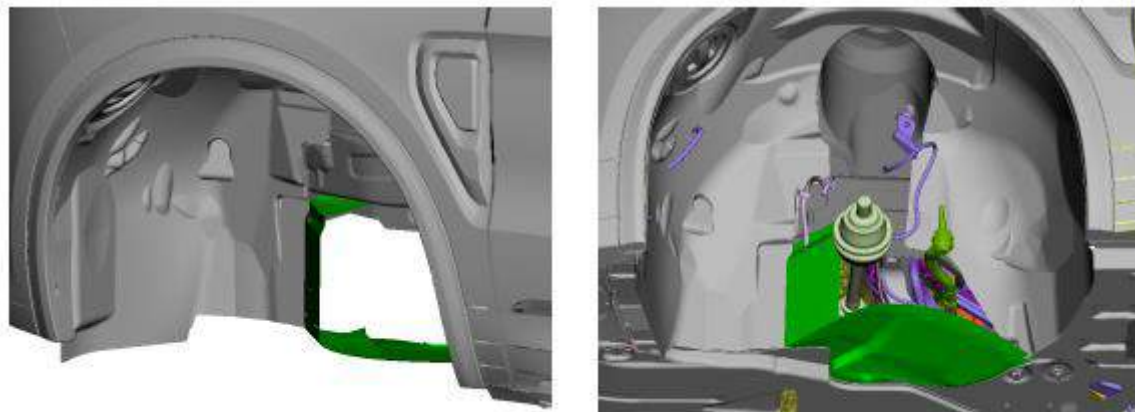


Рисунок 3.19 – Конструкція вихідного каналу рульової рубки, DT9.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ, ПОВНА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

4.1 Тестування параметрів конструкції.

Картування потоку охолодження. Для тестування параметрів основним параметром, що цікавить, буде загальний C_{DA} . Джерела енергії не змінюватимуться, а коливання температури не матимуть суттєвого інтересу між різними конструкціями. Температурне поле генерується з постійних джерел енергії для всіх тестованих параметрів. Тому представлений результат у цьому розділі здебільшого складається з контурів швидкості та порівняння сил.

Цікавим параметром для тестування є потік у напрямку z та напрямку y . Потік у напрямку z , що протікає всередині моторного відсіку, збільшить опір, а потік, що виходить у напрямку z , порушить прикордонний шар зовні. Величина швидкості z була нанесена на графік всередині моторного відсіку та може бути видна у двох різних площинах, рис. 4.1.

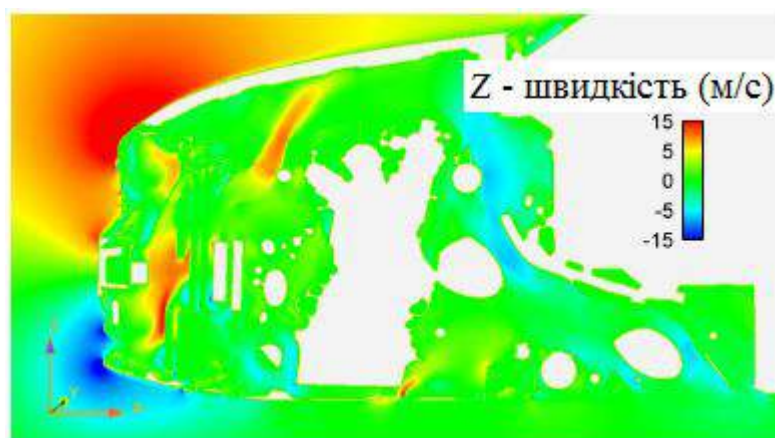


Рисунок 4.1 – Z - швидкість у центрі моторного відсіку.

На рисунку 4.1 видно, що z -швидкість майже дорівнює нулю всередині моторного відсіку. Хоча можна помітити, що перед двигуном є деякі червоні

						КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			47

області, які вказують на місця, де потік рухається вгору в позитивному напрямку z . Світло-блакитні області показують, де швидкість рухається вниз у негативному напрямку z до двері та вихідного отвору рульової рубки.

Коли йдеться про потік у напрямку y , цікаво розглянути як у площині xy для моторного відсіку, так і те, як потік рухається з вихідного отвору рульової рубки. На рисунку 4.2 нижче видно контурну діаграму посередині моторного відсіку.

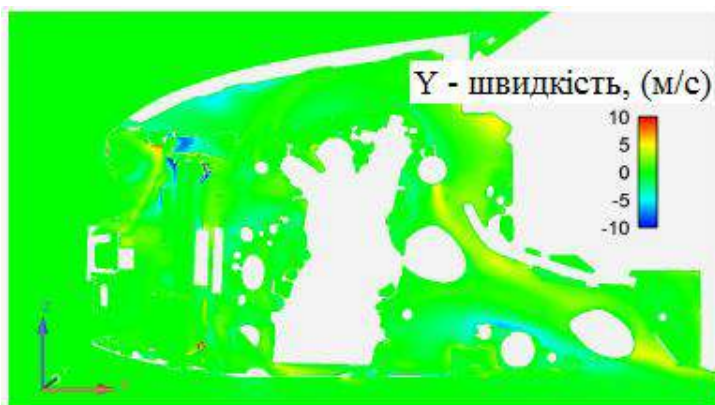


Рисунок 4.2 – Y - швидкість у центрі моторного відсіку.

На рисунку вище видно, що рух потоку в напрямку y не надто великий, аж до місця за двигуном, де потік, ймовірно, рухається до вихідних отворів рульової рубки. Для візуалізації цих компонентів рульової рубки було створено контурну платформу в площині xy , вирівняну з вихідним отвором рульової рубки, яку можна побачити на рис. 4.3.

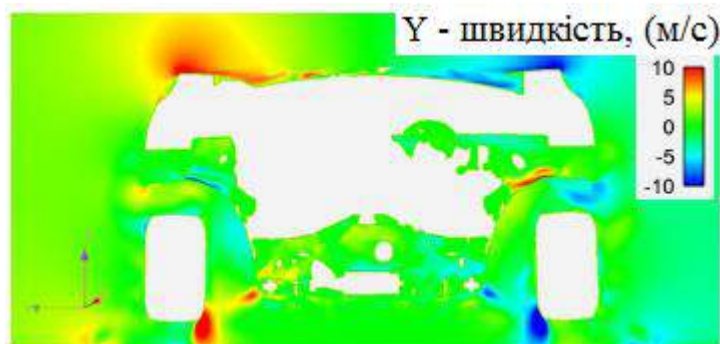


Рисунок 4.3 – Y - швидкість на вихідних отворах колісної арки.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Потік рухається за подібною схемою з обох боків транспортного засобу. Швидкість є негативною та позитивною з різних боків через положення коліс на однаковій відстані від осі x , яка проходить посередині автомобіля. Здається, що повітря рухається перпендикулярно до вільного потоку, якщо воно потрапляє за колесом і проходить через ободи. На рисунку 4.4 видно, що повітря протікає в напрямку z вниз до землі.

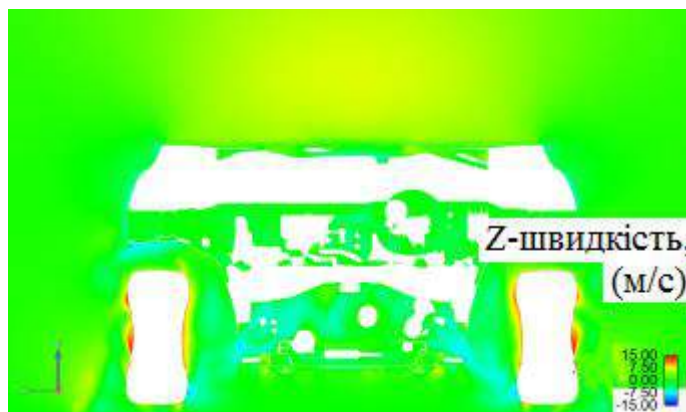


Рисунок 4.4 – Z-швидкість на виходах колісної арки.

Це також проблема турбулентності навколо автомобіля, що спричиняє в'язкий опір, і це те, що повітропровід лобового скла намагатиметься усунути. Потік також присутній тут, подібний з обох боків автомобіля.

Закритий та відкритий транспортний засіб. Спочатку визначається опір охолоджувального повітря, таблиця 4.1. Модель транспортного засобу не може бути змодельована з увімкненим обігрівом, оскільки моделювання не може впоратися з теплом, що генерується із закритим потоком та внутрішнім об'ємом без рухомого повітря. Тому це порівняння проводиться з використанням холодного моделювання, але за законом ідеального газу. Це робиться для оцінки відсотка опору охолоджувального повітря.

Зменшення опору охолоджувального повітря для закритого позашляховика А може свідчити про те, що опір охолоджувального повітря

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

має таке ж значення, як і C_{DA} (зона тяги). Це також число, яке є метою роботи, щоб максимально зменшити його.

Таблиця 4.1 – Відкриті та закриті отвори.

ID	Відкриті входні отвори	Відкриті вихідні отвори	C_{DA}	m (кг/с)	A_o/A_i
FV1.1	Всі	Всі	Ref	1,66	4,07
FV1.2	Закрито	Закрито	7,2%	0	-

Перші випробування параметрів конструкції були проведені аналогічно, як і для симетричної моделі. Верхня та нижня решітки закривалися по одному разу, а також вихідний отвір у колісній арці та вихідний отвір у днищі також закривалися по одному разу. Моделювання також проводилося з різними комбінаціями відкритих входних та вихідних отворів для висновків. Ці комбінації повинні мати одночасно відкриті вихідний отвір верхня решітка - днище, вихідний отвір верхня решітка - колісна арка, вихідний отвір нижня решітка - днище та вихідний отвір нижня решітка - колісна арка. Також слід зазначити, що входний отвір у днищі кузова був відкритий для всіх симуляцій, крім закритого транспортного засобу. Коли двері відкриті або закриті, нижній вихідний отвір у днищі під підрамником також залишається відкритим. Результати моделювання можна побачити в таблиці 4.2.

Моделювання підтверджує теорію про те, що для збільшення масового потоку, що входить у транспортний засіб, необхідно збільшити площу випускного отвору, це також вказує на те саме, що й для симетричної моделі, що наявність колісної арки як єдиного випускного отвору значно збільшує опір. Однак обидва отвори здаються необхідними, можливо, вихідний отвір на лобовому склі також може бути корисним. У наступній таблиці

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

результатів буде розглянуто різні варіанти реалізації конструкції та їх вплив на опір охолоджувального повітря.

Таблиця 4.2 – Різноманітні отвори та вхідні отвори (повний транспортний засіб).

ID	Відкриті вхідні отвори	Відкриті вихідні отвори	C_{DA} (м)	m , (кг/с)
FV1.1	Всі	Всі	Довідкові	1.66
FV1.2	Нижня решітка	Всі	-0.3%	1.25
FV1.3	Верхня решітка	Всі	-0.3%	1.25
FV1.4	Всі	підлога	-0.4%	1.24
FV1.5	Всі	колісна арка	+0.9%	1.49
FV1.6	Нижня решітка	підлога	-1.1%	1.10
FV1.8	Нижня решітка	колісна арка	+0.3%	1.23
FV1.7	Верхня решітка	колісна арка	-0.6%	1.10
FV1.9	Верхня решітка	підлога	-1.6%	0.905

Реалізації конструкції, таблиця 4.3. Для повної моделі були виконані та впроваджені різні проекти протягом ітераційного процесу, як зазначено в розділі про методологію. Результати моделювання різних проектів можна побачити нижче. Всі вони порівнюються з моделюванням оригінального позашляховика А з герметичним об'ємом між решітками та пакетом охолодження. Іншими словами, DT1 є основою для всіх інших проектних реалізацій. m_{cp} - це середня дельта для масового потоку через деталі пакету охолодження: конденсатор, радіатор, радіатор акумулятора (BRAD) та охолоджувач повітря для зарядки (CAC) для кожного проекту, електричний радіатор (ERAD) було вилучено через те, що воно завжди значно збільшується з впускним каналом.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Таблиця 4.3 – Реалізація конструкції.

ID	конструкції	ΔC_{DA}	m_{in} (кг/с)	m_{cp} (кг/с)
DT1	Закриті отвори	-0,1%	1,610	+0,013
DT2	Впускний канал 1	-0,6%	1,541	+0,034
DT3	Впускний канал 2	-0,6%	1,525	+0,038
DT4	Впускний канал 3	-0,2%	1,585	+0,030
DT5	Вихідний отвір лобового скла	0,000	1,594	-0,022
DT6	Вихідний отвір краю лобового скла	0,000	1,600	-0,011
DT7	Вихідний отвір бокового лобового скла	-0,1%	1,618	+0,020
DT8	Повітропровід після вентилятора	-0,3%	1,59	+0,013
DT9	Повітропровід колісної арки	-0,7%	1,595	-0,008
DT10	Повітряний канал 1	-6,4%	0,791	-0,264
DT11	Повітряний канал 2	+0,8%	1,041	-0,160

Впускні канали працюють ефективно та збільшують кількість повітря, що проходить через охолоджувальний пакет. Конструкція DT4 дає найгірші результати з усіх, що не дивно, враховуючи, що вона дозволяє повітрю потрапляти в двигун. Однак це єдина реалістична конструкція для позашляховика А.

Впускні канали стискають повітря та направляють його без надмірних втрат енергії від розділення до охолоджувального пакету. Щоб краще уявити, як збільшився масовий потік через охолоджувальний пакет, було побудовано поле швидкості для електричного радіатора та радіатора акумулятора, які є двома частинами, з якими повітря стикається спочатку. Це можна побачити на рисунку 4.5.

Впускний канал допомагає збільшити масовий потік ліворуч на поверхні радіатора, а також видалити вторинні зони потоку з поверхні радіатора. Зони низької швидкості посередині радіатора також трохи

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

зменшуються. Це збільшення масового потоку буде вважатися позитивною дельтою, яку можна використовувати для реалізації конструкцій, що зменшують масовий потік через охолоджувальний пакет або, зрештою, зменшують розмір решітки радіатора.

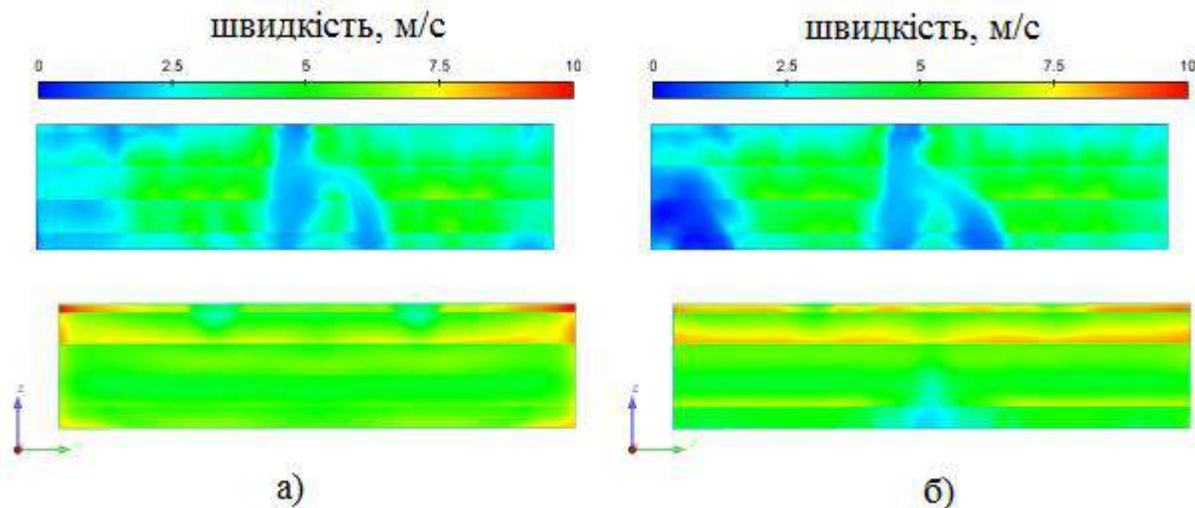


Рисунок 4.5 – Контур масового потоку над електричним радіатором та радіатором акумулятора в передній частині охолоджувального блоку.

а) Спортивний позашляховик + впускний канал; б) Спортивний позашляховик А.

Коли справа доходить до реалізації випускного отвору лобового скла, це набагато складніше. Випустити повітря на переднє скло було неможливо і не дало жодного позитивного впливу на C_{DA} . Повітропровід у кермовій ниші найбільше зменшує опір, але зменшує масовий потік через охолоджувальний пакет. Менший повітряний канал, DT10, має набагато менший вихідний отвір, ніж звичайні випускні отвори, але все ж сприяє цікавому зменшенню C_{DA} . Тому був створений повітряний канал 2, який має таку ж площу випускного отвору, як і вихід у кермі та рульовій ниші разом. У цьому випадку, хоча це збільшує C_{DA} , а також збільшує масовий потік через охолоджувальний пакет, це вже не краще рішення, ніж реалістичні рішення.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

На рисунку 4.6 нижче видно, як зменшився розмір сліду за днищем кузова між FV1.1 та DT10.

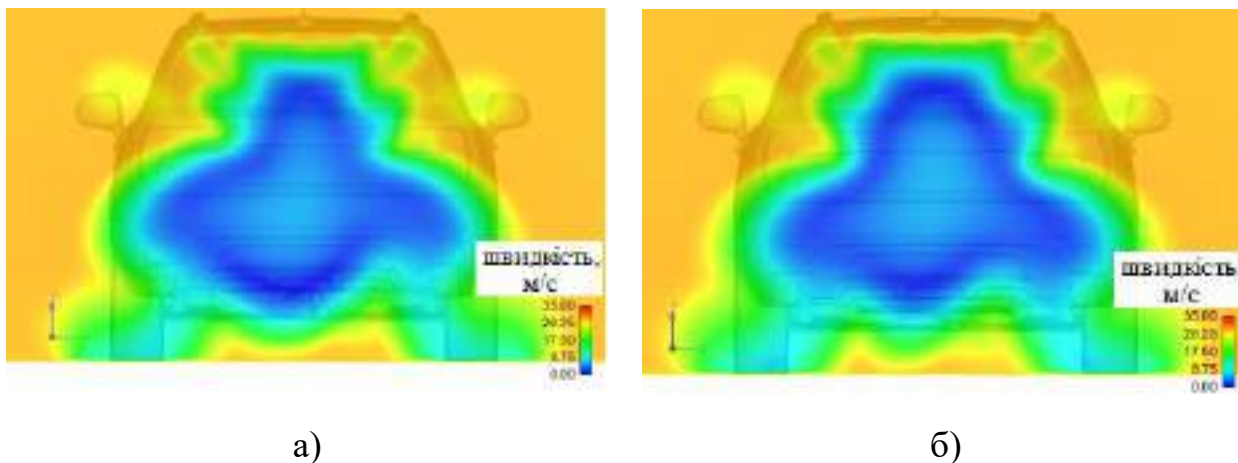


Рисунок 4.6 – Порівняння базового сліду з повітряним каналом та без нього:
 а) Спортивний позашляховик А з повітряним каналом 1; б) без каналу.

Видно, що базовий слід значно менший під крилом, а також він менший з боків через закритий вихідний отвір у рульовій рубці. Також видно збоку транспортного засобу, що базовий слід позаду транспортного засобу, рис. 4.7, зменшений за розміром. Є більше областей з високою швидкістю, і слід не так сильно простягається в довжину позаду транспортного засобу, що зменшує загальний C_{DA} .

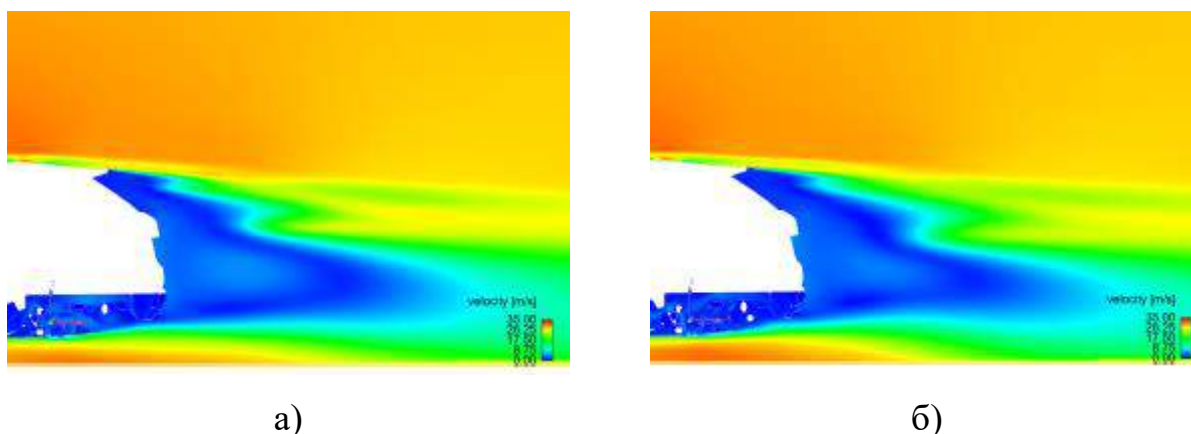


Рисунок 4.7 – Порівняння базового сліду ($y=0.4$):
 а) з малим повітряним каналом; б) без нього,

Однак, для більшого повітряного каналу нижня частина сліду більша за розміром, ніж у позашляховика А. Також під автомобілем спостерігається більше розділення та розвинена турбулентність. Це можна пояснити тим, що коли повітряний канал збільшується в розмірі, туди виходить більше повітря, що заважає підвісці заднього колеса та вихлопній системі. Ці ефекти можна побачити нижче, коли більший повітряний канал DT11 порівнюється з базовим автомобілем на рисунку 4.8.

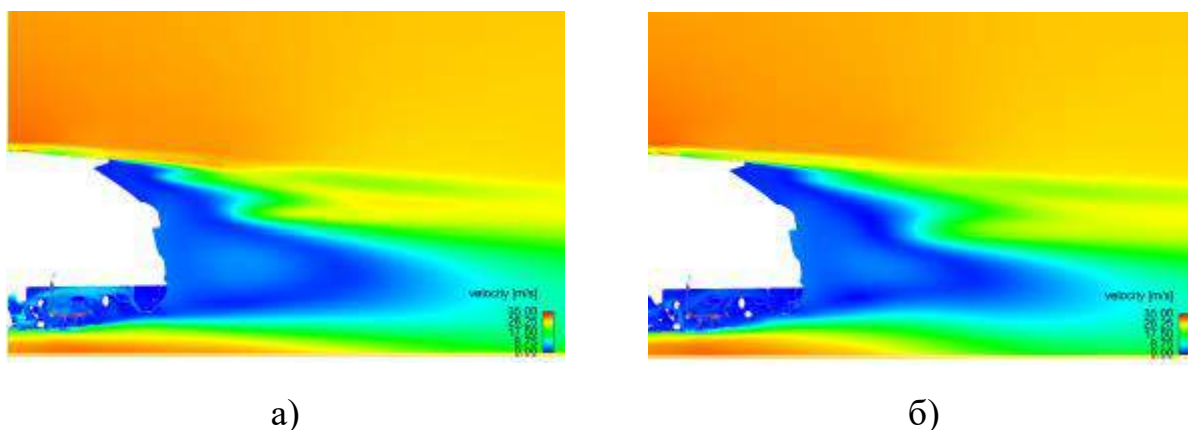


Рисунок 4.8 – Порівняння базового сліду, канал 2 ($y=0.4$):
а) з повітряним каналом; б) без нього,

Впускні канали 1, 2 та 3 зменшують масовий потік через решітки, але збільшують потік через охолоджувальний пакет, що є позитивним показником порівняно з оригінальним випадком FV1.1. Масові потоки через охолоджувальний пакет можна побачити нижче в таблиці 4.4. Впускні канали можна побачити на рисунках 3.9, 3.10 та 3.11.

Масовий потік через охолоджувач повітря для зарядки залишається постійним для всіх повітропроводів, але масовий потік через конденсатор, радіатор, решітку радіатора та радіатор збільшується за допомогою повітропроводів. Це дуже хороший результат, який вказує на те, що розмір решітки радіатора можна зменшити, пропускаючи таку ж кількість повітря через охолоджувальний блок, як і для спортивного позашляховика.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Таблиця 4.4 – Комплект охолодження з масовою витратою - Вхідні канали.

ID	Дизайн	m_{cond} (кг/с)	m_{rad} (кг/с)	m_{brad} (кг/с)	m_{erad} (кг/с)
FV1.1	Базовий позашляховик	0,92	0,82	0,20	0,32
DT2	Вхідний канал 1	0,98	0,87	0,23	0,40
DT3	Вхідний канал 2	0,98	0,87	0,23	0,40
DT4	Вхідний канал 3	0,96	0,85	0,22	0,39

4.2 Вибір оптимальних каналів для позашляховика.

З усіх випробувань параметрів конструкції було об'єднано різні конструкції, що покращили характеристики охолодження, щоб, сподіваємося, забезпечити ідеальний сценарій охолодження повітрям для гібридного автомобіля. Повітропровід рульової рубки зменшив кількість повітря, що проходить через охолоджувальний пакет, але мав такий позитивний вплив на опір, що його все одно об'єднують з іншими конструкціями. Були об'єднані реалізації: реалістично спроектований повітропровід (DT4), повітропровід рульової рубки (DT8) та повітропровід залишкового вентилятора (DT9), а результати порівняно з базовим автомобілем у таблиці нижче 4.5.

Таблиця 4.5 – Порівняння дизайнів.

№	Дизайн	C_{DA}	m_{in} (кг/с)	m_{cp} (кг/с)
FV1.1	Базовий	Базовий	1,66	Базовий
TD1	Проект	- 0,7%	1,54	+0.036

Перша версія проекту, TD1, зменшує опір на 0,7%. Це стільки ж, скільки й повітропровід рульової рубки, але завдяки вхідному повітропроводу він все ще має масовий потік через охолоджувальний пакет, який вищий, ніж у базового. Тому було проведено випробування, щоб максимально зменшити розмір решітки, але зберегти масовий потік через охолоджувальний пакет автомобіля. Два різні способи герметизації верхньої решітки успішно підтримували масовий потік через охолоджувальний пакет на більшому рівні, ніж у базовому авто. Ці дві модифікації решітки можна побачити на рисунку 4.9. Червоні поверхні позначають герметичні частини решітки, а зелені – відкриті ділянки. Нижня решітка не була обрана для жодних змін через те, що масовий потік через охолоджувач повітря для зарядки не збільшується разом із впускними каналами. Якщо нижня решітка герметизована, масовий потік через охолоджувач повітря для зарядки стане ще меншим.



Рисунок 4.9 – Модифікації решітки.

Нижня решітка призводить до того, що не збільшується масовий потік через повітроводи. Тому жодних випробувань на герметизацію нижньої решітки не проводилося. Результати герметизації решітки можна побачити в таблиці 4.6 нижче. Зменшення площі верхньої решітки представлено як ΔA .

Герметизація решітки є ефективним способом зменшення C_{DA} . Масовий потік через пакет охолодження майже однаковий для базового, TD2

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

та TD3. Більша герметизація решітки, як у об'єданого TD4, призводить до занадто низького масового потоку через пакет охолодження. У цьому розділі TD2 буде додатково проаналізовано разом із базовим позашляховиком А, щоб показати, які аеродинамічні результати він робить для транспортного засобу.

Таблиця 4.6 – Різні методи герметизації верхньої решітки.

№	дизайн	C_{DA}	m_{in} (кг/с)	m_{cp} (кг/с)	ΔA
FV1.1	Базовий	Базовий	1,66	Базовий	-
TD2	GM1	-0,9%	1,53	+0,0005	-9,9%
TD3	GM2	-0,8%	1,53	+0,0023	-6,7%
TD4	GM3	-0,8%	1,51	-0,0020	-15,1%

Іншим параметром, який не був основним предметом цієї роботи, був зв'язок підйомної сили з площею $C_L A$. У таблиці 4.7 можна побачити, як це впливає на позашляховик А, позашляховик А-закритий, обрані конструктивні реалізації з решітками радіатора та без них. Це зроблено для кращого розуміння того, що внесення змін для зменшення опору також вплине на підйомну силу та баланс підйомної сили між передньою та задньою частинами.

Тут можна стверджувати, що різниця між передньою та задньою підйомною силою змінилася між базовим та проєктним варіантами. Імпульс навколо автомобіля змінив напрямок, хоча значення коефіцієнта підйомної сили внизу та ззаду дуже малі. Якщо проаналізувати дані для базового авто з усіма успішними реалізаціями дизайну DT4, DT8 та DT9, можна побачити, що впускний повітропровід та повітропровід залишкового вентилятора фактично збільшують передню та задню підйомну силу, а повітропровід у нижній частині крила має протилежний вплив на передню підйомну силу. Повітропровід у нижній частині крила також загалом зменшує підйомну

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

силу, а закриття решітки радіатора має такий самий ефект, що можна побачити, якщо порівняти його із закритим транспортним засобом.

Таблиця 4.7 – Порівняння підйомної сили між позашляховиками А та конструктивними реалізаціями.

№	Ідентифікатор конструкції	ΔC_{LA} (м)	ΔC_{Lf}	ΔC_{Lr}	$C_{Lf} - C_{Lr}$
FV1.1	Базовий	Базовий	Базовий	Базовий	Позитивно
FV1.2	Закриті решітки	-0,030	-0,054	+0,043	Негативно
DT4	Впускний повітропровід	+0,07	+0,02	+0,01	Позитивно
DT8	Повітропровід після вентилятора	+0,05	+0,00	+0,02	Позитивно
DT9	Повітропровід рульової рубки	-0,016	-0,08	+0,02	Негативно
TD1	Проект	-0,028	-0,011	+0,02	Негативно
TD2	GM1	-0,020	-0,010	+0,02	Негативно
TD3	GM2	-0,024	-0,011	+0,02	Негативно

Ще одним фактором для порівняння є те, як масовий потік входить і виходить з моторного відсіку, про що можна прочитати в розділі вище. Ці дані не мають великого значення, але можуть допомогти пояснити результати, наведені в таблиці 4.8. Тут m_{ug} – масовий потік через верхню решітку радіатора, m_{lg} – масовий потік через нижню решітку радіатора, а m_{ub} – масовий потік через днище кузова під двигуном.

Таблиця 4.8 – Порівняння масової витрати через вхідні отвори.

№	Дизайн	m_{ug} (кг/с)	m_{lg} (кг/с)	m_{ub} (кг/с)
FV1.1	Базовий	0,723	0,813	0,120
TD2	Проект з GM1	0,672	0,744	0,106

Що стосується повітря, яке надходить у решітку, то видно, що зменшення однакове для всіх впускних отворів, зменшення у відсотках приблизно однакове. Далі розглянемо масовий потік через випускні отвори, таблиця 4.9. Тут m_{fo} – масовий потік через вихідний отвір, m_{sf} – масовий потік, що виходить під підрамником моторного відсіку, m_{wr} – масовий потік через праву колісну арку, m_{wl} – масовий потік через ліву колісну арку.

Аналізуючи масовий потік через вихідні отвори, можна побачити, що масовий потік через вихідні отвори зменшився більше, ніж масовий потік через вихідний отвір у нижній частині. Фактично, вихід у нижній частині становить 27% повітря, що виходить в обох випадках, але кількість повітря, що виходить через кермові рубки, зменшилася з 67% до 62%. Це, звичайно, пов'язано з впровадженням повітропроводу в кермовій рубці. Результати зміни аеродинаміки та термодинаміки представлені на рисунках 4.10 – 4.12.

Таблиця 4.9 – Порівняння масової витрати через виходи.

№	Дизайн	m_{fo} (кг/с)	m_{sf} (кг/с)	m_{wl} (кг/с)	m_{wr} (кг/с)
FV1.1	Базовий	0,432	0,086	0,626	0,432
TD2	Проект з GM1	0,418	0,086	0,550	0,395

Деякі контури мають чорні кола, щоб краще показати, які області були покращені за допомогою модернізації. Спочатку на рисунку 4.28 видно, як повітря було успішно спрямоване та стиснене за допомогою вхідного повітропроводу та після вентиляторного повітропроводу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

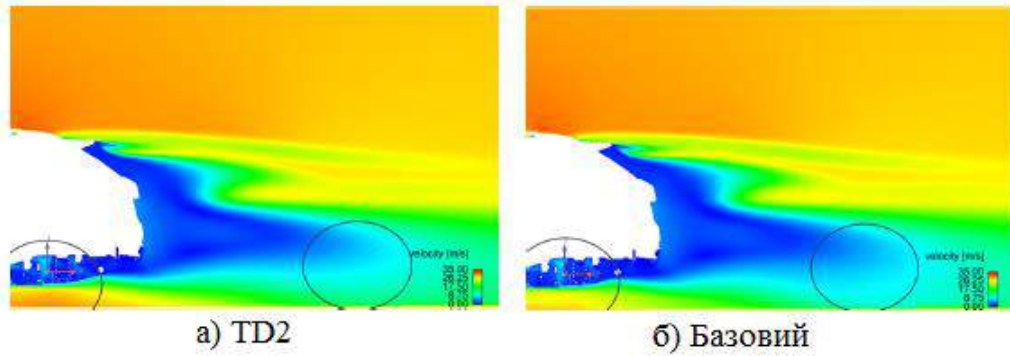


Рисунок 4.10 – Порівняння зворотного сліду поблизу коліс у площині зрізу, $y=0,5$.

На рисунку 4.11 можна візуалізувати повітря, що виходить через передню колісну арку. Турбулентне повітря на даху моторного відсіку зникло, а сліди одразу за ободами зменшилися та змінилися в розмірі. Ця зміна сліду переднього колеса також вплине на сліди за ним, що буде видно на наступних зображеннях.

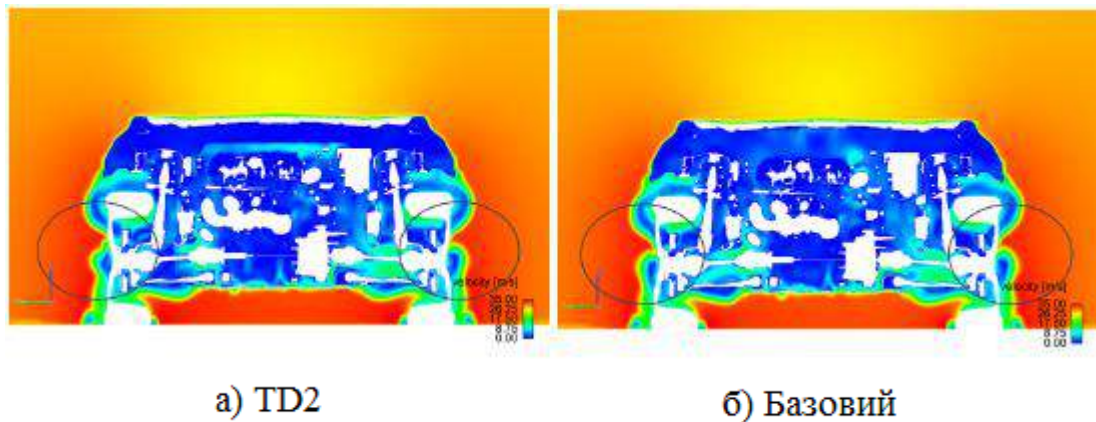


Рисунок 4.11 – Порівняння сліду в площині зрізу X на передніх шинах.

На рисунку 4.10 можна побачити, як зменшився в розмірі базовий слід і як зменшився граничний шар з меншими швидкостями, що призводить до позитивного аеродинамічного ефекту.

На рисунку 4.12 це важче побачити, але слід всередині задніх коліс зменшився в розмірах, а площі вільного потоку стали більшими.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

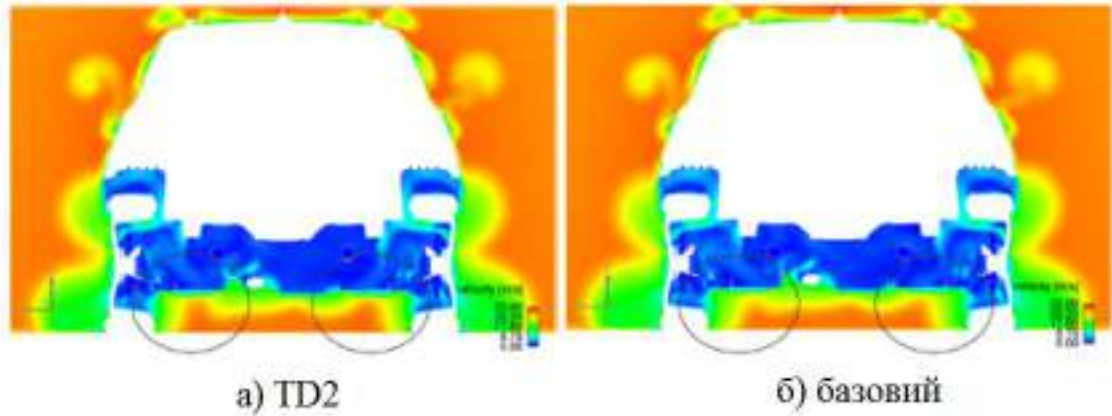


Рисунок 4.12 – Порівняння сліду в площині зрізу X на задніх шинах.

Нарешті, на рисунку 4.13 це також важче візуалізувати, але області нульової швидкості за задніми шинами майже зникли, а базовий слід трохи зменшився в розмірі з боків.

Інші цікаві коефіцієнти швидкості для порівняння - це швидкість u та швидкість z , щоб побачити, чи були видалені небажані вектори швидкості. На рисунку 4.14 можна побачити, як змінюється швидкість u , коли повітря рухається до вихідного отвору колісної арки. З повітроводом залишкового вентилятора можна побачити, що деякі області швидкості u видалені або зменшені через те, що повітровод направляє повітря вниз до вихідних отворів, замість того, щоб повітря стикалося з конструкцією двигуна.

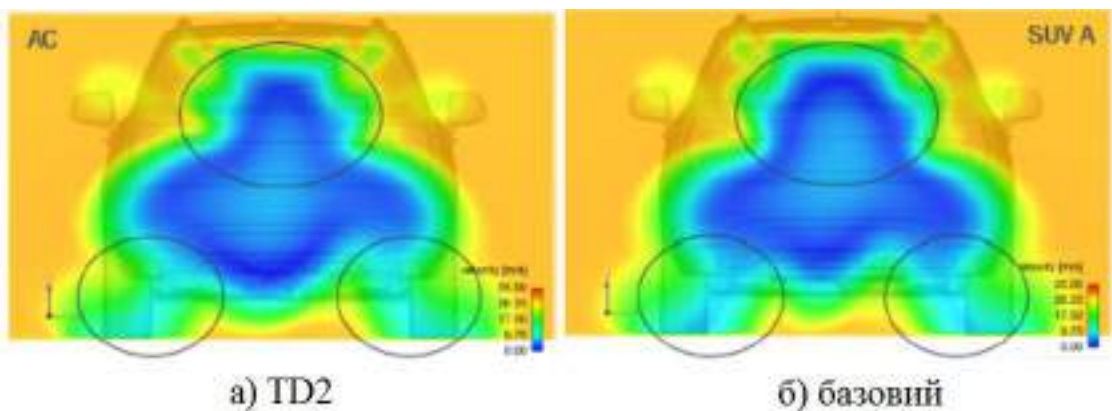


Рисунок 4.13 – Порівняння базового сліду, 1 метр позаду транспортного засобу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

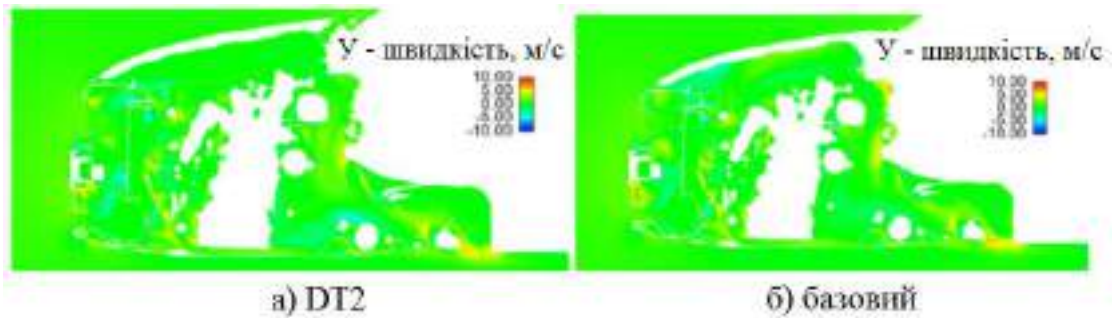


Рисунок 4.14 – Порівняння швидкості u у моторному відсіку, $y=0.1$

Більш очевидною зміною є z -швидкість, яка помітно зменшується перед двигуном. Це пов'язано з повітроводом залишкового вентилятора, який натомість стискає потік над моторним відсіком, що також видно на рис. 4.15.

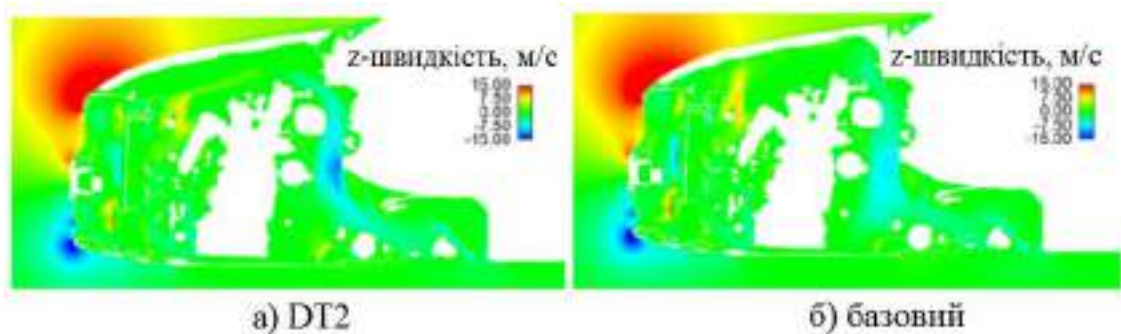


Рисунок 4.15 – Порівняння швидкості z у моторному відсіку, $y=0.1$.

На рис. 4.16 видно, як швидкість по осі z зменшується за величиною одразу за ободами. Це, звичайно, пов'язано з тим, що повітропровід рульової арки блокує його шлях і виштовхує повітря, щоб воно виходило більше в напрямку x . Це також є причиною зменшення CLA після додавання повітропроводу рульової арки.

Нарешті, ми порівняємо температуру в моторному відсіку, рис. 4.17. Це перевага комбінованого методу аеродинамічного та термодинамічного моделювання, оскільки ми також можемо побачити, як змінюється температура в моторному відсіку при зміні об'єму, в якому працює двигун.

Температура навколо двигуна не підвищилася до вищого рівня за допомогою цієї конструкції.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

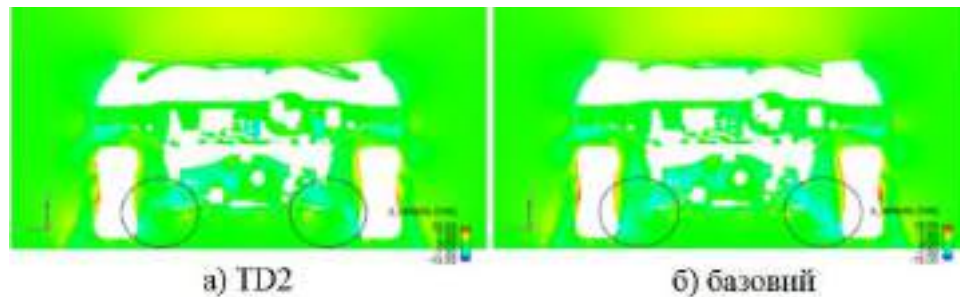


Рисунок 4.16 – Порівняння z-швидкості на виході з рульової рубки, $x=2.0$.

Повітропровід випускного вентилятора не підвищує температуру в моторному відсіку. Хоча можна помітити, що замість того, щоб тепле повітря піднімалося до стелі моторного відсіку, воно залишається теплим до моменту виходу з двигуна. Отже, моделювання показує, що в рамках цієї конструкції повітря з випускних отворів виходило б трохи тепліше, а повітря з меншою щільністю впливало б на зовнішню поверхню.

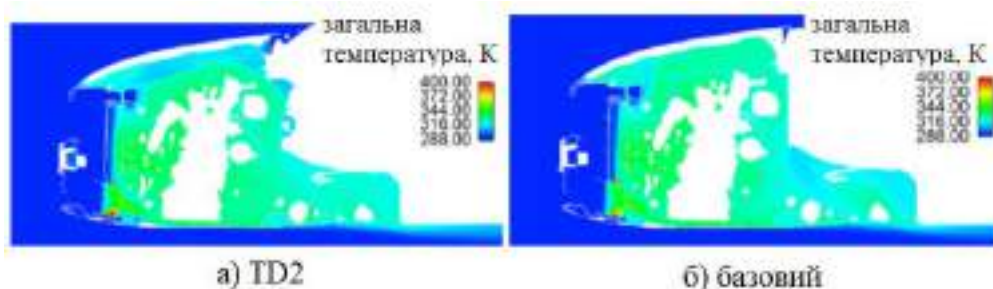


Рисунок 4.17 – Порівняння температури в моторному відсіку, $u=0.1$.

Підсумовуючи, TD2 ефективно контролює потік повітря до радіаторів і від них. Це запобігає втраті енергії повітря та його занадто високому підйому в моторному відсіку. Він також ефективніше спрямовує повітря до випускних отворів. Повітропровід у колісній арці краще вирівнює повітря, що виходить з колісної арки, з вільним потоком. Впускні канали також успішно стискають повітря, завдяки чому решітка радіатора може бути зменшена в розмірі, але при цьому масовий потік, що проходить через охолоджувальний пакет, залишається таким самим, як у базового автомобіля.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВКИ

1. Ефективне управління потоками охолоджувального повітря повинно закладатися ще на етапі проектування транспортного засобу, з урахуванням компоновання силового агрегату та днища.

2. Найбільш результативним рішенням є застосування керованих повітропроводів, які забезпечують цілеспрямований підвід повітря до охолоджувального блоку та зменшують енергетичні втрати.

3. Герметизація повітряного тракту між решітками та охолоджувальним блоком дозволяє підвищити ефективність охолодження і зменшити розміри впускних решіток.

4. Оптимізація геометрії моторного відсіку та організація відведення повітря (зокрема через бокові зони біля лобового скла або днище) сприяють зниженню турбулентності та аеродинамічного опору.

5. Узгодження напрямку вихідного потоку з основним потоком повітря зменшує розшарування, що позитивно впливає на загальний коефіцієнт аеродинамічного опору (C_dA).

6. Для гібридних автомобілів характерна підвищена потреба в охолодженні, тоді як для електромобілів (BEV) можливе зменшення площі впускних решіток і загального повітряного потоку.

7. Для електромобілів доцільно мінімізувати або оптимізувати вихідні отвори колісних арок, зменшувати габарити охолоджувального блоку та використовувати канали відведення повітря до задньої частини днища.

8. Загалом, комплексне використання повітропроводів і оптимізація потоків є ключовими чинниками підвищення ефективності охолодження та зниження аеродинамічного опору транспортного засобу.

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. Ivanic and P. Gillieron. Reduction of the aerodynamic drag due to cooling systems: An analytical and experimental approach. *SAE Technical Papers*, 2005.
2. John M.Cimbala Yunus A.Cengel. Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications. *McGraw Hill Education*, 2014.
3. Douglas L. Milliken William F.Milliken. *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International, 1995.
4. N. Simmonds, P. Tsoutsanis, D. Drikakis, A. Gaylard, and W. Jansen. Full vehicle aero-thermal cooling drag sensitivity analysis for various radiator pressure drops. *SAE Technical Papers*, 2016-April(April), 2016.
5. T. Kuthada and J. Wiedemann. Investigations in a cooling air ow system under the in uence of road simulation. *SAE Technical Papers*, 2008.
6. R. Palin, V. Johnston, S. Johnson, A. D'Hooge, B. Duncan, and J. I. Gargolo. The aerodynamic development of the tesla model s-part 1: Overview. *SAE Technical Papers*, 2012.
7. A. Alajbegovic, R. Sengupta, and W. Jansen. Cooling air ow simulation for passenger cars using detailed underhood geometry. *SAE Technical Papers*, 2006. Cited By :17.
8. RH Barnard. *Road Vehicle Aerodynamic Design*. MechAero, 2001
9. How Stu Works? How car cooling systems work, 2011-2012.
10. J. Williams. Aerodynamic drag of engine-cooling air ow with external interference. *SAE Technical Papers*, 2003.
11. N. Simmonds, P. Tsoutsanis, D. Drikakis, A. Gaylard, and W. Jansen. Full vehicle aero-thermal cooling drag sensitivity analysis for various radiator pressure drops. *SAE Technical Papers*, 2016-April(April), 2016.

					КВПАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

12. C. Zhang, M. Uddin, A. C. Robinson, and L. Foster. Full vehicle cfd investigations on the influence of front-end configuration on radiator performance and cooling drag. *Applied Thermal Engineering*, 130:1328-1340, 2018.

13. Y. Onishi, T. Ramsay, T. Juan, and J. McKillen. The thermal and aerodynamic development of a cooling and heat resistance package for a new hybrid sports car. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 8(1):155-164, 2015.

14. D. Baeder, T. Indinger, N. Adams, and P. Unterlechner. Aerodynamic investigation of vehicle cooling-drag. *SAE Technical Papers*, 2012

15. T. Kuthada, F. Wittmeier, B. Bock, C. Schoenleber, and A. Link. The effects of cooling air on the flow around a vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 9(2), 2016. Cited By :7.

16. Aroni.M. Release training fluent 2019 r1 solver speed robustness - presentation. 2019

					КВРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ДОДАТКИ

					КвРАТ. 23067.02.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68