

«Чекаємо зими»

«Дослідження аеродинамічних характеристик легкових автомобілів»

АНОТАЦІЯ

Науково-дослідна робота – с. 30, рисунків 30, джерел інформації 20.

Актуальність теми. Роботу присвячено важливій технічній задачі, яка актуальна як з теоретичної, так і з практичної точок зору, а саме пошуку конструктивного виконання додаткових кузовних деталей складних профілів (спойлерів) для зменшення аеродинамічного опору автомобілів.

В науковій літературі і інших джерелах зустрічається багато інформації, щодо використання таких виробів для економії палива, підвищення швидкості збільшення сил притискання тощо. В основі дослідження покладено використання скінченно-об'ємного розрахунку в сучасних САЕ – системах. Детально розглянуто утворення потоків повітря, що оточує легковий автомобіль в різних умовах. За рахунок цього виконано порівняння умов руху і обрано варіанти спойлерів, що найбільше забезпечують зниження коефіцієнту аеродинамічного опору. Дослідження має нові наукові результати і практичні результати у вигляді нових конструкцій спойлерів.

Мета і завдання дослідження. Пошук конструктивного виконання додаткових кузовних деталей складних профілів (спойлерів) для зменшення аеродинамічного опору автомобілів. Дослідження аеродинамічних характеристик легкових автомобілей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Створити 3-D моделі автомобілів із додатковими кузовними деталями складних профілів.
- Провести моделювання аеродинамічних процесів і визначити аеродинамічні характеристики легкових автомобілів.
- Визначити серед запропонованих варіантів спойлерів найкращий для забезпечення оптимальних аеродинамічних характеристик автомобіля.
- Провести теоретичні дослідження аеродинаміки автомобіля із системою диференційованого регулювання дифузоров антикрила.

Об'єкт дослідження – аеродинаміка легкових автомобілів

Предмет дослідження – сучасні cfd розрахунки аеродинамічних характеристик.

Методи дослідження. Створення 3-D моделей різноманітних конфігурацій автомобілів та використання скінчено-об'ємного розрахунку в сучасних CAE – системах.

Проведено аналіз предмету і методів дослідження аеродинаміки. Обрано методику теоретичних досліджень аеродинамічних характеристик автомобілів. Обчислено лобовий опір і притискні зусилля автомобіля BMW E46 з різними варіантами спойлерів, та обрано найкращий із запропонованих. Розглянуто системи активної аеродинаміки автомобілів та запропоновано систему диференційованого регулювання дифузорів. Розраховано аеродинамічні характеристики автомобіля з такою системою.

Значущість отриманих результатів полягає в подальшому розвитку методики розрахунків аеродинаміки автомобілів, порівняльному аналізу аеродинамічних характеристик різних автомобілей, а також автомобіля з різними додатковими елементами.

При цьому розраховано аеродинаміку автомобіля BMW E46 з різними типами спойлерів.

Запропоновано використання систем активної аеродинаміки з диференційовано регульованими дифузорами.

Практична цінність отриманих результатів наукової роботи полягає в розробленні методики розрахунків аеродинаміки легкових автомобілів з додатковими кузовними елементами.

Рекомендації розрахунків аеродинаміки автомобіля BMW E46 було використано командою з драг-рейсингу “Avto-Makss”.

Публікації. За матеріалами дипломної роботи підготовлено наукову статтю [19] та тези доповідей на та міжнародній науково-практичній конференції [20].

Зміст

Вступ.....	4
1 Аналіз досліджень аеродинаміки.....	5
1.1 Натурні дослідження аеродинаміки.....	5
1.2 Аеродинаміка автомобіля.....	6
1.2.1 Завдання аеродинаміки автомобіля.....	6
1.2.2 Лобовий опір.....	8
1.2.3 Притискна або підйомна сила.....	9
1.2.4 Повітрязбірник.....	10
1.2.5 Сучасні досягнення у галузі аеродинаміки автомобіля.....	11
1.2.6 Способи вивчення аеродинаміки автомобіля.....	12
2. Дослідження аеродинаміки автомобіля BMW-E46 зі спойлерами	12
2.1. Створення 3D-моделі автомобіля для розрахунків.....	13
2.1.1 Створення 3D-моделі автомобіля.....	14
2.1.2 Вибір деталізації 3D-моделі автомобіля.....	16
2.2 Види досліджувальних спойлерів.....	17
2.3 Розрахунки з різними видами спойлеїв.....	19
3. Системи активної аеродинаміки.....	24
3.1 Сучасні системи активної аеродинаміки.....	24
3.2 Недоліки існуючих систем.....	26
3.3 Системи аеродинаміки з використанням регульованих дифузоїв.....	27
3.4 Результати розрахунку аеродинаміки автомобіля з використанням пропонованого регульованого антикрила.....	28
Висновки.....	30
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	31

ВСТУП

В умовах розвитку автомобільного транспорту також активно розвиваються методи дослідження аеродинаміки автомобіля. Цей розділ механіки став цікавити людей відколи автомобілі досягли значної потужності, і аеродинамічні характеристики почали відігравати більш значну роль. Аеродинамічні дослідження важливі тому, що від аеродинамічних характеристик автомобіля залежать економічність, максимальна швидкість, а також стійкість автомобіля, тобто його спроможність триматись рівно на дорозі. Тому важливо знати усі аеродинамічні властивості автомобіля для створення такого кузову, обвісу або аеродинамічної системи, яка буде відповідати усім потребам які висуваються до автомобіля.

У даній роботі розглянуті питання, як аеродинаміки автомобіля так і проблеми як стосуються аеродинаміки та аеродинамічних систем які пов'язані з автомобільним транспортом.

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОДИНАМІКИ

Аеродинаміка — розділ механіки суцільних середовищ, в якому метою досліджень є вивчення закономірностей руху повітряних потоків та їх взаємодії з перешкодами та рухомими тілами. Більш загальним розділом механіки є газова динаміка, в якій вивчаються потоки різних газів. Традиційно до газової динаміки відносять по суті задачі аеродинаміки при русі тіл з швидкостями, що близькі або перевищують швидкість звуку в повітрі. При цьому важливо враховувати стисливість повітря.

1.1 Натурні дослідження аеродинаміки

Найпоширенішим експериментальним засобом для моделювання процесів взаємодії обтічного тіла з потоком газу є аеродинамічна труба. Геометрично подібну модель тіла встановлюють на спец. ваги, що дає змогу виміряти аеродинамічні сили, і обдувають швидкісним потоком повітря, а в надзвук. трубах – надзвук. потоком газу. В аеродинамічних трубах можна досліджувати моделі різноманітних споруд (будинків, мостів, автомобілів тощо) щодо вітрових навантажень і навантажень від вибухових хвиль. Аеродинамічні труби й стенди для експериментального відпрацювання моделей можуть бути різноманітної конструкції. Найпростіші серед них – так звані вентиляторні труби. У них визначають аеродинамічні характеристики тіл у потоках газу, які рухаються зі швидкістю, значно меншою від швидкості звуку.

Крім того, у разі складної динаміки досліджуваного об'єкта різні засоби опрацювання інформації дадуть неоднакові результати, що потребує створення спеціальних методів їх верифікації. Аеродинамічні характеристики розраховують за допомогою диференціальних рівнянь газової динаміки в частинних похідних.

1.2. Аеродинаміка автомобіля

Аеродинаміка автомобіля - це якісний показник, що характеризує ступінь опору рухомого автомобіля зустрічному повітряному потоку. Аеродинамічні властивості машини визначають максимальну швидкість її руху, витрата палива, рівень шуму в салоні і рівень діючої на неї притисної сили.

1.2.1 Завдання аеродинаміки автомобіля

Відомо, що чим гнучкіший профіль кузова автомобіля, тим менший опір руху і витрата палива. Такий автомобіль не тільки буде економічним, але й більш екологічним. Фахівці з аеродинаміки, доводячи кузов нової моделі, ще й:

- розраховують розподіл по осях підйомної сили, що дуже важливо з урахуванням чималих швидкостей сучасних автомобілів;
- забезпечують доступ повітря для охолодження двигуна і гальмівних механізмів;
- продумують місця забору і виходу повітря для системи вентиляції салону;
- прагнуть знизити рівень шумів у салоні;
- оптимізують форму деталей кузова для зменшення забруднення стекол, дзеркал і світлотехніки.

При цьому рішення однієї задачі часто суперечить виконання іншої. Наприклад, зниження коефіцієнта лобового опору покращує обтічність, але одночасно погіршує стійкість автомобіля до поривів бічного вітру. Тому фахівці повинні шукати розумний компроміс[2-4].

Описувати дію повітря на автомобіль прийнято трьома складовими, які направлені поздовжньою віссю машини (X), перпендикулярно до неї по горизонталі (Y) та вертикалі (Z) (рис 1). За руху особливо важливі опір

повітря та піднімальна чи притискна сили. Помітна дія бічної складової може з'явитися тільки у випадку дуже несиметричного кузова, що є рідкістю, або за бокового вітру - а це доволі складно передбачити.

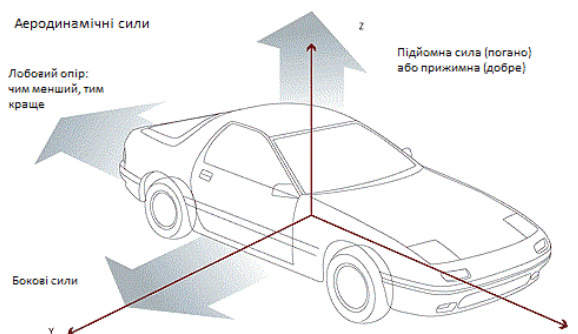


Рисунок 1.1 - Аеродинамічні сили, які діють на автомобіль

1.2.2 Лобовий опір

Головна проблема, яку вирішують за відпрацювання аеродинаміки, - зниження лобового аеродинамічного опору. Зі зростанням швидкості збільшується й опір повітря. Те саме відбувається і з автомобілем, причому значно відчутніше через великі розміри та швидкість. Опір повітря розраховується за формулою:

$$F = \frac{c_x \rho S V^2}{2} \quad (1.1)$$

де S - площа проекції автомобіля на вертикальну площину,

ρ - густина повітря,

V - швидкість.

Вона у цій формулі у квадраті - тобто коли машина розганяється з 60 до 120 км/год аеродинамічний опір зростає у чотири рази. Потужність

необхідна для подолання аеродинамічного опору пропорційна кубу швидкості, оскільки потужність є добуток сили на швидкість:

$$N = \frac{c_x \rho S V^3}{2} \quad (1.2)$$

Audi A8 (рис. 1.2) за руху на максимальній швидкості в 250 км/год тільки на подолання опору повітря потрібно 140 кВт (191 к.с.), а на 300 км/год ця машина витрачала би тільки на це 243 кВт (331 к.с.)



Рисунок 1.2 – Аеродинаміка Audi A8

Коефіцієнт C_x (англійською його позначають C_d , а німецькою - C_w) визначається експериментально, і він і є головною величиною, котра описує аеродинамічну довершеність кузова. Колись його умовно прирівнювали до 1,0 для круглої пластини, однак, як виявилось на практиці, через турбулентність за пластиною насправді її C_x рівний приблизно 1,2. Найнижчий C_x у краплини - приблизно 0,05. у більшості сучасних серійних автомобілів цей коефіцієнт зазвичай дорівнює 0,30-0,35, найдосконаліші досягають значень 0,26-0,27. Хоча насправді він залежить від швидкості, напрямку руху відносно повітря чи від стану поверхні кузова, і наведені значення - можна сказати, ідеал, якого може досягнути ця модель.

1.2.3 Притискна або підйомна сила

При русі автомобіля потік повітря під його дном йде по прямій, а верхня частина потоку огинає кузов, тобто, проходить більший шлях. Тому швидкість верхнього потоку вище, ніж нижнього. А згідно із законами фізики, чим вище швидкість повітря, тим нижче тиск. Отже, під днищем створюється область підвищеного тиску, а зверху – зниженого [5]. Таким чином створюється підйомна сила. І хоча її величина невелика, неприємність полягає в тому, що вона нерівномірно розподіляється по осях. Якщо передню вісь підвантажує потік, що давить на капот і лобове скло, то задню додатково розвантажує зона розрядження, що утворюється за автомобілем. Тому із зростанням швидкості знижується стійкість і автомобіль стає схильний до заносу. Будь-яких спеціальних заходів для боротьби з цим явищем конструкторам звичайних серійних автомобілів вигадувати не доводиться, оскільки те, що робиться для поліпшення обтічності, одночасно збільшує притискну силу. Наприклад, оптимізація задньої частини зменшує зону розрядження за автомобілем, а значить і знижує підйомну силу.

Вирівнювання днища не тільки зменшує опір руху повітря, але і підвищує швидкість потоку і, отже, знижує тиск під автомобілем. А це, в свою чергу, призводить до зменшення підйомної сили. Точно так само два завдання виконує і задній спойлер. Він не тільки зменшує вихорозароджуваність, покращуючи C_x , але й водночас притискає автомобіль до дороги за рахунок відштовхуючого від нього потоку повітря. Іноді задній спойлер призначають виключно для збільшення притискної сили. У цьому випадку він має великі розміри і нахил або робиться висувним, вступаючи в роботу тільки на високих швидкостях. Антикрило ж встановлюється на деякій відстані від кузова. Вперше антикрило застосував 22-річний швейцарський інженер Майкл Мей (Michael May) на своєму «Porsche 550 Spyder» для участі у гонці «Нюрбургринг 1000 кілометрів» 27 травня 1956 року. Він ще був студентом, коли його двоюрідний брат П'єр купив йому гоночний автомобіль і він побачив перспективу у використанні

перевернутого крила для створення притискного зусилля, що підвищувало зчеплення авто з дорогою у поворотах. Створена антикрилом додаткова притискна сила збільшує граничну силу тертя між ведучими колесами і покриттям і, як наслідок, дозволяє автомобілю розвивати більше прискорення без зриву в занос. Антикрило виконує свої функції лише коли воно має певну форму та кута розташування. Антикрило у своєму поперечному перерізі, має форму перевернутого крила (про це свідчить і назва). Воно зазвичай розташовується під кутом $10...15^\circ$ до поздовжньої осі автомобіля

1.2.4 Повітрозбірник

Як було сказано, однією із задач аеродинаміки є забезпечення доступу повітря для охолодження двигуна і гальмівних механізмів. повітрозбірник - елемент конструкції машини, який служить для забору навколишнього повітря і спрямованої подачі до різних внутрішніх систем, агрегатів і вузлів для різного застосування: в якості теплоносія, окислювача для палива, створення запасу стисненого повітря та ін. Забір повітря здійснюється за рахунок тиску, створюваного потоком набігаючого повітря, або розрідження, створюваного, наприклад, при ході поршня в циліндрі.

1.2.5 Сучасні досягнення в галузі аеродинаміки автомобіля

Urbee - найаеродинамічніший багатомісний автомобіль на планеті по версії його розробників (рис. 1.3). Він здатний просочуватися крізь повітря завдяки своїй ромбічній формі, яка досягається тривимірної печаткою панелей корпусу



Рисунок 1.3 - Urbee

Коефіцієнт опору машини - 0,149 (що менше значень Toyota Prius і Tesla Model S, що володіють відповідно 0,25 і 0,24 коефіцієнтами).

Така форма разом з маленьким електричним двигуном потужністю всього 7 кінських сил дозволяє Urbee розвивати швидкість до 110 кілометрів на годину. Творці автомобіля хочуть встановити світовий рекорд, проїхавши на ньому через всі Штати від Нью-Йорка до Сан-Франциско (а це близько 4700 кілометрів) на 45 літрах біопалива. Всі колишні спроби створення настільки ультраефективного транспортного засобу провалилися.

1.2.6 Способи вивчення аеродинаміки автомобіля

Аеродинаміка автомобілів вивчається двома основними методами - випробуваннями в аеродинамічній трубі і комп'ютерним моделюванням. Аеродинамічні труби для випробування автомобілів іноді оснащуються рухомою доріжкою, що імітує рухоме дорожнє полотно. Крім того, колеса випробовуваного автомобіля приводяться в обертання. Ці заходи вживаються для того, щоб врахувати вплив дорожнього полотна і обертових коліс на потоки повітря.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ АВТОМОБІЛЯ BMW-E46 ЗІ СПОЙЛЕРАМИ

Аеродинаміка автомобіля є одним з найважливіших факторів, які впливають на широкий спектр показників роботи сучасного транспорту. Від аеродинамічних показників залежить максимальна швидкість, яку зможе розвивати автомобіль, а також його економічність. У випадку, якщо мова йде про спортивні змагання, треба враховувати ще й можливе появлення підйомної сили, величину якої достатньо складно контролювати. В роботі проводиться аналіз можливості застосування спойлерів різних типів з точки зору покращення аеродинаміки автомобіля.

Найефективніший метод зменшення лобового опору без зміни геометричних параметрів кузову є установка спойлера на задню частину автомобіля [2]. Це дозволяє зменшити аеродинамічний опір, що дозволить автомобілю розвинути більшу швидкість та знизити витрату палива завдяки тому, що двигун буде витрачати менше потужності на подолання повітряного опору. Суть застосування спойлерів в тому, що коли вказаний елемент встановлюється на автомобіль, то відсувається точка зриву потоку, завдяки чому зменшується зона низького тиску. Існує багато варіантів виконання спойлерів. Метою роботи в даному розділі є поліпшення аеродинамічних характеристик автомобіля BMW E 46 за рахунок використання спойлерів складного профілю, зменшення його лобового опору, а також пошук найкращого рішення для виконання завдання. Подальший етап являє собою проведення досліджень аеродинаміки з розрахуванням аеродинамічного опору автомобіля, визначення найбільш вдалої конструкції спойлера з найбільш високою ефективністю. Дана робота виконана у співпраці з командою з драг-рейсингу “Avto-Makss” на прикладі автомобіля BMW E46 (рис 2.1).



Рисунок 2.1 - Фото автомобіля для якого проводились розрахунки

2.1 Створення 3D-моделі автомобіля для аеродинамічних розрахунків

Креслення автомобіля представлені на рис. 2.2.

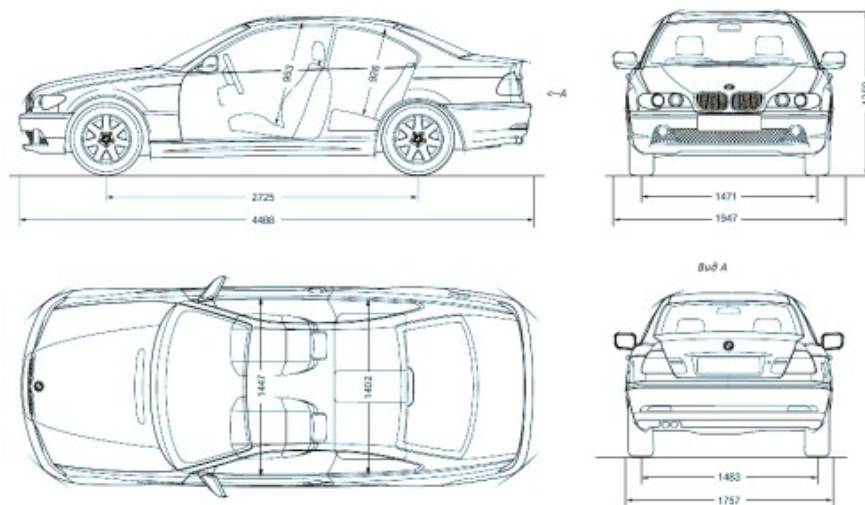


Рисунок 2.2 - Креслення BMW-E46

2.1.1 Створення моделі автомобіля

Спочатку створюється контур майбутньої моделі автомобіля(рис 2.3).

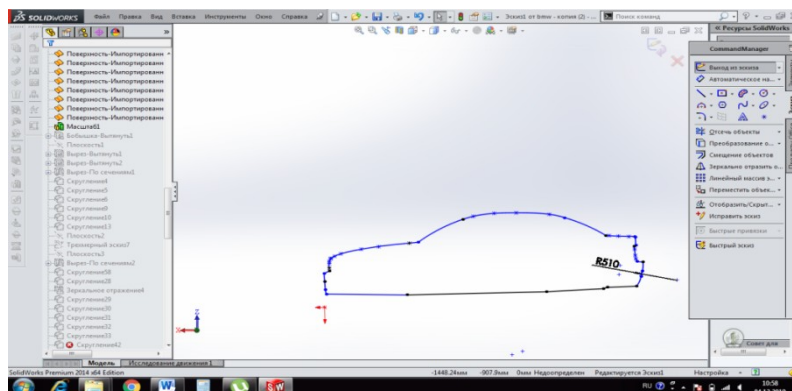


Рисунок 2.3 - Контур майбутньої моделі

Екструзія сформованого в ескізі перерізу на половину ширини автомобіля:

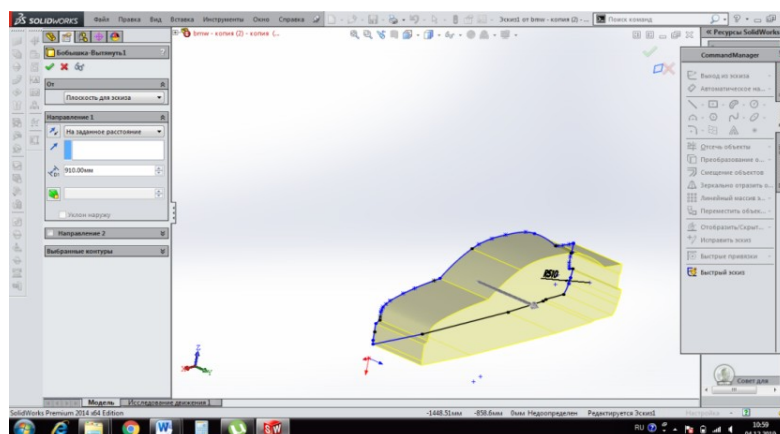


Рисунок 2.4 - Створення твердотільної моделі методом витягнутої бобишки

На задній поверхні формується ескіз для наступного формування бокових поверхонь:

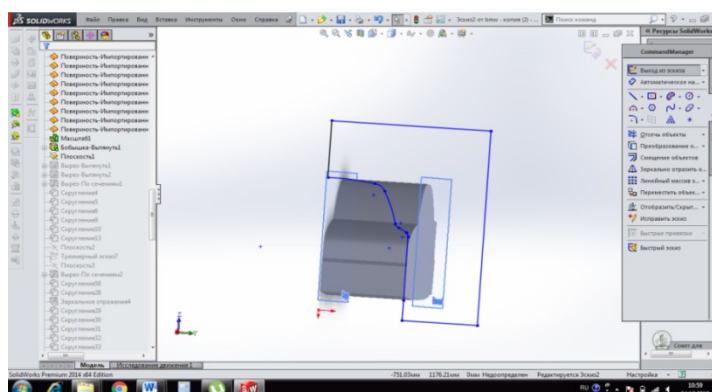


Рисунок 2.5 - Створення ескізу бокового контуру

Видалення видавлюванням вказаного ескізу крізь усю сформовану твердо тільну модель:

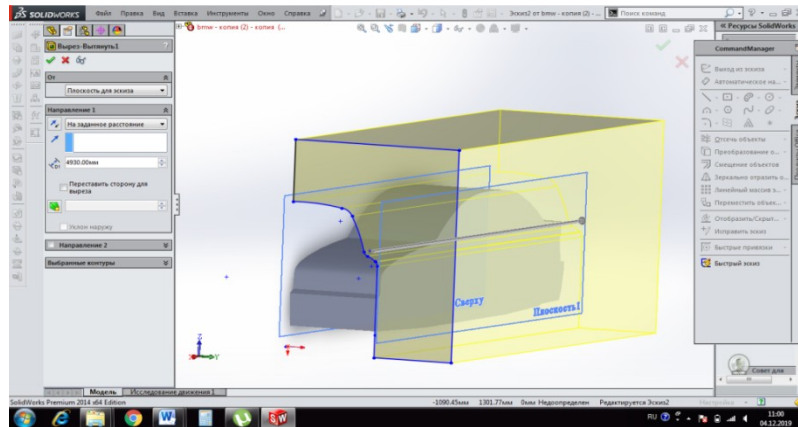


Рисунок 2.6 - Відсікання зайвих бічних сторін
Формування ескізу для завдання коліс автомобілю:

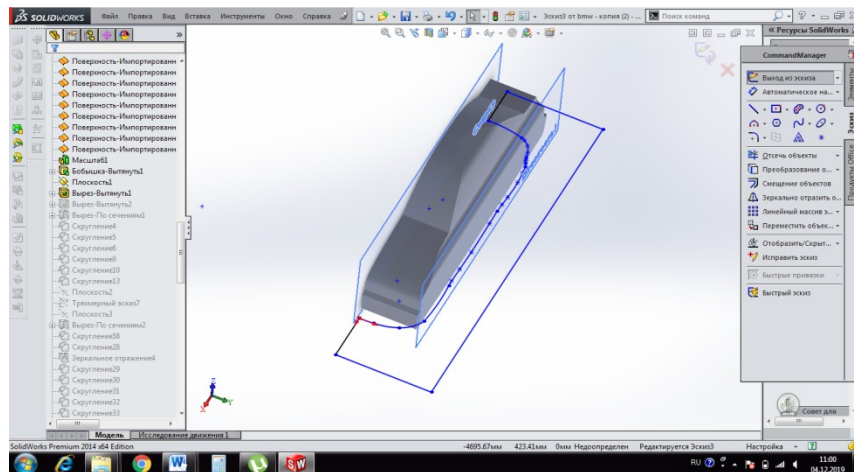


Рисунок 2.7 - Створення ескізного контуру знизу

Видавлювання цього ескізу на величину, що дорівнює ширині колеса:

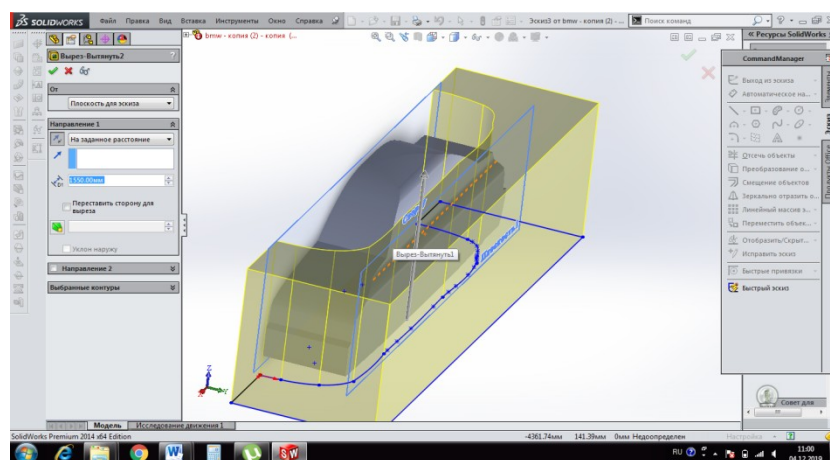


Рисунок 2.8 - Відсікання зайвих сторін знизу
Заокруглення вказаних нижче кромки:

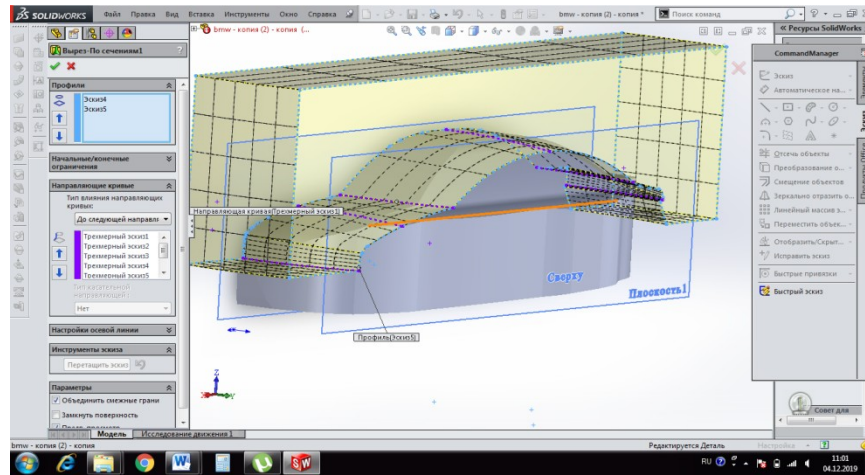


Рисунок 2.9 - Згладжування моделі методом вирізання за ескізами

2.1.2 Вибір деталізації 3D-моделі автомобіля

Було створено декілька варіантів 3D-моделі автомобіля (рис. 2.10 а,б).

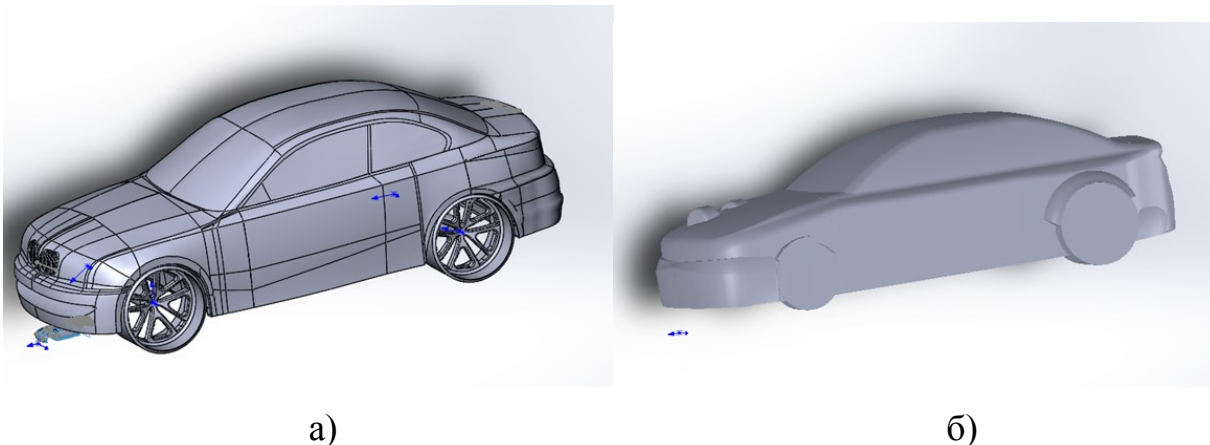


Рисунок 2.10 Базові 3D-моделі автомобіля BMW E46 для початкових розрахунків.

а) – більш детальна 3D-модель без урахування модифікацій; б) – менш детальна 3D-модель з урахуванням модифікацій.

Перша модель більш детально відтворює автомобіль ніж друга. В моделі для аеродинамічного розрахунку було видалено дрібномасштабні елементи, які б значно ускладнили створення сітки скінченних елементів.

2.2 Види досліджуваних спойлерів

У роботі були розглянуті спойлери трьох видів:

- fin spoiler (перший варіант виконання) представлено у вигляді напівкруглого обода, який встановлюється на задню частину автомобіля, як правило на багажник;
- wing spoiler (другий варіант виконання) має витягнуту форму є продовженням перетину задньої частини автомобіля. Найпопулярніший спойлер в змаганнях класу «Драг-гонки». Має просту конструкцію і порівняно простий у виготовленні;
- duck tail spoiler (третій варіант виконання) має таку ж форму поперечного перерізу, але має пряму форму, встановлюється на задню частину автомобіля, як правило на багажник.

Геометрія спойлерів представлена на рис. 2.11

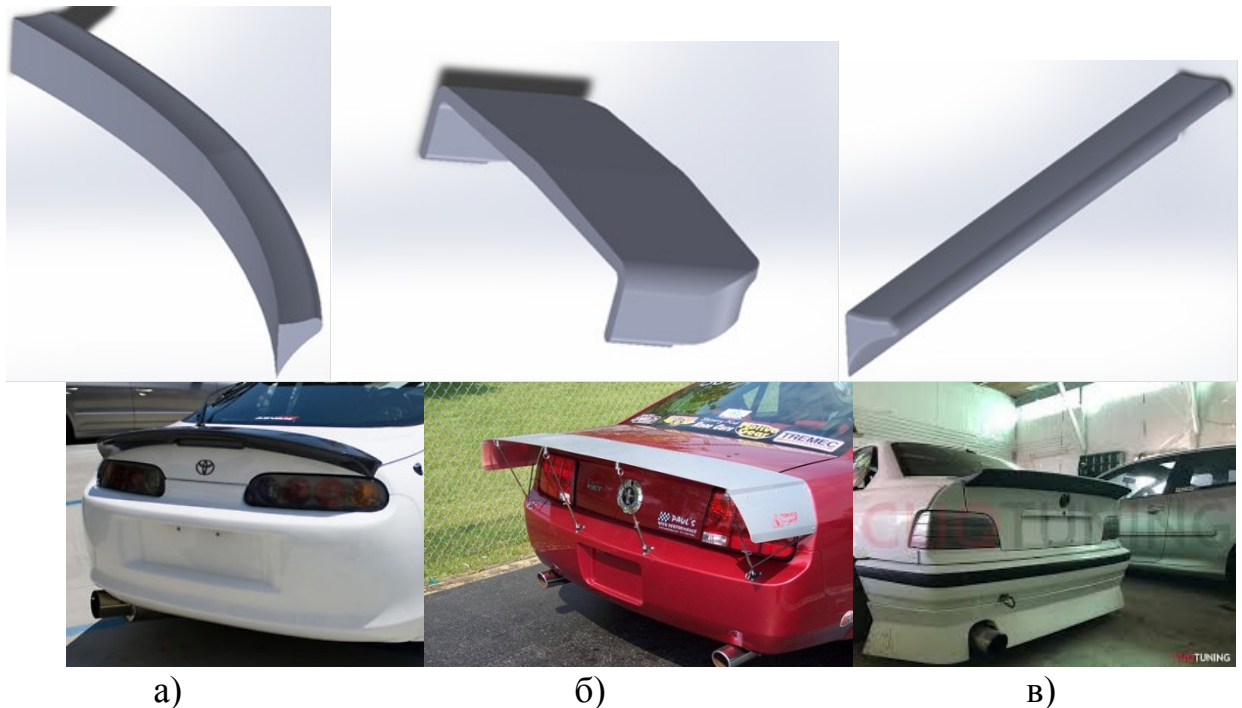


Рисунок 2.11 варіанти спойлерів, які представлені в роботі.

- а) – fin spoiler (перший варіант виконання) б) – wing spoiler (другий варіант виконання) в) – duck tail spoiler (третій варіант виконання)

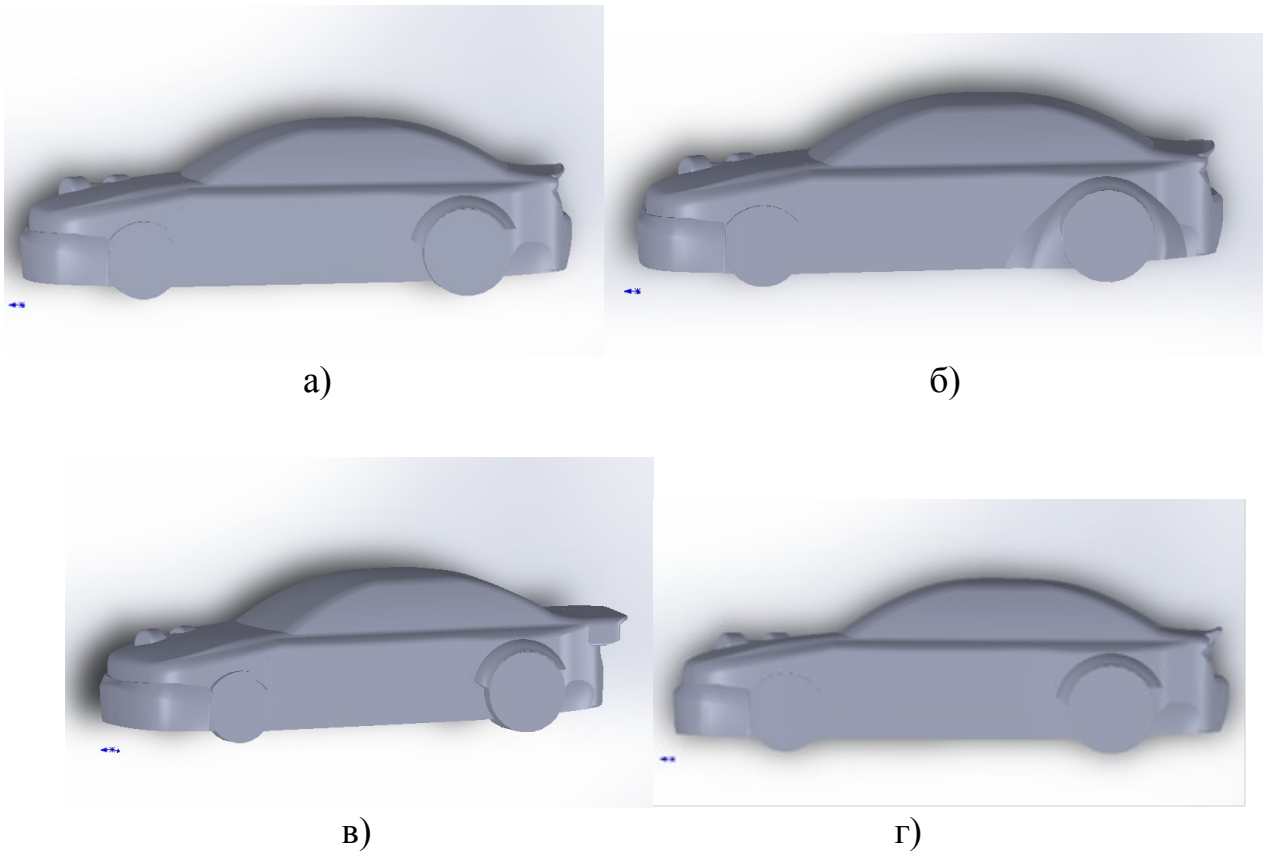


Рисунок 2.12 3D-моделі автомобіля BMW E46 з урахуванням спойлерів
 а) – варіант зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання); б) -
 варіант зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання) та закритими
 фендерами; в) – варіант зі спойлером типу wing spoiler (другий варіант
 виконання); г) - варіант зі спойлером типу duck tail (третій варіант виконання).

2.3 Розрахунки аеродинаміки автомобіля з різними спойлерами

Було проведено дослідження аеродинамічних характеристик цих варіантів для визначення найкращого з точки зору мінімальності сили аеродинамічного опору та підйомної сили. Для розрахунку кожна 3D-модель була представлена в скінченно об'ємному вигляді (рис. 4). У даному випадку було використано неструктуровану сітку скінченних елементів, що може адаптуватися до геометрії будь-якої складності.

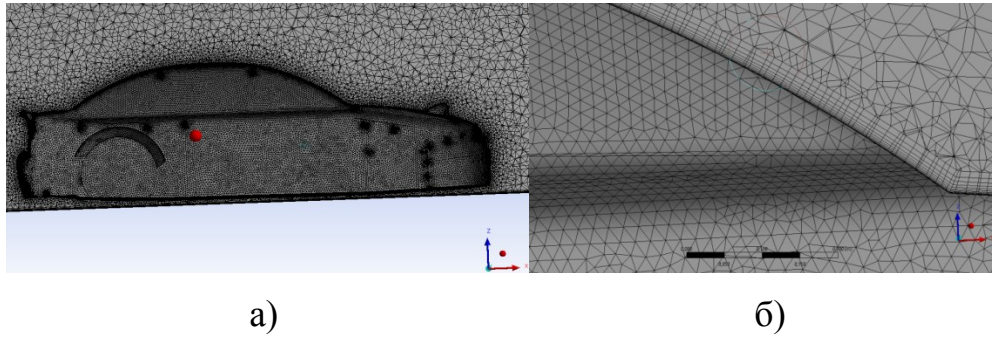


Рисунок 2.13 Сітка скінченних елементів 3D-моделі автомобіля BMW E46

а) – вид на сітку тетраедричних скінченних елементів автомобіля б) – вид на призматичні ячійки скінченних елементів

Для моделювання пограничного шару до тетраедричної сітки були додані призматичні ячійки, які охоплюють увесь автомобіль (рис. 2.13, б).

У даному розрахунку використовується k - ε модель турбулентності [3]. Стосовно до стаціонарного процесу рівняння складаються як завжди з рівнянь нерозривності та руху (1, 2) (проводиться підсумовування за повторюваними індексами):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} p^* + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_s \tau_{ij}) + f_i, \quad (2.2)$$

де

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad \tau_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad v_s = \nu + \nu_t$$

k – питома кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2/\text{с}^2$,

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$,

ν_t – турбулентна в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$,

p – осереднений тиск, Па,

u_i – осереднені компоненти вектора швидкості в декартовій системі координат, $\text{м}/\text{с}$,

f_i – вектор масових сил, $\text{м}/\text{с}^2$. У відповідності з k - ε моделлю параметри турбулентності підраховуються з рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(k u_j - \nu_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = H_k \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon u_j - \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = H_\varepsilon \quad (2.4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

де ε – швидкість дисипації турбулентної енергії, $\text{м}^2/\text{с}^3$,

$$H_k = G - \varepsilon, H_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, G = \nu_t \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \eta \frac{1 - \eta/\eta_0}{1 + \beta \eta^3}, \quad (2.6)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{G}{C_\mu \varepsilon}},$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}, \nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Емпіричні константи в наведених рівняннях дорівнюють:

$$C_\mu = 0,0845, C_{\varepsilon 1} = 1,42, C_{\varepsilon 2} = 1,68, \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,72, \eta_0 = 4,38, \beta = 0,015.$$

Відомо, що подібна модель дає прийнятні результати для областей з розвиненою турбулентністю, тобто при $\nu_t \gg \nu$. Звичайно, що це не виконується біля твердої стінки. У зв'язку з цим для визначення параметрів турбулентності біля стінки додатково задаються емпірично отримані закони поведінки рідини, що задаються додатково у вигляді пристінних функцій.

Результати розрахунків аеродинаміки для різних моделей спойлерів представлено далі.

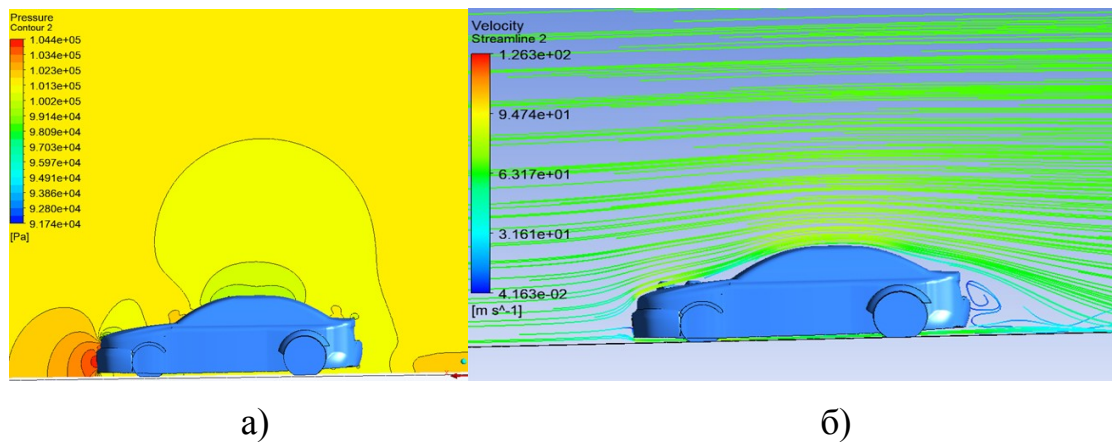


Рис. 2.14 Результати розрахунків базового варіанту автомобіля
а) – показник оточуючого тиску б) – показник швидкості потоків.

На рис. 2.14 представлений приклад розрахунку автомобіля базової версії. Розрахований аеродинамічний опір складає 1858 Н. Всі розрахунки проводилися при швидкості 240 км/год (така швидкість є вихідною швидкістю автомобіля на дистанції 400 м). У перерахунку на постійний коефіцієнт лобового опору він становить

$$C_x = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A \cdot V^2} = \frac{2 \cdot 1858,86}{2,21 \cdot 1,225 \cdot 66^2} = 0,315.$$

F – сила опору, Н

ρ – щільність повітря

A – площа поперечного перерізу

V – швидкість автомобіля

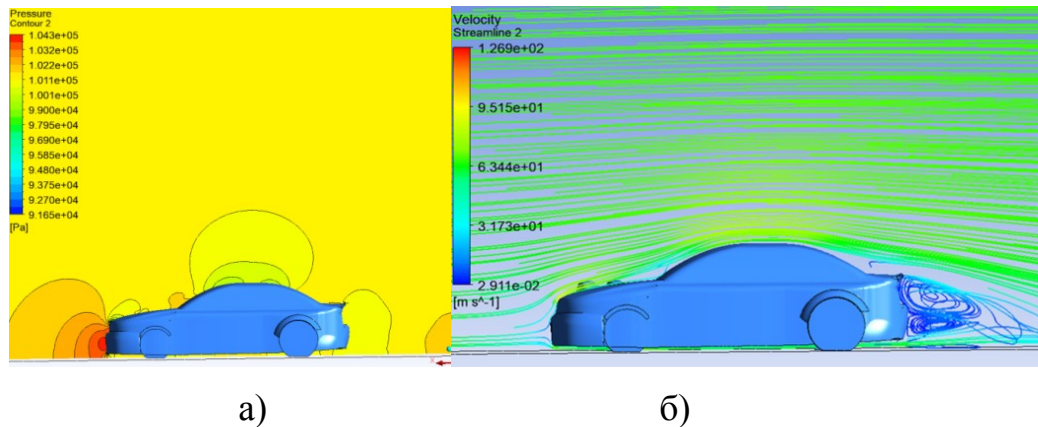
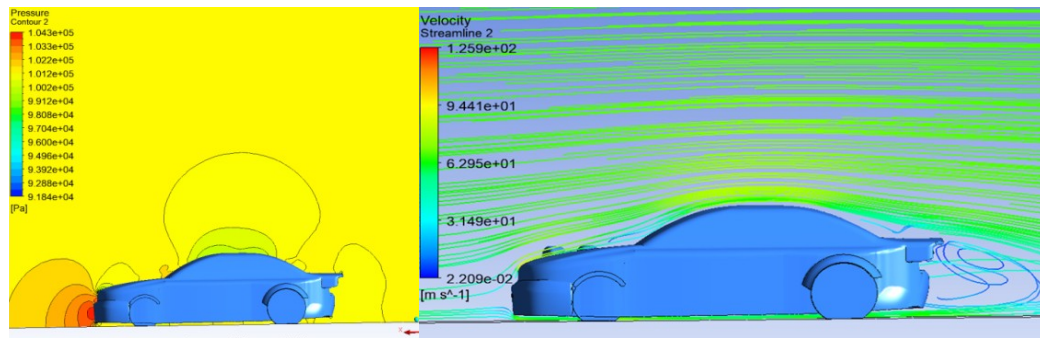


Рисунок 2.15 Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання);

а) – показник оточуючого тиску б) – показник швидкості потоків.

Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання) вказано на рис. 2.15 При застосуванні такого спойлера аеродинаміка автомобіля покращується. Лобовий опір зменшився до 1606,79 Н у порівнянні із 1856 Н на базовій моделі. Розрахунки проводилися на швидкості 240 км/год. У перерахуванні коефіцієнт опору складає 0,272.



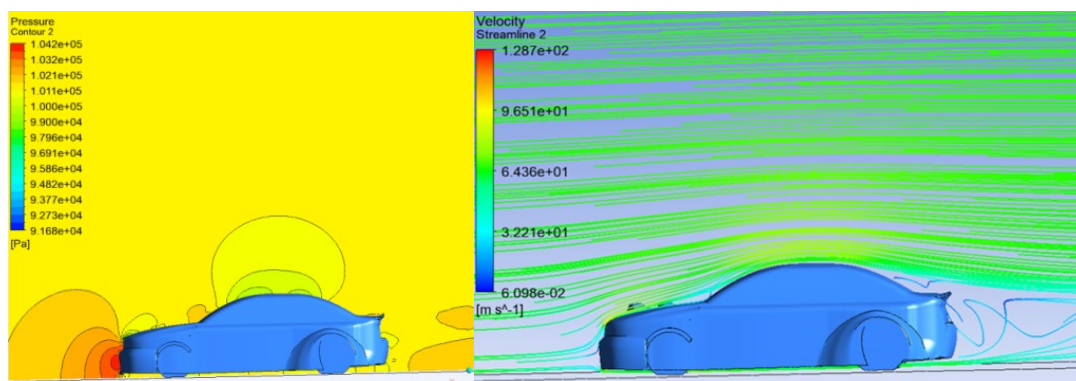
а)

б)

Рис. 2.16 Результати розрахунків моделі зі спойлером типу wing spoiler(другий варіант виконання);

а) – показник оточуючого тиску б) – показник швидкості потоків.

Аеродинамічний опір зі спойлером типу wing spoiler(другий варіант виконання) (рис. 2.16) не сильно відрізняється у порівнянні з попереднім і коефіцієнт опору практично такий же. Аеродинамічний опір складає 1612,7 Н. Таким чином коефіцієнт складе 0,273 Перевагою даного спойлера є простота виготовлення, а недоліком велика матеріаломісткість. Як наслідок такої спойлер буде важчим. До того ж такий спойлер створює більшу притискуну силу.



а)

б)

Рис. 2.17 Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання) і закритими фендерами

а) – показник оточуючого тиску б) – показник швидкості потоків

Для сполеру за типом fin spoiler(перший варіант виконання) закриття фендерів (рис. 2.17) дало лише погіршення аеродинамічних показників. Коефіцієнт в даному випадку буде становити

$$C_x = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A \cdot V^2} = \frac{2 \cdot 1703,93}{2,21 \cdot 1,225 \cdot 66^2} = 0,288$$

Закриті фендера утворюють у нижній частині автомобіля зону більш низького тиску та завдяки цьому створює більшу притискову силу у порівнянні з автомобілем з таким же спойлером. Але на фоні значного погіршення аеродинаміки їх використання сумнівне.

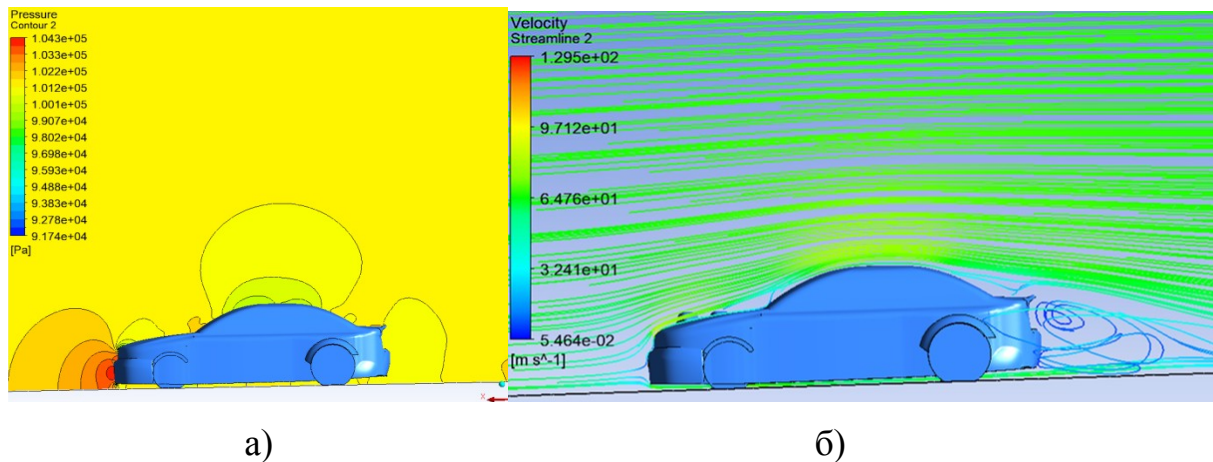


Рис. 2.18 Результати розрахунків моделі зі спойлером типу duck tail(третій варіант виконання)

а) – показник оточуючого тиску б) – показник швидкості потоків

Аеродинамічні показники автомобіля зі спойлером типу duck tail(третій варіант виконання) (рис. 2.18) кращі, ніж зі спойлером версії 1. Так аеродинамічний опір складає 1606,33 Н. Відповідний коефіцієнт аеродинамічного опору складає 0,272.

3. СИСТЕМИ АКТИВНОЇ АЕРОДИНАМІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЬОВАНИХ ДИФУЗОРІВ

Гоночні автомобілі - автомобілі, сконструйовані і побудовані спеціально для автомобільних змагань - як для масових гонок, так і для встановлення рекордів швидкості. На відміну від серійних шосейних спортивних автомобілів, гоночні мають максимально полегшений кузов, в якому відсутні багато важливих вузли управління і безпеки. Гоночні автомобілі, на відміну від звичайних серійних легкових автомобілів, створені не для перевезення пасажирів, а для змагань, для з'ясування технічних можливостей автомобіля і його водіння.

Участь в гонках вимагає від таких автомобілів високих швидкісних і аеродинамічних характеристик. Гоночні автомобілі мають більшу потужність двигуна, невелика вага; відповідно, вони можуть швидко прискорюватися і досягати високих швидкостей, а також стійко проходити віражі (якщо це автомобілі, які беруть участь в кільцевих гонках).

3.1 Сучасні системи активної аеродинаміки

Більшість систем активної аеродинаміки створена для регулювання співвідношення аеродинаміка / притискне зусилля. Одним з головних інструментів такого регулювання є DRS (drag reduction system). Що в дослівному перекладі означає "система регулювання опору". Українською ця система називається: РЗА (регульоване заднє антикрило). Розглянемо як працює дана система.



Рисунок 3.1 - Закрите регульоване заднє антикрило

Як видно з даного рисунку є рухоме антикрило і не рухоме. Коли ці дві частини складені разом, то вони працюють як одне велике антикрило і створюють значне притискне зусилля, але через це значно збільшується аеродинамічний опір. Так як високі притискні зусилля потрібні не завжди, наприклад: при розгоні автомобіля після виходу з повороту, коли власної ваги автомобіля досить для утримання автомобіля на дорозі цей параметр потрібно регулювати і підбирати адекватне співвідношення аеродинаміка / притискне зусилля. Це можна робити за допомогою РЗА. Розглянемо як працює дана система на прикладі одного з гоночних болідів Формули-1

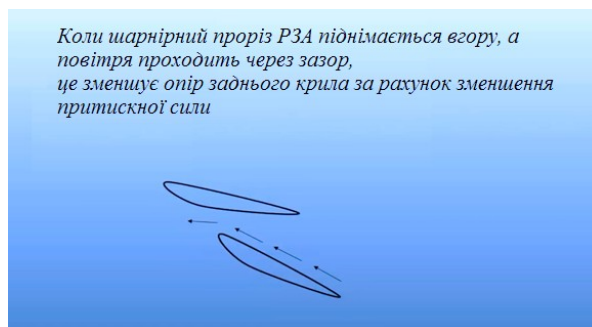


Рисунок 3.2 - Відкрите регульоване заднє антикрило

Нерухоме антикрило продовжує створювати притискне зусилля а рухоме знаходиться в нейтральному положенні так, що воно не створює притискного зусилля так як повітря проходить через нього паралельно дорозі. Таким чином зменшується притискне зусилля, але і зменшується сила аеродинамічного опору, отже незначно, тимчасово зменшується опір руху. Розглянемо принцип роботи механізму РЗА(рис. 4.3).

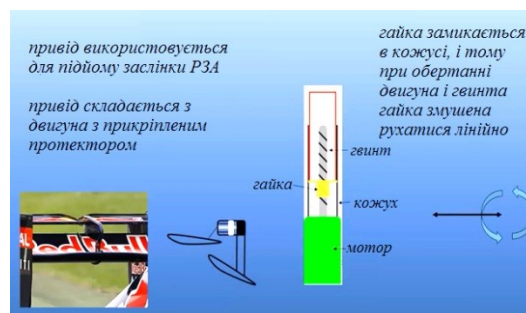
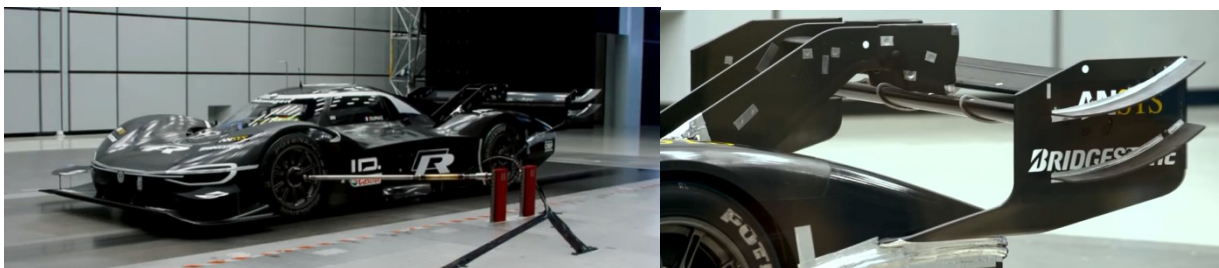


Рисунок 3.3 - Принцип роботи механізму РЗА.

Механізм досить простий. Він складається з електроприводу з гвинтової передачі і повзунок, який переміщається в виїмці. Сам повзунок пов'язаний зі штоком, який вже пов'язаний безпосередньо з рухомим дифузором. Коли мотор приводиться в дію, то призводить в рух повзунок, який переміщує дифузор, пов'язаний з ним через шток. Така система застосовується в гоночних болідах Формули-1, а також на деяких гоночних автомобілях з відкритими колесами, наприклад Volkswagen I.D.R рекордсмен гори "Пайс Пік".



а)

б)

а - вид автомобіля, б - антикрило

Рисунок 3.4 - Volkswagen I.D.R

3.2 Недоліки існуючих систем активної аеродинаміки

Але і у цій системи є один недолік. Дана система не вирішує проблеми правильного розподілу притискних зусиль і аеродинаміки під час проходження поворотів(рис. 3.5). Якщо умовно розділити притискне зусилля на два з кожного боку автомобіля можна спостерігати наступну картину:

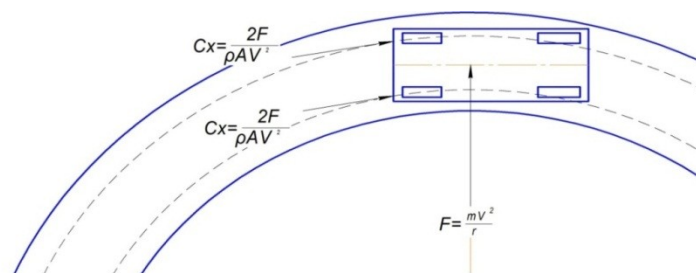


Рисунок 3.5 - Схема розподілу аеродинамічних та центробіжних сил на повороті

Автомобіль, який проходить або їде по траєкторії певної кривизни відчуває різний аеродинамічний опір на своїх контурах. На схемі видно, що якщо автомобіль переміщається по дузі, то його контури проходять різні радіуси траєкторії і відповідно переміщуються з різною швидкістю, а значить відчувають різний аеродинамічний опір,. Отже створюються різні притискні зусилля. До того ж автомобіль в цей час відчуває вплив відцентрової сили.

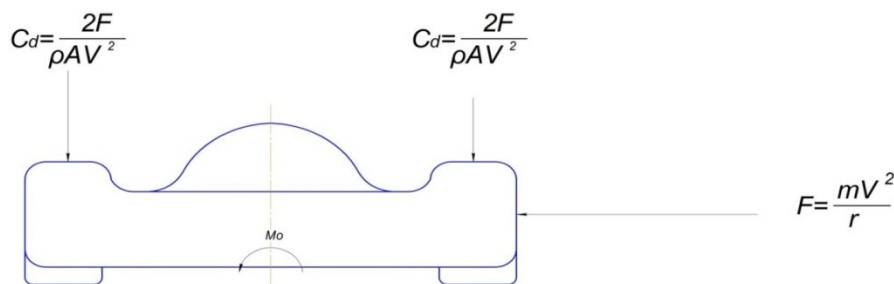


Рисунок 3.6 - Перекидаючий момент, який виникає під дією сил інерції та різниці притискних зусиль

На зображенні видно, що відбувається з автомобілем, коли той входить в поворот. Видно, що на зовнішньому контурі повороту швидкість більше, а значить, повітряні потоки будуть проходити через автомобіль швидше. Це призводить до того, що при проходженні повороту притискні зусилля на зовнішньому контурі будуть вище. В такому випадку буде виникати перекидаючий момент M_o , який прагне разом з відцентровою силою викинути автомобіль з повороту.

3.3 Системи активної аеродинаміки з використанням регульованих дифузорів

В роботі було запропоновано дифенційоване регулювання повороту дифузорів окремо з кожної сторони. Це дозволить на поворотах створювати більшу притискну силу з тієї сторони автомобіля, зо знаходиться з

внутрішньої сторони. Водночас з другої сторони можливо навіть створення підйомної сили (рис 3.7).

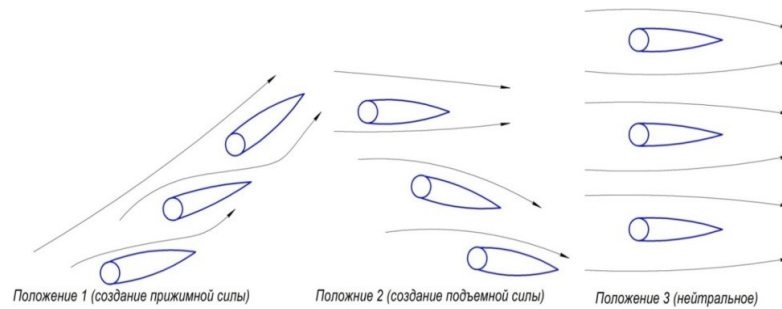


Рисунок 3.7 - Можливі положення дифузоров антикрила.

3.4 Результати розрахунку аеродинаміки автомобіля з використанням пропонованого регульованого антикрила

За розробленою та описаною у попередніх розділах методикою було обчислено аеродинамічні характеристики моделі автомобіля показаного на рис. 4.10.

Було розраховано автомобіль з відкритими та закритими дифузорами антикрила. Результати розрахунків відображені на рисунках 3.8 та 3.9 відповідно.

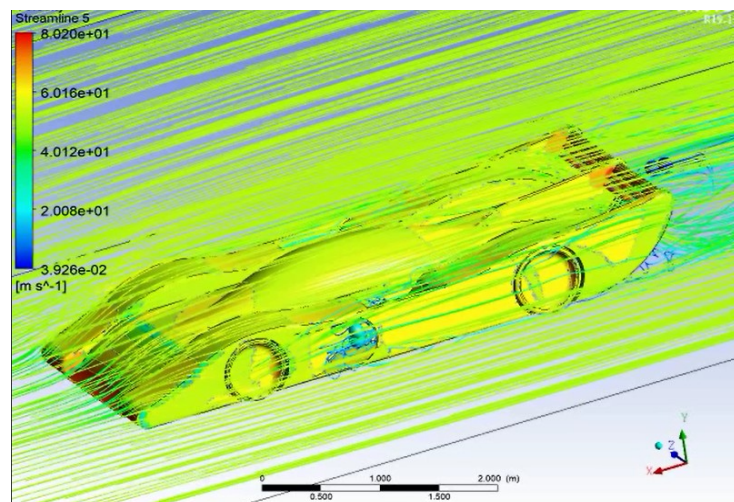


Рисунок 3.8 - Лінії току повітря через автомобіль з відкритими дифузорами

Розрахунки автомобіля із відкритими дифузорами показали, що коефіцієнт аеродинамічного опору дорівнює: $C_x = 0,53$.

Коефіцієнт притискного зусилля дорівнює: $C_d = 6,0$.

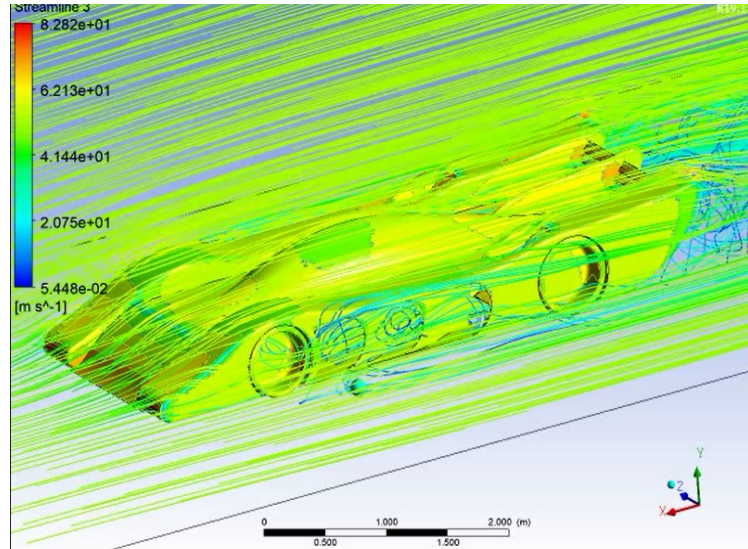


Рисунок 3.9 - Лінії току повітря через автомобіль з закритими дифузорами

Розрахунки автомобіля із закритими дифузорами показали, що коефіцієнт аеродинамічного опору дорівнює: $C_x = 0,55$.

Коефіцієнт притискного зусилля дорівнює: $C_d = 6,2$.

Таким чином можна зробити висновок, що при створенні повного притискного зусилля дифузорами антикрила збільшується притискне зусилля і лобовий опір автомобіля.

ВИСНОВКИ

У роботі детально розглянуто утворення потоків повітря, що оточує легковий автомобіль в різних умовах. За рахунок цього виконано порівняння умов руху і обрано варіанти спойлерів, що найбільше забезпечують зниження коефіцієнту аеродинамічного опору. Дослідження має нові наукові результати коректні посилання на джерела інформації, що використані і практичні результати у вигляді нових конструкцій спойлерів.

1. Розроблено методикку розрахунку аеродинамічних характеристик легкових автомобілів.

2. За даною методикою було розраховано аеродинаміку автомобіля BMW E46 (у співпраці з командою з драг-рейсингу “Avto-Makss). Серед розглянутих варіантів, є два найкращі варіанти спойлерів для автомобіля BMW E46. Це wing spoiler другого та duck tail spoiler третього варіантів виконання. Спойлер другого варіанту виконання знижує значення аеродинамічного опору практично на ту ж величину, що і спойлер за третім варіантом, але покращує значення притискного зусилля. Такий спойлер доречно використовувати, якщо автомобілю бракує зчеплення з дорогою та стабільності при русі . Якщо автомобіль при русі стабільно тримає дорогу і йому не потрібне додаткове навантаження, то можливе використання спойлера за третім варіантом виконання типу duck tail.

3. За вказаною методикою також були проведені розрахунки автомобіля з системою активної аеродинаміки – диференційованим регулюванням дифузурів антикрила, що сприяє кращій стійкості автомобіля на поворотах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шухардин С., Техника в ее историческом развитии. / Шухардин С., Ламан Н., Федоров А. // «Наука», 1982
2. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля. / Евграфов А.Н. // М: Издательство МГИУ, 2012. – 355 с.
3. Михайловский Е.В. Аэродинамика автомобиля. / Михайловский Е.В. // М: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. Гухо В. Г. Аэродинамика автомобиля под ред. Гухо В. Г. [пер.с нем. Н. А. Юниковой]. // М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
5. Mook D. Simulation of the interaction between aerodynamics and vehicle dynamics in general unsteady ground effect / Mook D., Nuhait A // Advanced Marine Vehicles Conference, Arlington, VA, U.S.A, 1989. – pp. 430-437. <https://doi.org/10.2514/6.1989-1498>
6. Katz J. Aerodynamics of Race Cars / Katz J // Annu. Rev. Fluid Mech. 2006 – 38: 27 – 63, pp. 27-65. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>
7. Manan Desai. Experimental and computational aerodynamic investigations of a car / Manan Desai, S.A. Channiwala, H.J. Nagarsheth // WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS, 2008. – vol. 3, pp. 359-368.
8. Himeno R. Numerical Analysis and Visualization of Flow in Automobile Aerodynamics Development / Himeno R., Fujitani K. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993. – vol. 47, pp. 785-790.
9. Nielsen E., Recent improvements in aerodynamic design optimization on unstructured meshes / Nielsen E., Anderson W. // AIAA Journal, 2000. – vol. 40 (6), pp. 1155-1163.
10. CFX-5 Solver Theory, 2004, 261 p.
11. Черный С.Г. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей /

- Черный С.Г., Грязин Ю.А., Шашкин П.А. // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4. № 2. – С. 74-94.
12. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). / Ли К. // СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
 13. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. / Быков В.П. // Л.: Машиностроение, 1989. – 255с.
 14. Русанов С.А. Методичні рекомендації та індивідуальні завдання для самостійної роботи студентів з дисципліни «Системи автоматизованого проектування автомобільних конструкцій». / Русанов С.А. // Херсон: Видавництво ХНТУ, 2016. – 120 с..
 15. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. / Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. // М.: Химия, 1982. – 296с.
 16. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. / Норенков И. П. // 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 430 с.
 17. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: / Феодосьев В.И. // Учеб. для вузов. - 10-е издание, перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. - 592 с.
 18. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. Ред. Д.Г. Красковского. // М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с.
 19. Єгоров А. О. Використання деталей складних профілів для зменшення аеродинамічного опору / Єгоров А. О., Куличенко П.М. Русанов С.А., Лобов О.О. // Вісник ХНТУ 3(70)
 20. Єгоров А.О. Системи активної аеродинаміки з використанням регульованих дифузорів. / Єгоров А.О., Лобов О.О., Ключєва О.О. // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», 2019, С. 256-259.