

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

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А
Другий (магістерський) рівень вищої освіти
на тему: **“Оптимізація аеродинаміки боліда Formula Studen шляхом
модифікації кузовних елементів”**

Виконав: студент групи Ат-61
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Віталій ІВАШКІВ
(ім'я та прізвище)

Керівник: Богдан

(ім'я та прізвище)

НЕСТЕР

Дубляни 2025

62-422.15

«Оптимізація аеродинаміки боліда Formula Studen шляхом модифікації кузовних елементів» Івашків Віталій Миколайович. Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів та тракторів. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. 55 с. текст, 33 рис., 26 джерел.

Об'єкт дослідження: аеродинаміка боліда Formula Student.

Мета роботи: дослідження та оптимізація аеродинамічних властивостей легкового боліда Formula Student з допомогою мікротурбулентних структур.

Методи дослідження: математичне моделювання аеродинамічних процесів, комп'ютерне моделювання в програмному середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation.

У дипломній роботі досліджено вплив мікротурбулентних структур на аеродинамічну обтічність боліда та обґрунтовано доцільність їх використання в конструкції кузова. Проведено чисельне моделювання аеродинамічних характеристик автомобіля з використанням програмного забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation. Визначено найбільш ефективні конструктивні рішення для покращення керованості автомобіля, що в свою чергу збільшує безпеку водіння на спортивних змаганнях.

Зміст

ВСТУП.....	7
1. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	9
1.1. Основні поняття та фізичні принципи автомобільної аеродинаміки	9
1.2. Сучасні вимоги до аеродинамічної обтічності болідів Formula Student	12
1.3. Мікротурбулентні структури: класифікація, властивості та застосування у техніці	15
Висновки за розділом.....	17
2. МЕТОДИКА АЕРОДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1. Обґрунтування вибору програмного забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation.....	18
2.2. Методика дослідження аеродинаміки м'яча з мікротурбулентними структурами	18
2.3. Підготовка 3D-моделі боліда	24
2.4. Реалізація мікротурбулентних структур на поверхні кузова боліда.....	25
Висновки за розділом.....	26
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
3.1. Аеродинамічні характеристики м'яча з мікроструктурами та м'яча без мікро-структур	28
3.2. Порівняння та аналіз впливу мікротурбулентних структур	30
3.3. Аеродинамічні показники базової конфігурації боліда	34
3.4 Аеродинамічні показники боліда з мікротурбулентними структурами.....	36
3.5. Порівняльний аналіз ефективності модифікацій	39
Висновки за розділом.....	41
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	43

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	46
5.1. Економічна доцільність застосування мікротурбулентних структур у конструкції боліда	46
5.2. Порівняння вартості традиційних аеродинамічних рішень та мікроструктур	48
Висновки за розділом.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ВСТУП

Аеродинамічні властивості автомобіля відіграють ключову роль у формуванні його керованості, стійкості та енергоефективності. У змаганнях класу Formula Student, де кожна дрібна перевага може вплинути на результат, оптимізація обтічності стає не просто бажаною, а критично необхідною. Сучасні методи комп'ютерної інженерії, зокрема CFD-моделювання, дозволяють проводити глибокий аналіз поведінки повітряних потоків і розробляти вдосконалені рішення без необхідності складних та витратних експериментів у аеродинамічній трубі. Саме тому використання чисельних методів у процесі проєктування боліда є одним зі шляхів отримання конкурентної переваги.

Одним із перспективних напрямів підвищення аеродинамічної ефективності є застосування мікротурбулентних структур на поверхні кузова. Ці структури впливають на поведінку пограничного шару, сприяючи стабілізації потоку, зменшенню відривних зон і зниженню лобового опору. Подібні технології відомі у спортивному спорядженні, авіації та енергетичному машинобудуванні, однак їх адаптація до автомобільної інженерії, особливо у форматі невеликих гоночних болідів, залишається актуальною задачею та потребує комплексного підходу.

У рамках цієї роботи запропоновано дослідити ефективність мікротурбулентних структур через поетапний аналіз: спочатку на простішому об'єкті — сферичному м'ячі, для якого були отримані дані щодо аеродинаміки гладкої поверхні та поверхні з мікроструктурами. Такий підхід дозволяє краще зрозуміти механізми формування турбулентності, поведінку пограничного шару та вплив дрібних поверхневих елементів на обтікання. Отримані результати слугують основою для перенесення цих закономірностей на більш складну модель — болід Formula Student. Аналіз на малому масштабі дає змогу простежити ефекти, які на великому об'єкті можуть бути важче помітними.

Основною метою дипломної роботи є оптимізація аеродинамічної обтічності боліда Formula Student шляхом застосування мікротурбулентних структур та оцінка впливу таких модифікацій на характеристики потоку за допомогою чисельного моделювання у SOLIDWORKS Flow Simulation. У ході дослідження розглядаються теоретичні засади роботи повітряного потоку навколо транспортних засобів, аналізуються властивості та можливості використання мікроструктур, проводиться порівняння поведінки повітряного потоку на прикладі сферичного м'яча та виконується CFD-моделювання двох конфігурацій боліда — базової та модифікованої. Порівняння отриманих результатів дозволяє визначити, наскільки ефективними можуть бути такі поверхневі рішення для покращення аеродинамічних характеристик та керованості автомобіля на трасі.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих висновків при проєктуванні реальних болідів Formula Student. Розуміння того, як мікротурбулентні структури впливають на поведінку повітряного потоку, може стати підґрунтям для подальшого вдосконалення кузовних елементів, підвищення ефективності руху та зменшення витрат на створення аеродинамічних компонентів. Методологія, застосована в дослідженні, може бути корисною не лише у сфері студентського автоспорту, але й у ширших інженерних проєктах, де важливим є контроль турбулентності та мінімізація опору середовища.

1. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Змагання Formula Student є інженерною платформою, де поєднуються обмежені ресурси, жорсткі технічні регламенти та високі вимоги до динамічних характеристик автомобіля. У таких умовах аеродинамічна обтічність боліда відіграє важливу роль, оскільки безпосередньо впливає на керованість, стійкість у поворотах, ефективність розгону та загальну енергетичну ефективність транспортного засобу. На відміну від серійних автомобілів, де основний акцент робиться на комфорт і паливну економічність, у болідах Formula Student пріоритет надається оптимальному балансу між лобовим опором і притискною силою.



Рисунок 1.1 – боліди Formula Student

1.1. Основні поняття та фізичні принципи автомобільної аеродинаміки

Автомобільна аеродинаміка вивчає процеси взаємодії повітряного потоку з рухомих транспортним засобом та визначає сили і моменти, що виникають у результаті цього взаємодіяння. Для автомобілів, а особливо для гоночних

болідів, аеродинамічні характеристики мають безпосередній вплив на динаміку руху, стійкість, керованість та ефективність використання енергії. Основними силами, що діють на автомобіль під час руху, є сила лобового опору, притискна або підйомна сила, а також бічні сили, які проявляються при нерівномірному або асиметричному обтіканні.

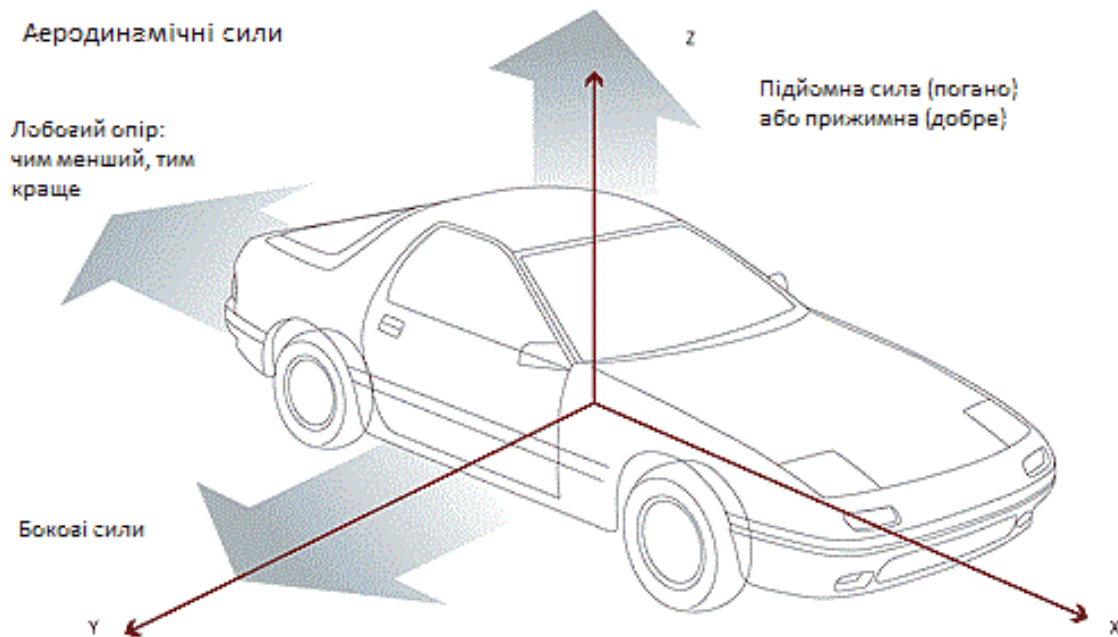


Рисунок 1.2 – Сили аеродинаміки , що виникають при русі автомобіля

Сила лобового опору формується внаслідок перепаду тиску між передньою та задньою частинами автомобіля, а також через в'язкі втрати в повітряному потоці. Вона залежить від швидкості руху, форми кузова, площі лобового перерізу та характеру обтікання. Притискна сила, у свою чергу, визначає рівень зчеплення шин з дорожнім покриттям і є критично важливою для забезпечення стабільності боліда у поворотах. Для гоночних автомобілів завданням аеродинаміки є не лише зменшення опору, але й створення оптимального співвідношення між опором та притискною силою.

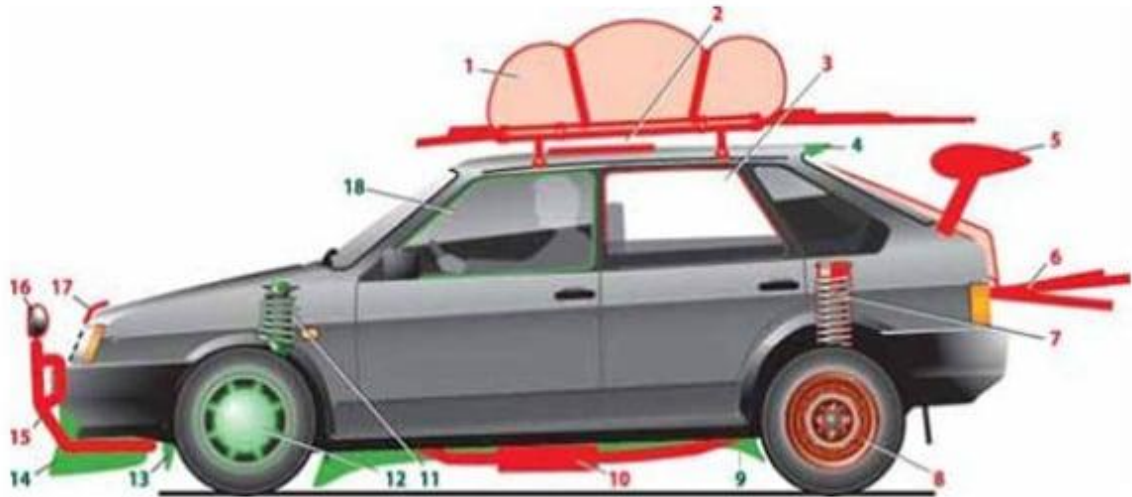


Рисунок 1.3 – Вплив елементів автомобіля на аеродинамічний опір.

Де:

елементи від 1 до 18 мають вплив на аеродинаміку.

Ключовим елементом у формуванні аеродинамічних характеристик є пограничний шар — тонкий шар повітря поблизу поверхні кузова, в якому швидкість потоку змінюється від нульового значення до швидкості основного потоку. Стан пограничного шару може бути ламінарним або турбулентним, і саме його поведінка значною мірою визначає момент та характер відриву потоку. Відрив призводить до утворення вихрових зон позаду автомобіля, що збільшує лобовий опір і знижує аеродинамічну ефективність.

У реальних умовах руху автомобіля повністю ламінарне обтікання є практично недосяжним, особливо для складних геометричних форм. Тому сучасна автомобільна аеродинаміка орієнтується не на усунення турбулентності, а на її контроль. Керований перехід до турбулентного режиму може сприяти стабілізації потоку та зменшенню зони відриву. Саме на цьому принципі ґрунтуються як традиційні аеродинамічні елементи, так і сучасні поверхневі методи впливу на потік.

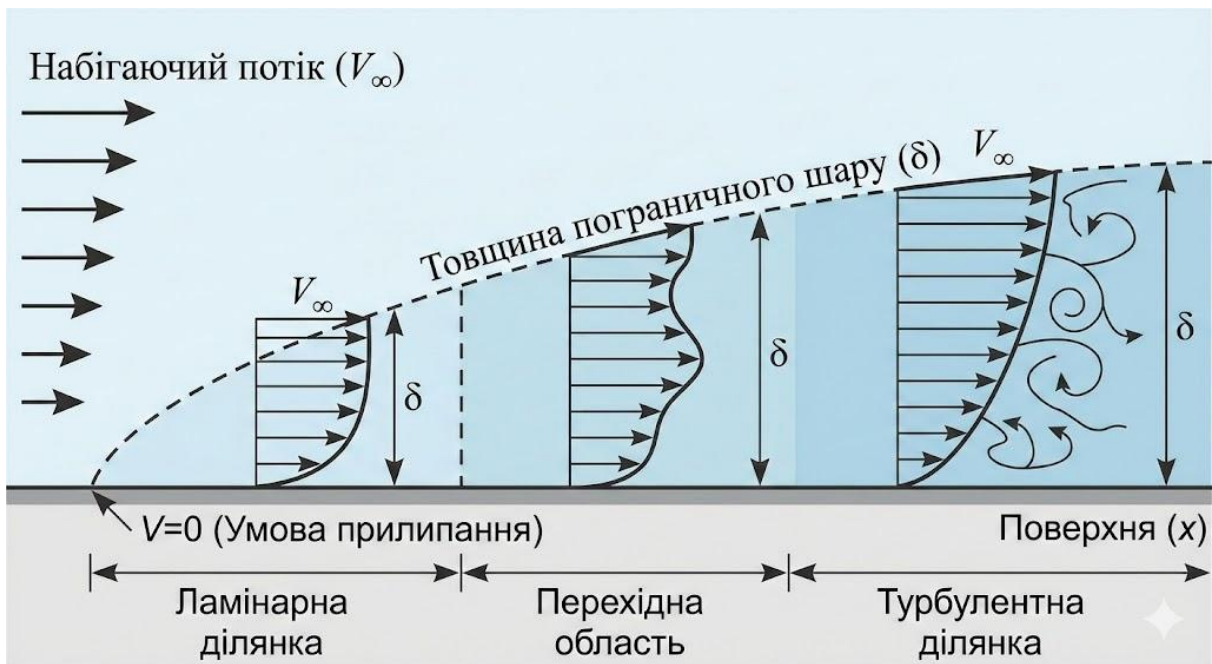


Рисунок 1.4 – Схема пограничного шару в аеродинаміці

Використання чисельних методів моделювання дозволяє детально дослідити поведінку повітряного потоку навколо автомобіля, оцінити розподіл тиску, швидкостей та турбулентних параметрів. Це створює передумови для пошуку нових інженерних рішень, спрямованих на покращення аеродинамічних характеристик без значних конструктивних змін.

1.2. Сучасні вимоги до аеродинамічної обтічності болідів Formula Student

Змагання Formula Student поєднують у собі елементи класичного автоспорту та інженерного проєктування, де кожне технічне рішення має відповідати як динамічним, так і регламентним вимогам. Аеродинаміка боліда в цьому класі розглядається не ізольовано, а як частина комплексної системи, що включає масу автомобіля, потужність силової установки, характеристики підвіски та шасі. За відносно невисоких робочих швидкостей, характерних для трас Formula Student, навіть незначні аеродинамічні покращення можуть суттєво вплинути на час проходження дистанції.

Сучасні вимоги до аеродинамічної обтічності боліда полягають у забезпеченні стабільного та передбачуваного характеру руху. Надмірний аеродинамічний опір призводить до втрати швидкості на прямих ділянках, тоді як недостатня притискна сила знижує ефективність проходження поворотів. Особливу увагу приділяють збалансованості аеродинамічних сил між передньою та задньою осями, оскільки дисбаланс може викликати недостатню або надмірну повертальність автомобіля.

Важливим фактором, що безпосередньо впливає на аеродинамічні властивості, є габарити боліда. Довжина, ширина та висота автомобіля визначають площу лобового опору, характер обтікання та можливості формування аеродинамічних елементів. Збільшення габаритів, з одного боку, може створювати умови для ефективнішого керування потоком, але з іншого — призводить до зростання маси та опору. Регламент Formula Student жорстко обмежує габаритні розміри боліда, що змушує команди шукати рішення, які не потребують змін загальної геометрії кузова.

Габарити боліда Formula Student не є фіксовані, але існують суворі обмеження в регламенті змагань, особливо щодо загальної ширини, довжини, висоти та колісної бази, які забезпечують безпеку та відповідність стандартам. Також значення габаритів можуть відрізнятися залежно від року, але завжди підпадають під суворий технічний контроль безпеки, що регулює компонування кокпіта, захист від зітклень та розташування елементів шасі.

Станом на 2025 рік габарити болідів Formula Student не повинні перевищувати довжини 3400 мм, ширини у 1270 мм, висоти 1320 мм, та бути масою не менше 768 кг.

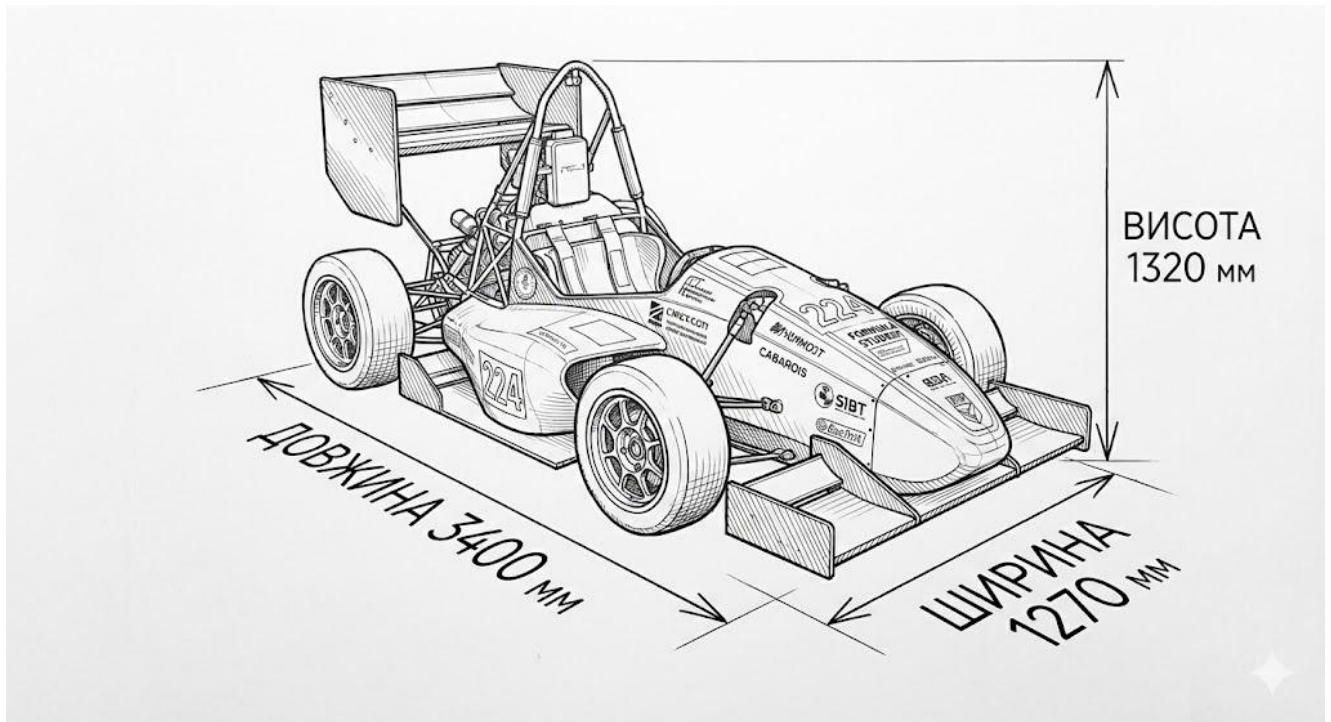


Рисунок 1.5 – Габарити боліда Formula Student

Окрім габаритів, значний вплив на обтікання має форма окремих елементів кузова, таких як носова частина, бокові понтони, зона кокпіта (або кабіна водія) та хвостова частина. Саме в цих зонах найчастіше виникають відриви потоку та вихрові структури. Через обмежені можливості використання великих аеродинамічних елементів у студентських болідах актуальним стає пошук методів локального впливу на потік без зміни базових розмірів автомобіля.

Таким чином, сучасні вимоги Formula Student формують запит на компактні, легкі та економічно обґрунтовані аеродинамічні рішення, які дозволяють підвищити ефективність обтікання в межах встановлених регламентом обмежень.

1.3. Мікротурбулентні структури: класифікація, властивості та застосування у техніці

Мікротурбулентні структури являють собою дрібні елементи поверхні, призначені для керування процесами, що відбуваються у пограничному шарі повітря. Їх основною функцією є ініціювання контрольованої турбулентності, яка сприяє зменшенню відриву потоку та стабілізації обтікання поверхні. На відміну від традиційних аеродинамічних елементів, мікроструктури впливають на локальні процеси та не змінюють загальну форму об'єкта.

За геометрією та принципом дії мікротурбулентні структури можуть бути виконані у вигляді заглиблень, виступів, мікроребер, канавок або комбінованих поверхонь. Найбільш відомим прикладом є сферичні заглиблення на поверхні спортивного м'яча, які дозволяють зменшити аеродинамічний опір шляхом зміни характеру обтікання. Аналогічні принципи застосовуються у авіаційній техніці для зменшення опору крил, у турбомашинах для підвищення ефективності лопаток, а також у теплообмінних апаратах.

Основною перевагою мікротурбулентних структур є їхня висока ефективність при мінімальних витратах. Вони практично не впливають на масу конструкції, не потребують значних змін геометрії та можуть бути реалізовані з використанням сучасних технологій виготовлення, таких як 3D-друк або локальна поверхнева обробка. Це робить їх особливо привабливими для застосування у студентських гоночних болідах, де кожен грам маси та кожен елемент конструкції мають значення.

У контексті автомобільної аеродинаміки мікротурбулентні структури розглядаються як інструмент для локальної оптимізації обтікання проблемних зон кузова. Вивчення їхнього впливу на прості геометричні форми, такі як сфера, дозволяє глибше зрозуміти фізичні механізми взаємодії потоку з модифікованою поверхнею. Отримані закономірності можуть бути масштабовані та перенесені на складніші об'єкти, зокрема на кузов боліда Formula Student, що і є одним із ключових напрямів даної дипломної роботи.

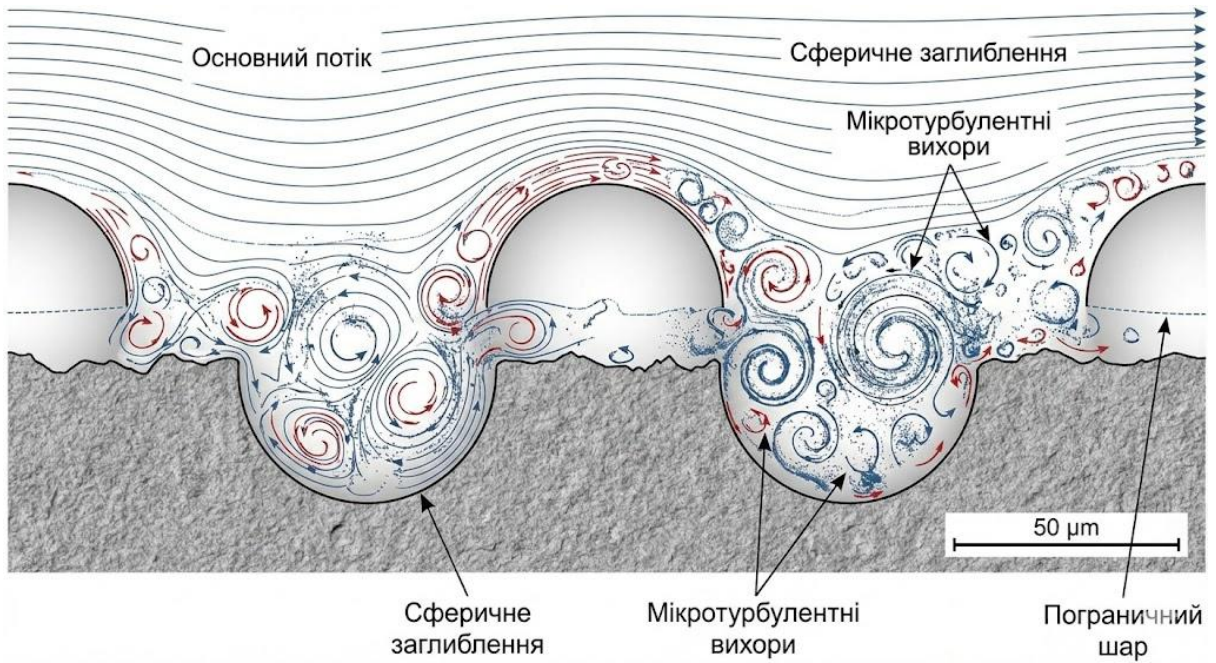


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення поверхні з наявними мікротурбулентними структурами сферичної форми та повітряного потоку

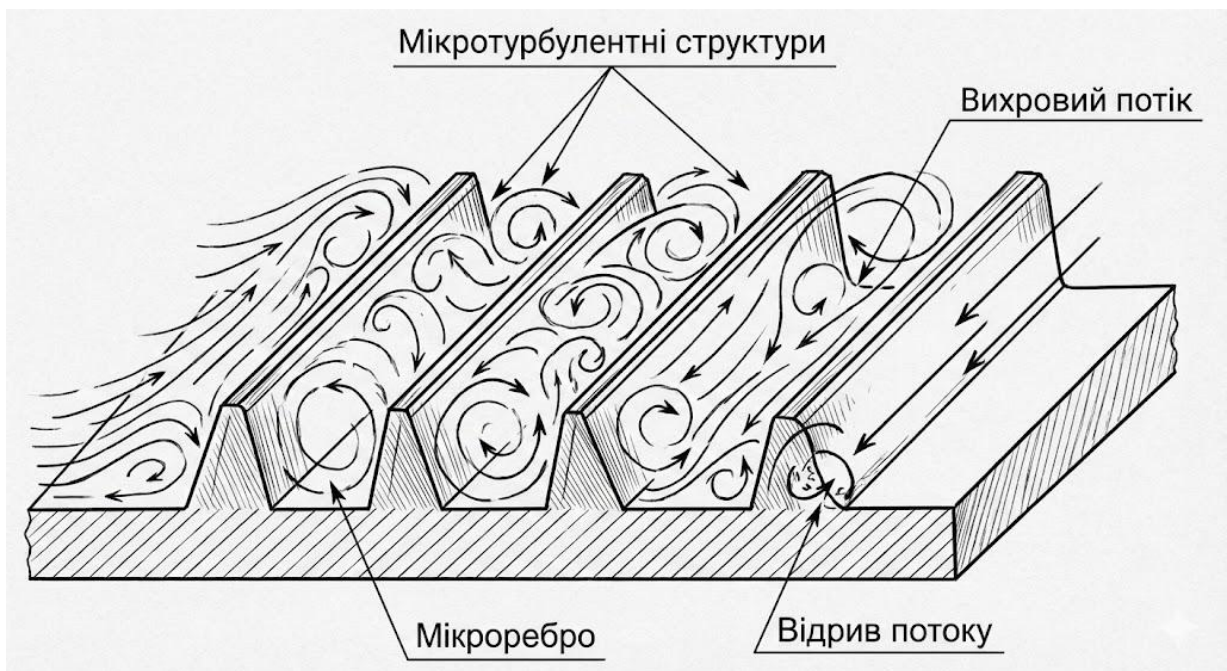


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення поверхні з наявними мікротурбулентними структурами у вигляді мікроребер та повітряного потоку

Висновки за розділом

Аналіз сучасного стану розвитку автомобільної аеродинаміки підтверджує, що для болідів класу Formula Student ключовим завданням залишається пошук оптимального балансу між мінімізацією лобового опору та забезпеченням достатньої притискної сили. Фізичні принципи керування пограничним шаром вказують на те, що використання мікротурбулентних структур є ефективним способом енергокорекції потоку. Це дозволяє ініціювати контрольовану турбулентність, яка затримує відрив струменя від поверхні кузова та суттєво зменшує зону розрідження (аеродинамічного сліду) за об'єктом.

Техніко-економічне обґрунтування та детальний розгляд регламентних вимог на 2025 рік свідчать про наявність жорстких обмежень щодо габаритних параметрів боліда (довжина до 3400 мм, ширина до 1270 мм). Такі рамки роблять інтеграцію мікрогеометрії безпосередньо в поверхню елементів обтікання найбільш раціональним шляхом модернізації. На відміну від встановлення масивних додаткових антикрил, цей підхід дозволяє покращити характеристики боліда без ризику порушення технічного регламенту змагань та без збільшення загальної маси конструкції.

Дослідження теоретичних засад показало, що мікроструктури типу «Bubble Pattern» (виїмки) працюють за аналогією з поверхнею м'яча для гольфу, де створюється тонкий турбулентний шар, який краще «облягає» криволінійні поверхні. Це створює теоретичне підґрунтя для переходу від загальних конструкторських рішень до цілеспрямованого проектування мікрорельєфу кузова, що є інноваційним кроком для студентських гоночних проектів.

2. МЕТОДИКА АЕРОДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування вибору програмного забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation

Для дослідження аеродинамічних характеристик боліда Formula Student та аналізу впливу мікротурбулентних структур у даній роботі використано програмне забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation. Вибір цього програмного продукту зумовлений його інтеграцією з CAD-середовищем SOLIDWORKS, що дозволяє здійснювати повний цикл інженерного аналізу — від створення тривимірної геометричної моделі до отримання чисельних результатів без необхідності експорту даних у сторонні програми.

Додатковою перевагою обраного програмного забезпечення є можливість візуалізації результатів у вигляді полів швидкостей, тиску, ліній течії та вихрових структур. Така наочність значно спрощує аналіз отриманих даних та дозволяє порівнювати різні конфігурації об'єкта. Крім того, відносно невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів роблять SOLIDWORKS Flow Simulation доступним інструментом для студентських досліджень.

Таким чином, обране програмне забезпечення забезпечує достатню точність результатів, зручність у використанні та ефективність аналізу, що відповідає цілям і завданням даної дипломної роботи.

2.2. Методика дослідження аеродинаміки м'яча з мікротурбулентними структурами

Дослідження аеродинамічних характеристик м'яча з мікротурбулентними структурами використовується у даній роботі як наочний приклад впливу поверхневої модифікації на поведінку повітряного потоку. Вибір сферичної форми зумовлений простотою геометрії та добре вивченими аеродинамічними

властивостями сфери, що дозволяє чітко простежити ефект від застосування мікроструктур.

У рамках дослідження розглядаються дві конфігурації об'єкта: м'яч із гладкою поверхнею та м'яч із рівномірно розподіленими мікротурбулентними структурами. Для обох випадків задаються однакові граничні умови, що дозволяє коректно порівнювати отримані результати. Основними параметрами, які аналізуються, є коефіцієнт аеродинамічного опору, розподіл тиску на поверхні та характер обтікання, зокрема положення зони відриву потоку.

Для початку необхідно створити моделі з якими ми будемо працювати і проводити на них аеродинамічні симуляції.

Першим кроком в створенні сфери і надані їй текстури з виїмками буде відкриття програми SOLID WORKS і утворення нової деталі.

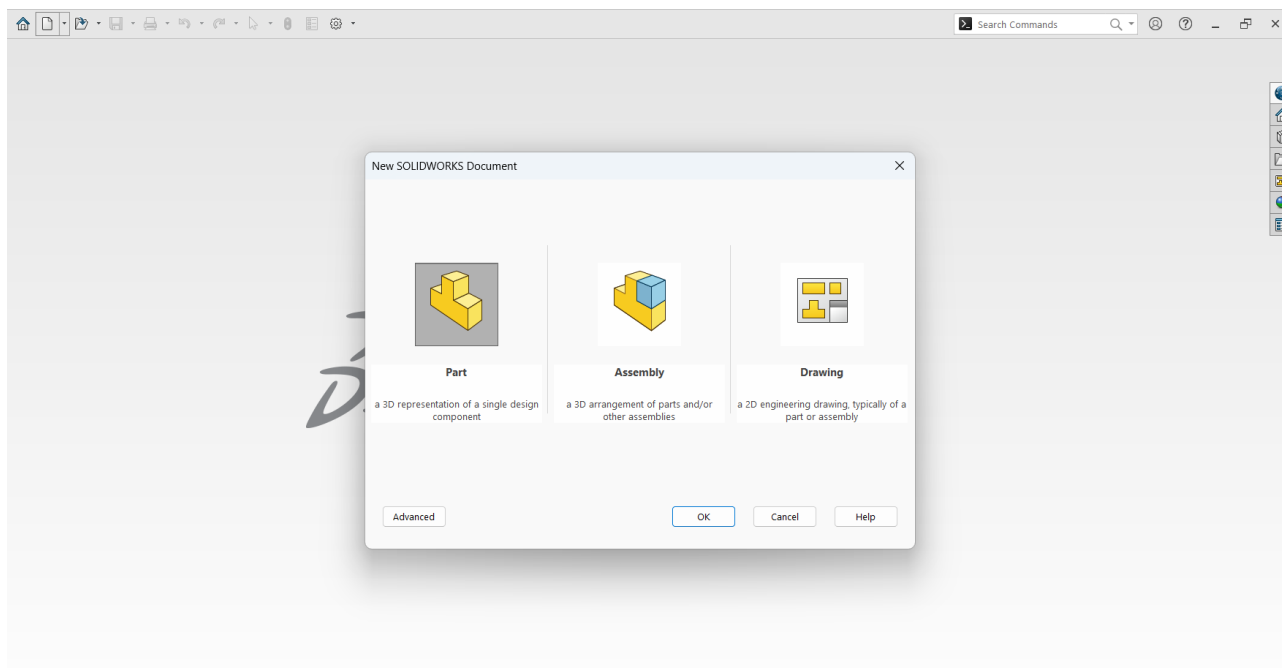


Рисунок 2.1 – Робоче вікно для створення елемента

Потрібно вибрати одну з площин на якій ми будемо працювати. І почати створювати ескіз (див. Рисунок – 2.2) з якого в подальшому ми утворимо сферу.

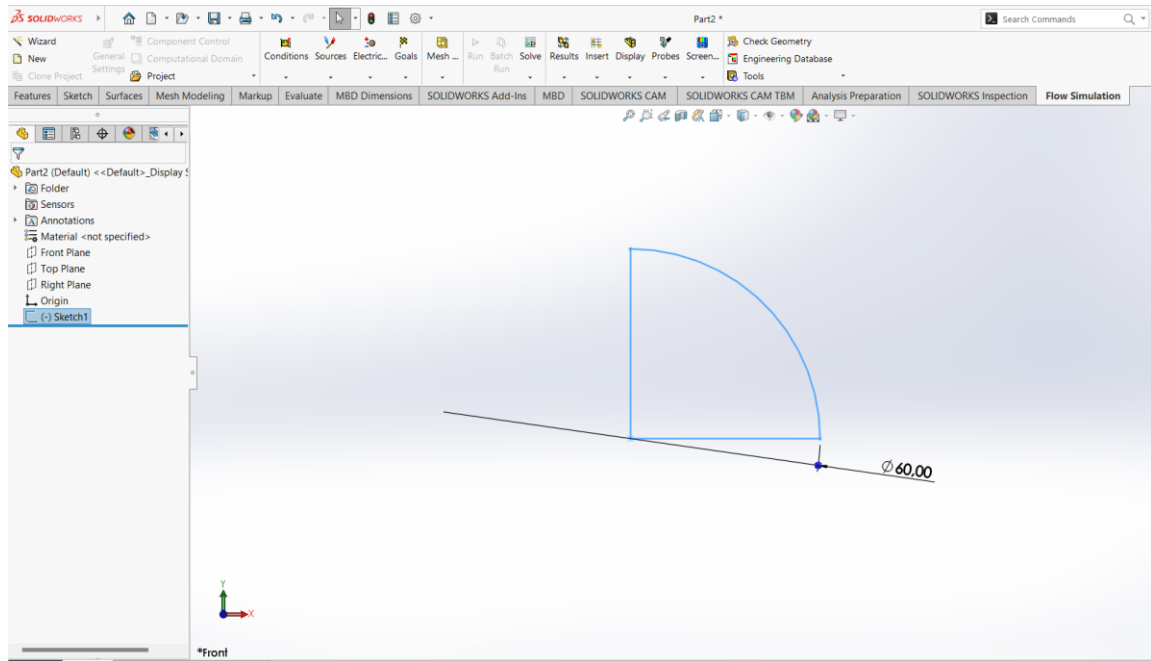


Рисунок 2.2 – Ескіз чверті кола

Тепер скориставшись елементом «Revolve Boss/Base», як показано на зображенні (Рисунок 2.3) нам вдалося створити пів сферу з якої, використавши елемент «Mirror Face» і вибравши необхідні поверхні я утворив повноцінну твердотілу сферу.

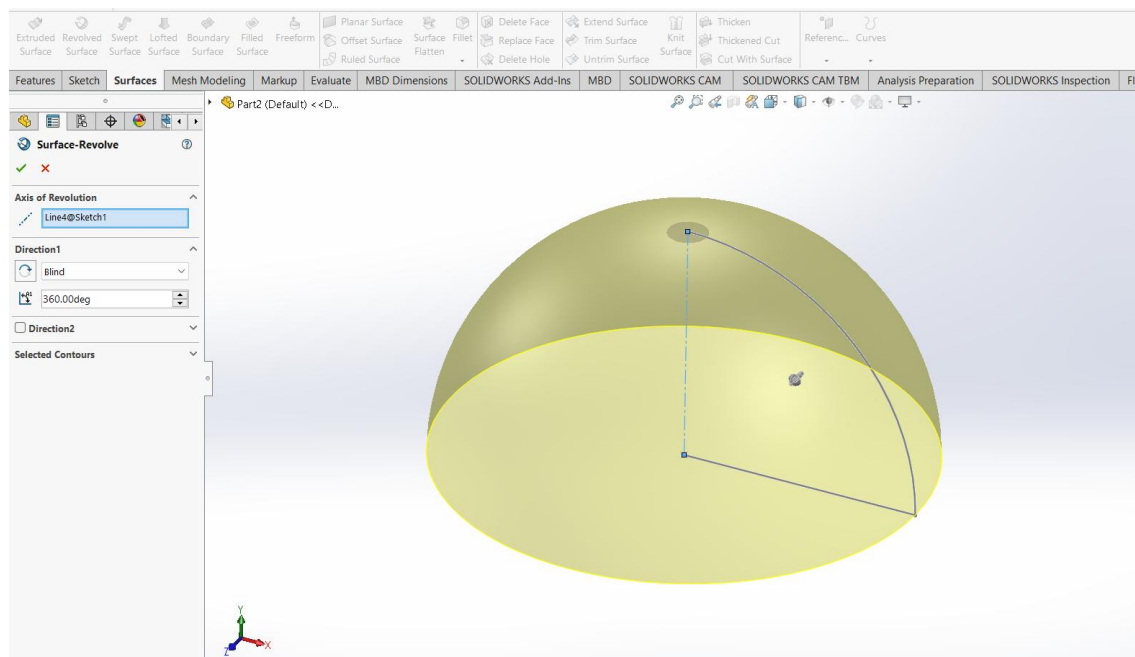


Рисунок 2.3 – Використання елемента «Revolve Boss/Base»

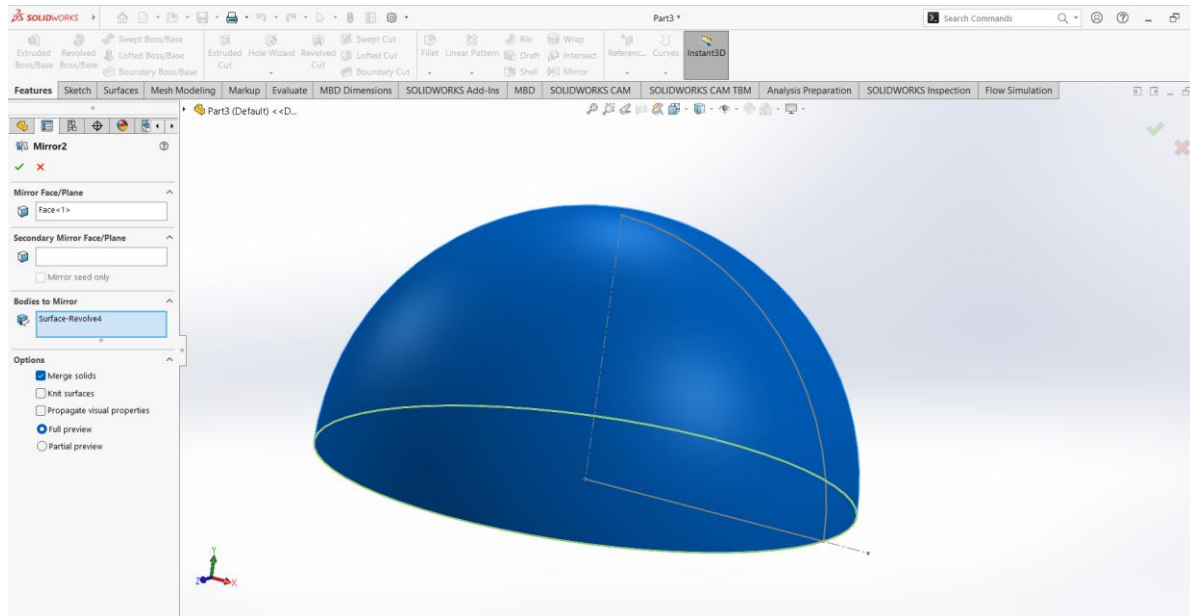


Рисунок 2.4 – Використання елемента «Mirror Face»

Наступним кроком буде нанесення необхідної текстури на поверхню сфери, для цього використовуємо вкладку з текстурами, обираємо папку «3D Textures» і натискаємо на необхідний вигляд моделі, в моєму випадку це «Bubble Pattern» (Рисунок 2.6).

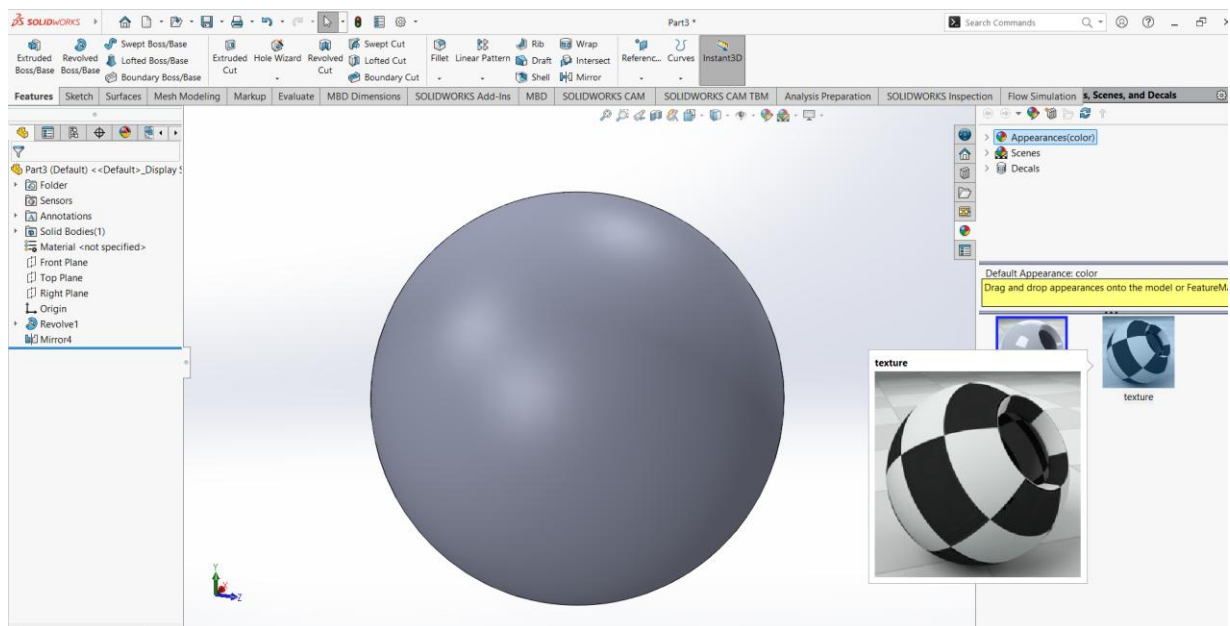


Рисунок 2.5 – Надання тілу текстури

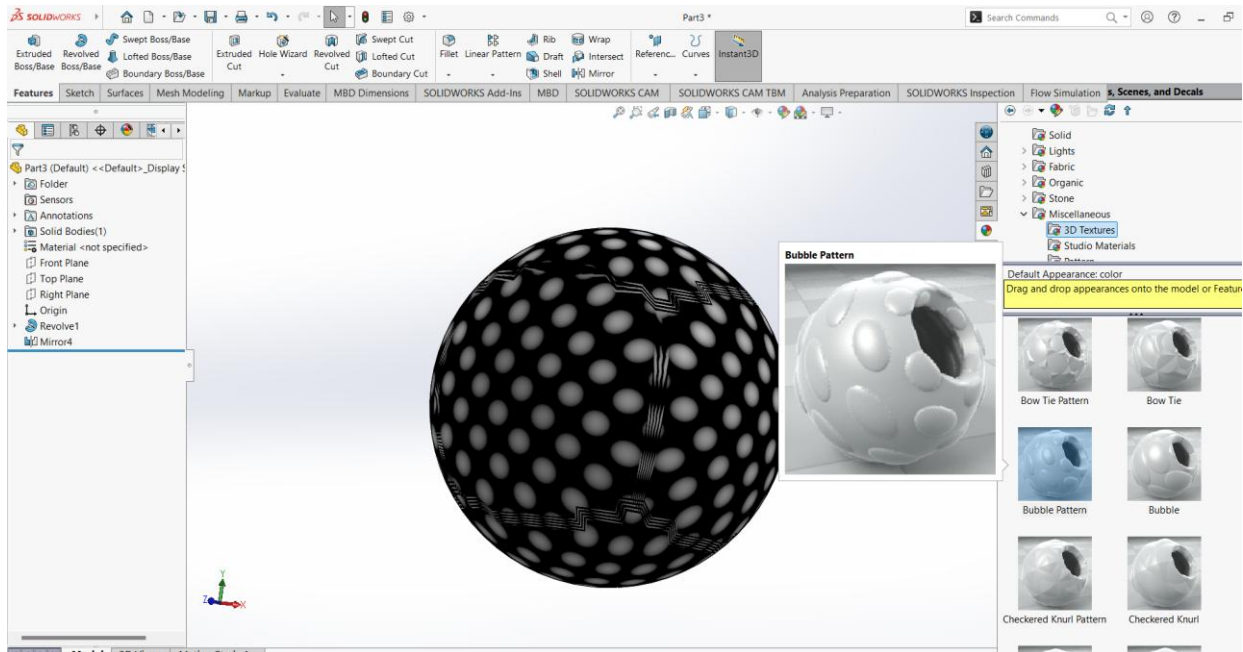


Рисунок 2.6 – Текстура «Bubble Pattern» на тілі

Крок що іде наступним є найважливішим, адже саме завдяки ньому ми можемо створити на тілі виїмки сферичної форми. Отже для початку обираємо вкладку «Mesh Modeling» і обираємо функцію «3D Texture» як показано на Рисунок 2.7.

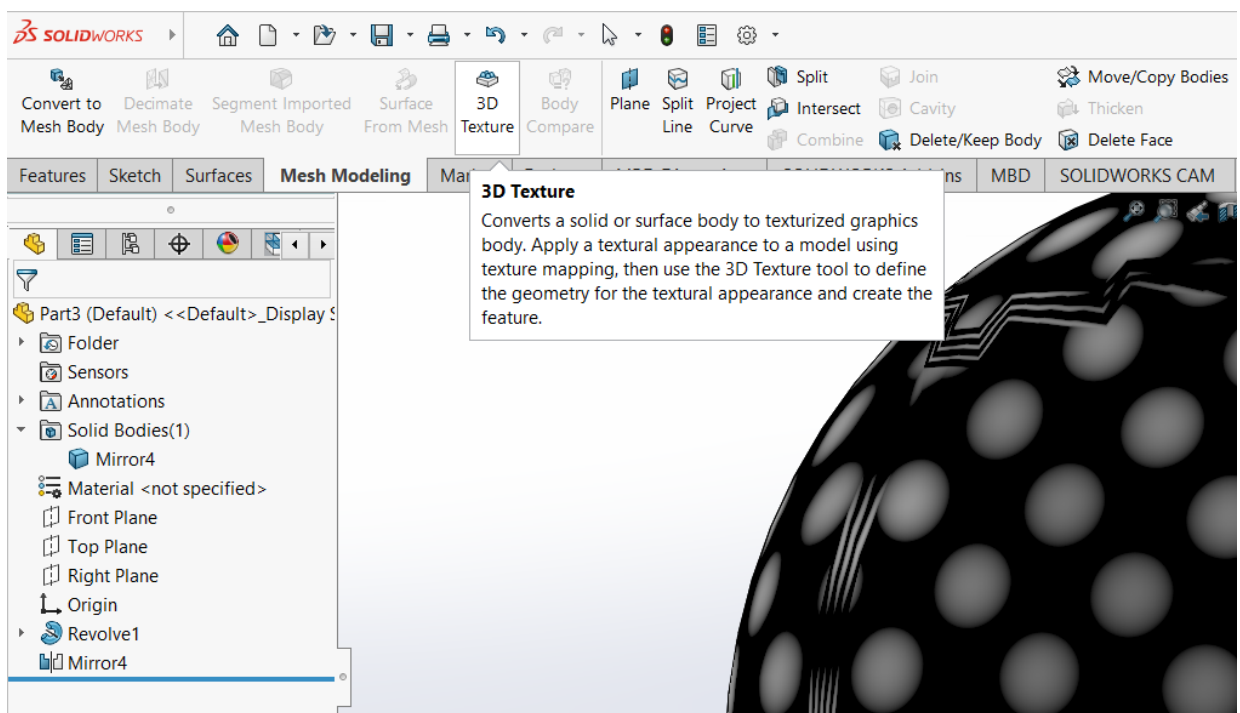


Рисунок 2.7 – Перехід до надання об'єму для плоскої текстури

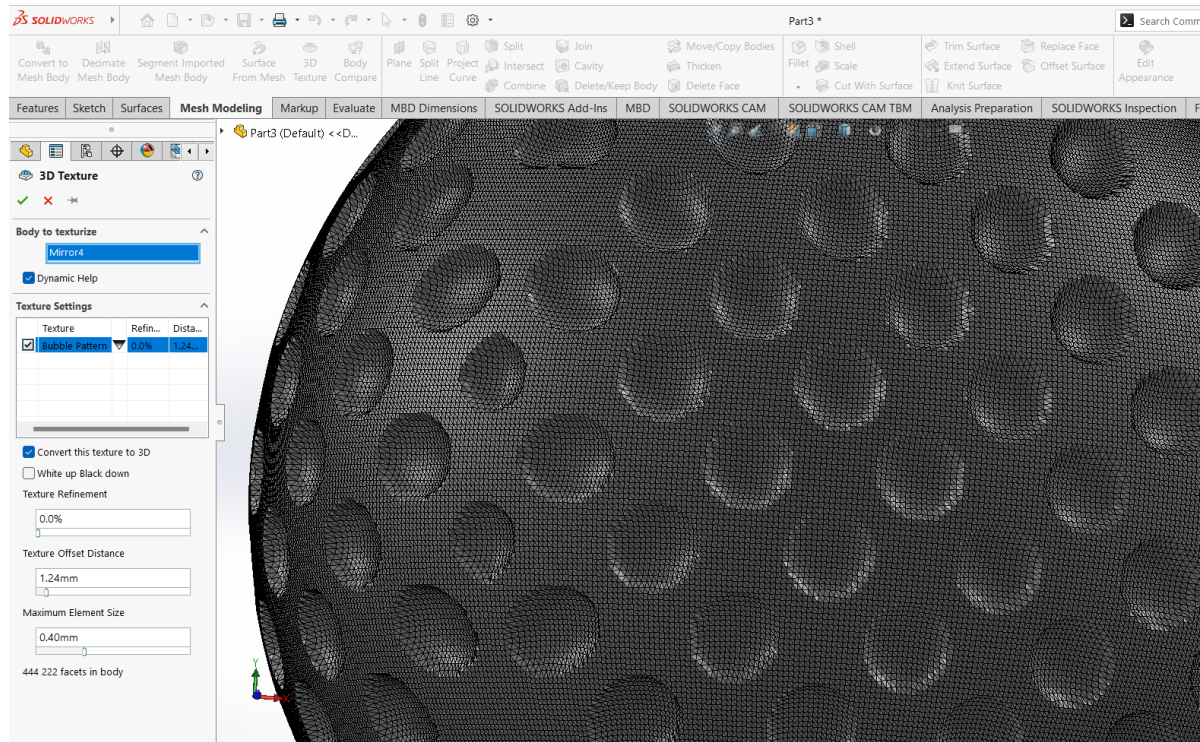


Рисунок 2.8 – Налаштування 3D текстури

В налаштування текстури вносимо наступні значення:

- Максимальна глибина – 1.24 мм
- Максимальний розмір полігона – 0.4 мм

Чим меншим є розмір одного полігона поверхні тим більш деталізованою і гладкою є поверхня моделі, але негативним фактором цього є те що чим менший розмір тим більше цих полігонів потрібно, що в свою чергу збільшує навантаження на комп'ютер, тому потрібно шукати баланс. Зі збільшенням деталізації об'єкта збільшується час на формування текстури, переведення її в тверде тіло та значно збільшує час на проведення аеродинамічних досліджень.

Мною було вирішено що оптимальною кількістю полігонів на об'єкті буде число що не перевищує значення – 1М штук. Для сфери з виїмками над якою нам прийдеться працювати дане значення є – 444222 поверхні.

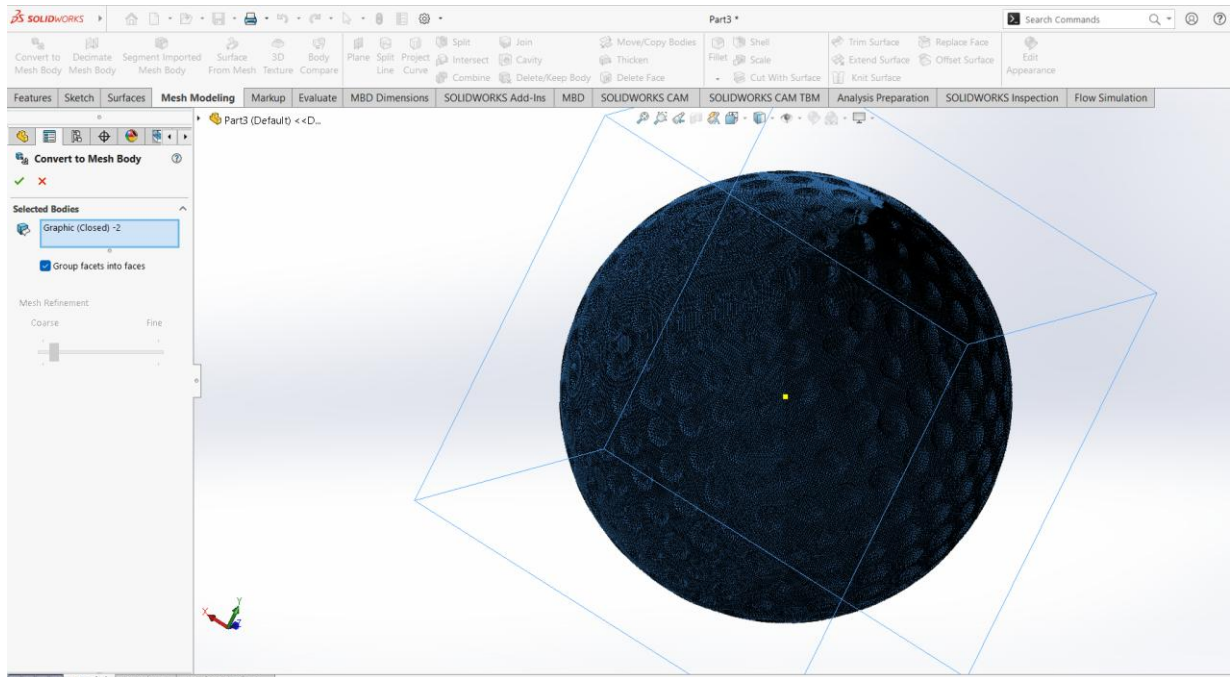


Рисунок 2.9 – Формування твердого тіла з текстурованої поверхні сфери

Завершальним кроком пункту 2.2 буде формування твердого тіла з моделі, яку щойно було створено. Для цього скористаємося функцією «Convert to Mesh Body» що знаходиться в тій ж вкладці «Mesh Modeling» (Рисунок 2.9).

2.3. Підготовка 3D-моделі боліда

Підготовка тривимірної моделі боліда є одним із ключових етапів проведення чисельного аеродинамічного дослідження. Від якості геометричної моделі значною мірою залежить достовірність отриманих результатів. У даній роботі 3D-модель боліда створюється з урахуванням основних габаритних розмірів, пропорцій та конструктивних особливостей, характерних для болідів класу Formula Student.

Також модель було спрощено до загальних габаритів, що відповідають нормам і з дотриманням форми та силуету гоночного боліда, що в допомогло зменшити кількість поверхонь, а отже і навантаження на систему та ПЗ комп'ютера. Це в свою чергу дало можливість провести необхідні розрахунки та симуляції повітряних потоків на моделі і зробити певні висновки.

Під час моделювання основна увага приділяється зовнішнім поверхням кузова, які безпосередньо взаємодіють з повітряним потоком. Дрібні конструктивні елементи, що не мають суттєвого впливу на аеродинаміку, виключені з моделі з метою зменшення обчислювальної складності.

Після створення геометрії проводиться перевірка моделі на наявність геометричних помилок, таких як зазори, перетини поверхонь або некоректно задані контури. Коректна підготовка моделі забезпечує стабільну роботу CFD-алгоритмів та зменшує ймовірність виникнення чисельних похибок під час розрахунку.

В результаті було створено дану модель:

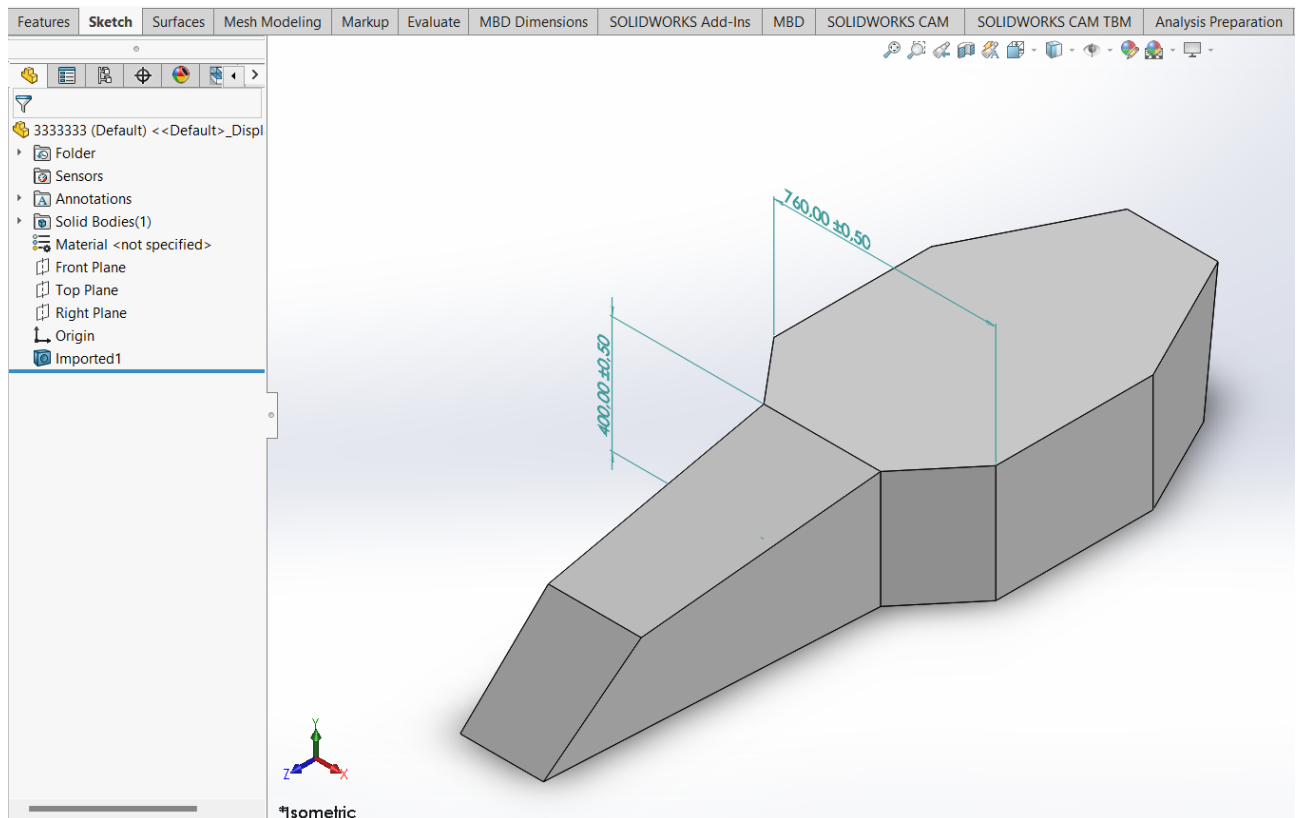


Рисунок 2.10 – Схематична модель боліда Formula Student

2.4. Реалізація мікротурбулентних структур на поверхні кузова боліда

Для реалізації на поверхні кузова боліда я буду використовувати той самий принцип, що й раніше на поверхні сфери в пункті 2.2. А саме я накладу

на вже створену модель текстуру виїмок сферичної форми та надам їм об'єму тим же способом, який мікротурбулентних структур описаний вище.

В результаті було отримано 2 моделі, одну з гладкими поверхнями (Рисунок 2.10) як контрольний варіант від результатів якого ми будемо відштовхуватися і приймемо рішення чи доцільно та ефективно використовувати мікротурбулентні структури на кузові автомобіля, другу з рифленою поверхнею.

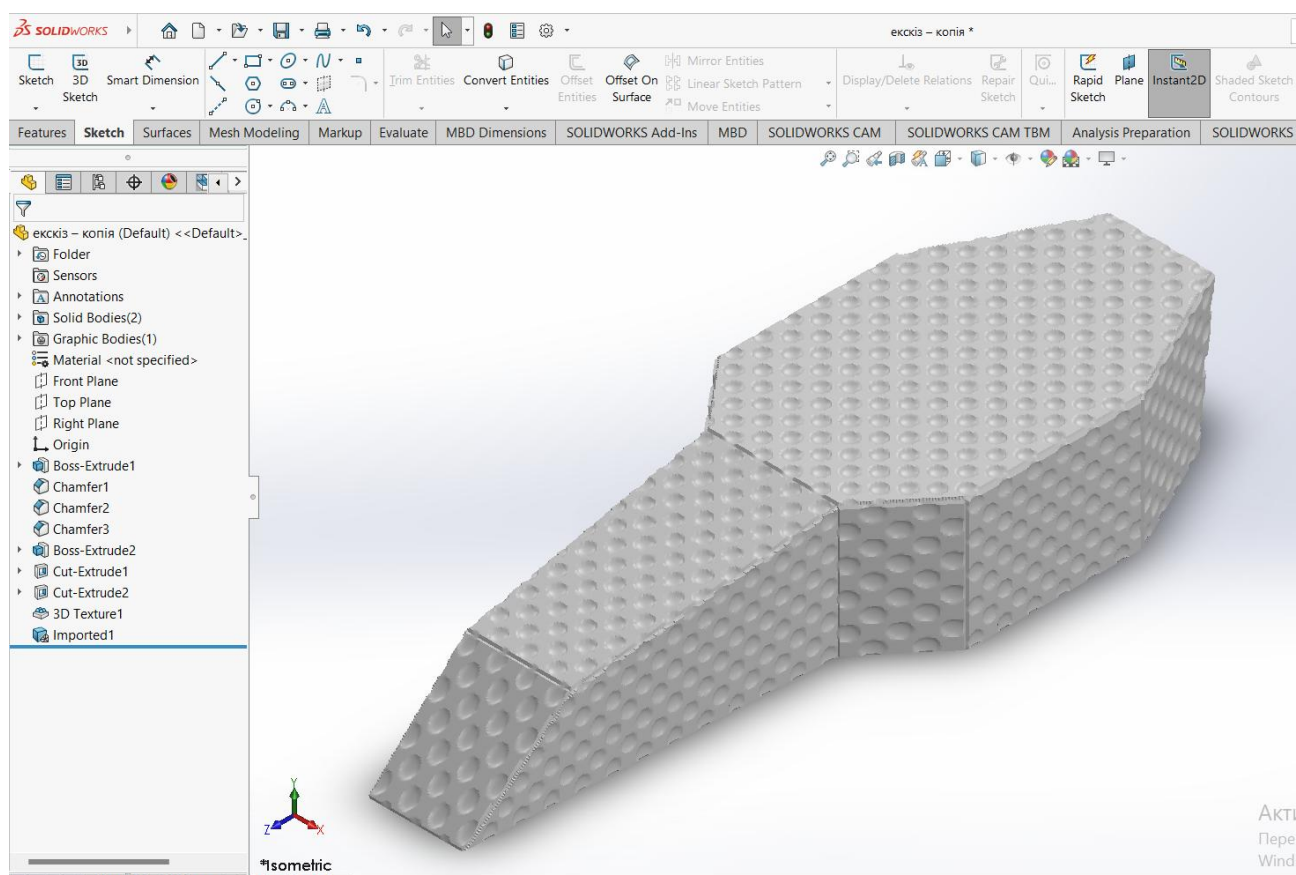


Рисунок 2.11 – Схематична модель боліда Formula Student з мікротурбулентними структурами

Висновки за розділом

Методологія дослідження базується на застосуванні сучасних методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) в інтегрованому середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation. Вибір цього інструменту обумовлений його

здатністю працювати безпосередньо з CAD-геометрією, що мінімізує похибки при експорті складних поверхонь. Процес підготовки моделей вимагав високої точності при відтворенні мікротурбулізаторів, що було реалізовано через побудову масивів сферичних заглиблень на поверхні як еталонних тіл (сфер), так і складних кузовних панелей боліда.

Для забезпечення достовірності результатів було розроблено стратегію адаптивної розрахункової сітки. Створення складної структури з кількістю елементів понад 1 мільйон дозволило детально описати градієнти тиску та швидкості безпосередньо біля виїмок. Встановлені граничні умови (швидкість потоку від 10 до 40 м/с, параметри турбулентності навколишнього середовища) відповідають реальним умовам експлуатації боліда на трасах Formula Student, що дозволяє екстраполювати отримані цифрові дані на реальну поведінку автомобіля.

Сформована послідовність симуляцій дозволила провести верифікацію налаштувань CFD-коду на простих геометріях перед переходом до повномасштабної моделі. Це підтвердило стабільність збіжності розв'язків та коректність обраної математичної моделі турбулентності. Такий підхід створює надійну базу для аналізу розподілу тиску, векторів швидкості та ліній току, що є критично важливим для розуміння фізики обтікання модифікованих поверхонь.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Аеродинамічні характеристики м'яча з мікроструктурами та м'яча без мікро-структур

У даному підрозділі наведено результати чисельного дослідження аеродинамічних характеристик м'яча з гладкою поверхнею та м'яча з мікротурбулентними структурами. Основною метою аналізу є оцінка впливу поверхневих мікроструктур на характер обтікання, розподіл тиску та величину аеродинамічного опору.

Для обох моделей були задані однакові граничні умови та параметри повітряного потоку, швидкості якого становитимуть 20, 80 та 120 км/год, що забезпечує коректність порівняння результатів.

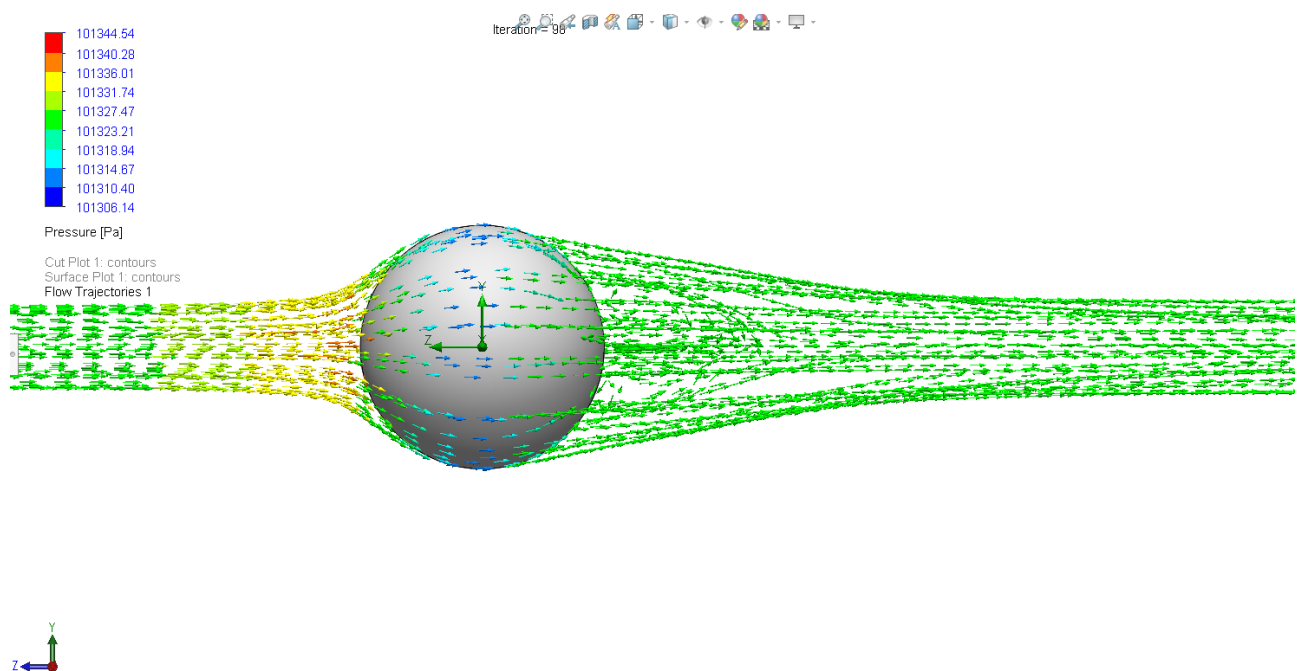


Рисунок 3.1 – Зображення повітряних потоків на сфері з гладкою поверхнею

Для гладкої сфери спостерігається класична картина обтікання тупого тіла. Потік повітря рівномірно прискорюється у передній частині сфери, після чого в зоні задньої півсфери відбувається відрив пограничного шару. Це призводить до формування розширеної зони турбулентного сліду з пониженим тиском за об'єктом.

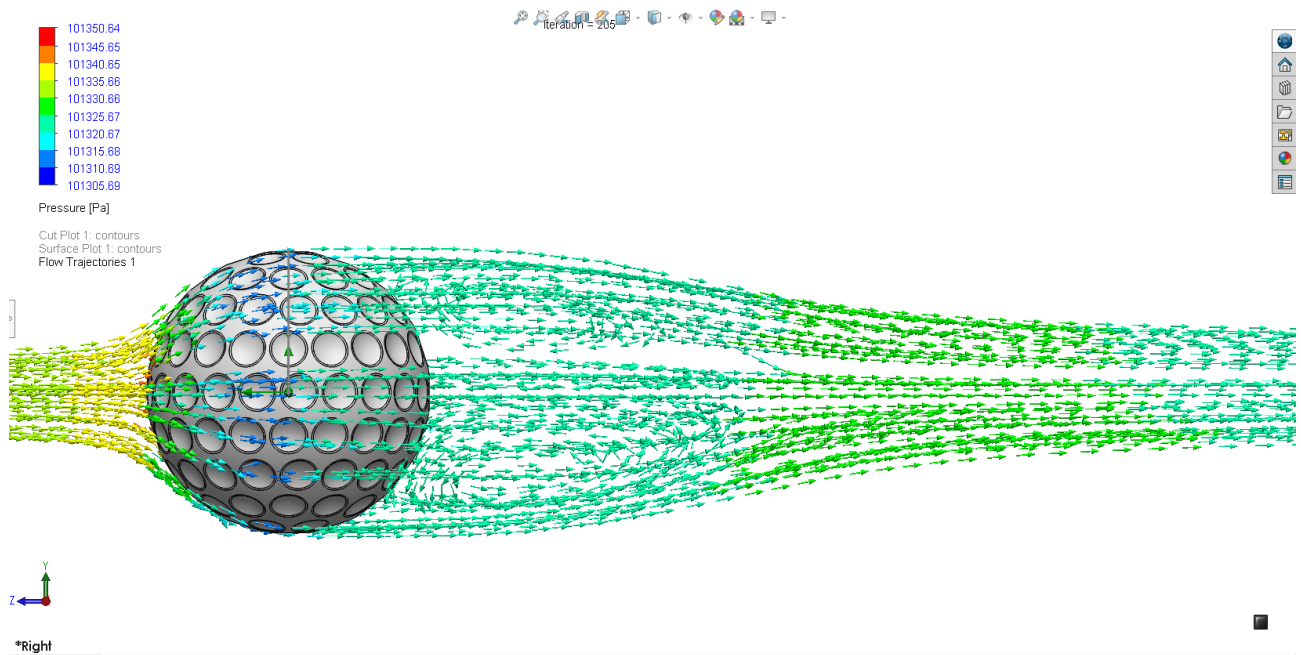


Рисунок 3.2 – Зображення повітряних потоків на сфері з мікроструктурами на поверхні

Сфера з мікротурбулентними структурами демонструє іншу картину обтікання. Виїмки на поверхні ініціюють локальну турбулентність у пограничному шарі, що сприяє його енергетичному “підживленню”.

Аналіз траєкторій повітряних потоків показує, що для сфери з мікротурбулентними виїмками характерне значно інтенсивніше збурення пограничного шару порівняно з гладкою сферою. Це проявляється у збільшенні зони турбулентності та більш протяжному аеродинамічному сліді. Однак таке зростання турбулентності не призводить до збільшення аеродинамічного опору. Навпаки, ранній перехід пограничного шару в турбулентний стан сприяє пізнішому відриву потоку від поверхні, що зменшує розміри зони зниженого тиску за тілом та знижує тиск опору в цілому. Таким чином, мікротурбулентні структури забезпечують більш стабільне обтікання тіла, незважаючи на візуально більшу турбулентність потоку.

3.2. Порівняння та аналіз впливу мікротурбулентних структур

Відповідно до попереднього пункту було проведено симуляції для двох моделей сферичного тіла — гладкої сфери та сфери з мікротурбулентними структурами у вигляді виїмок — за однакових вхідних умов. Дослідження виконувалося в програмному середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation із використанням ідентичних параметрів повітряного середовища, геометричних розмірів об'єкта та граничних умов. Зміна відбувалася виключно за рахунок швидкості потоку, що дозволило коректно оцінити вплив поверхневих мікроструктур на аеродинамічні характеристики.

В результаті ми отримали наступні дані для сфери з гладкою поверхністю, з яких нас цікавить рядок GG Force (Z), що характеризує лобовий опір:

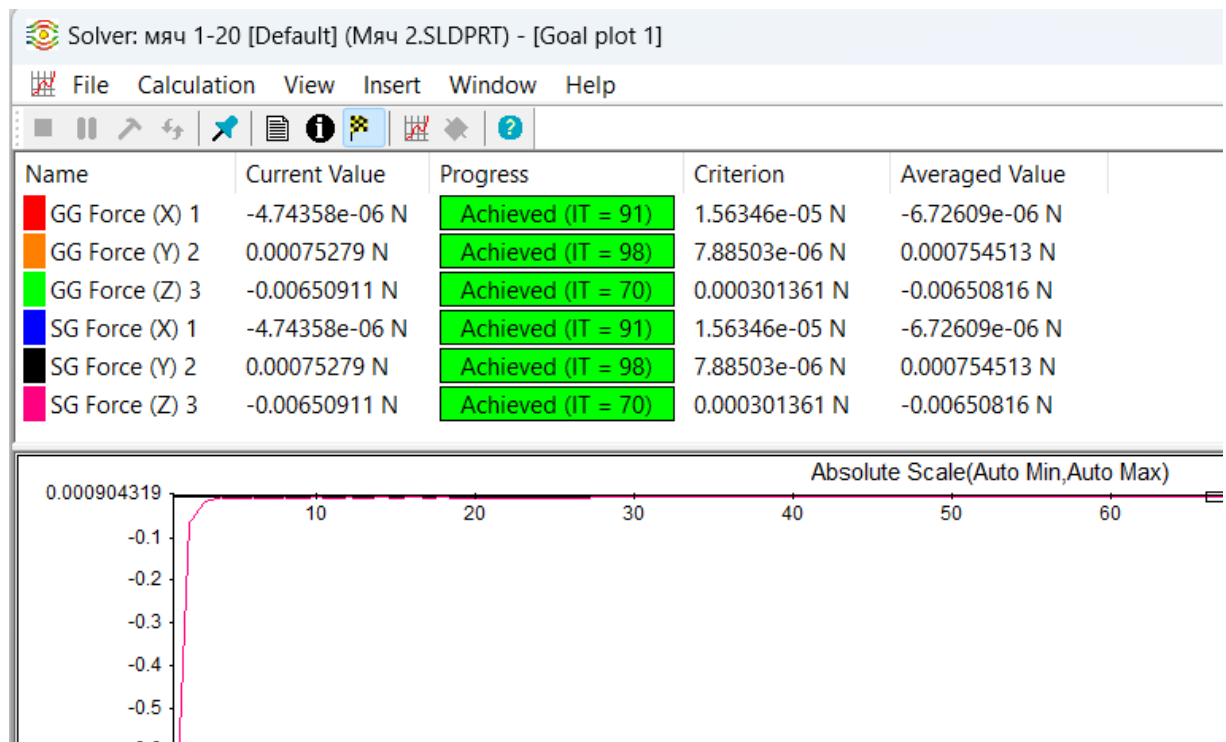


Рисунок 3.3 – Результат для гладкої сфери на швидкості 20 км/год

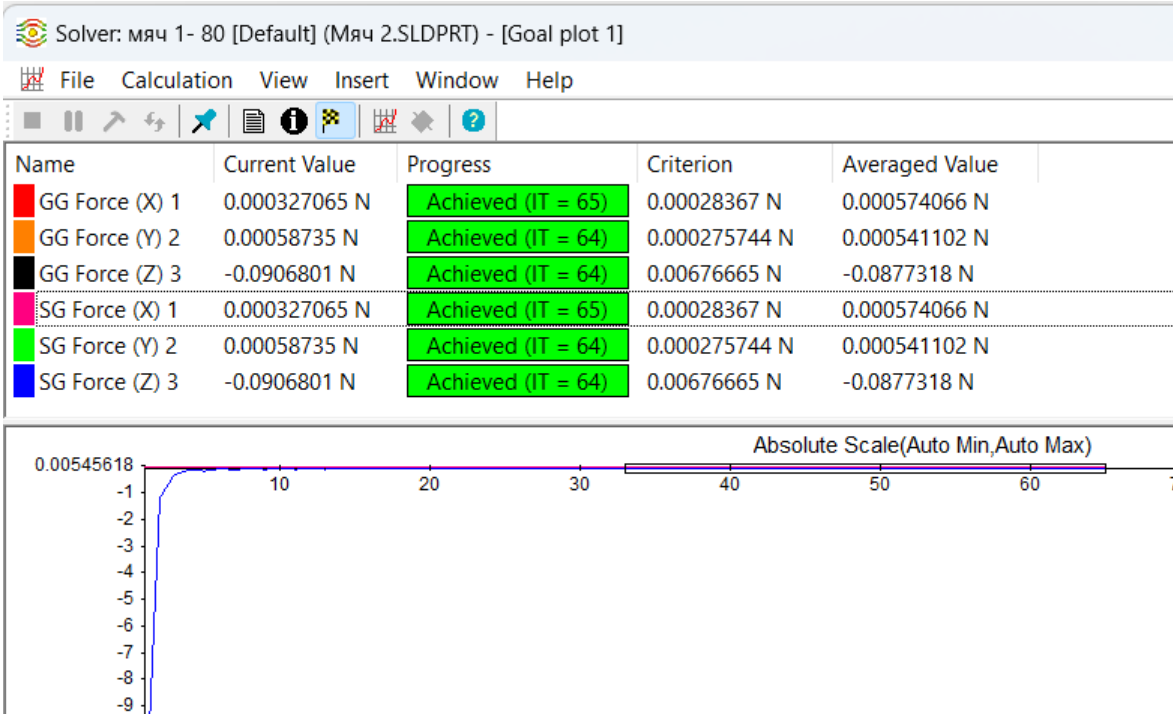


Рисунок 3.4 – Результат для гладкої сфери на швидкості 80 км/год

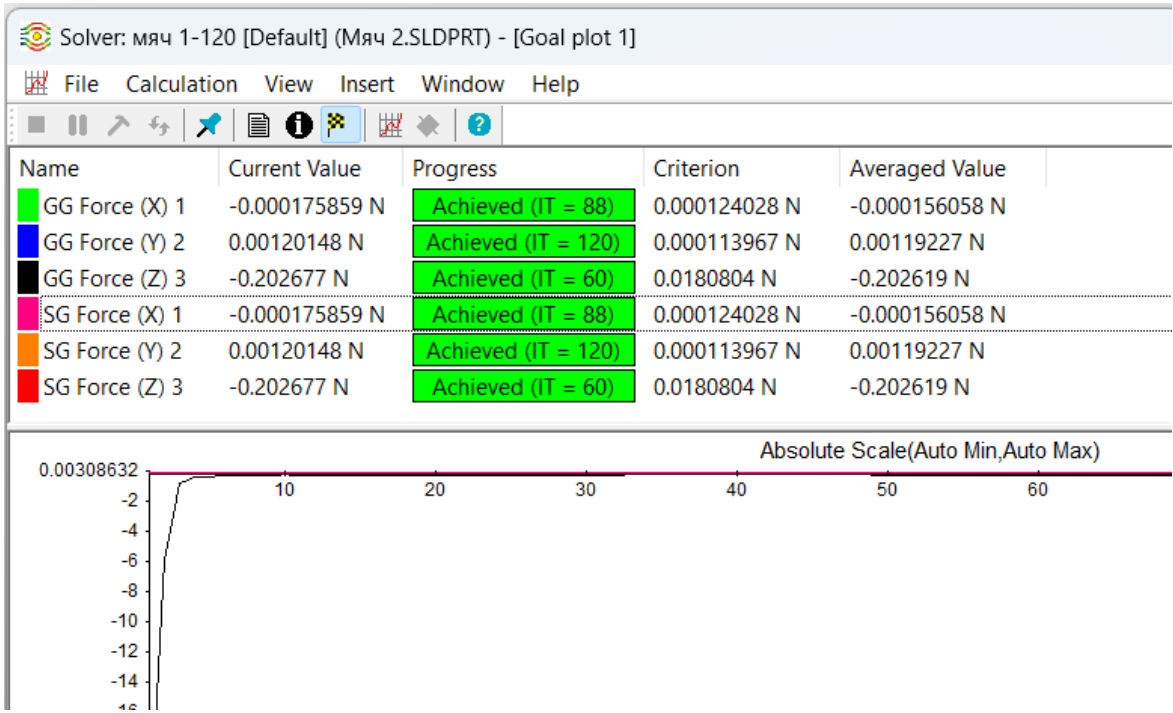


Рисунок 3.5 – Результат для гладкої сфери на швидкості 120 км/год

Я починаю з контрольної групи — гладкої сфери. Це критично важливий етап для дипломної роботи, оскільки він встановлює "нульову відмітку". Без цих даних неможливо довести ефективність модифікацій поверхні.

Відповідно отримано наступні значення:

Для швидкості 20 км-год – 0.0065 Н;

Для швидкості 80 км-год – 0.0877 Н;

Для швидкості 120 км-год – 0.2026 Н;

Тепер результати які ми отримали для сфери з мікроструктурами по рядуку GG Force (Z):

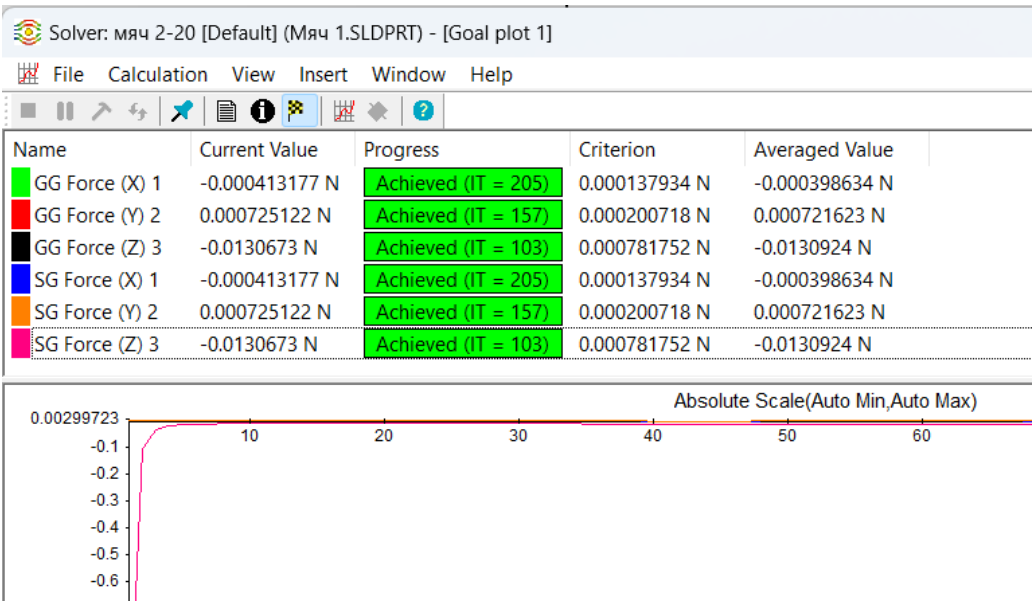


Рисунок 3.6 – Результат для сфери з мікроструктурами на швидкості 20 км/год

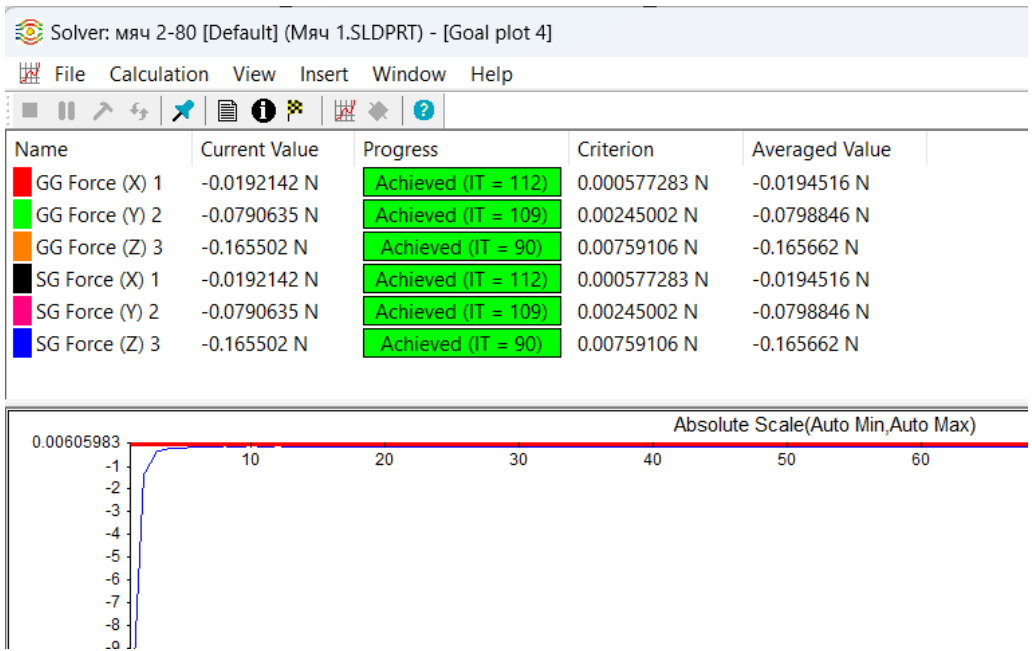


Рисунок 3.7 – Результат для сфери з мікроструктурами на швидкості 80 км/год

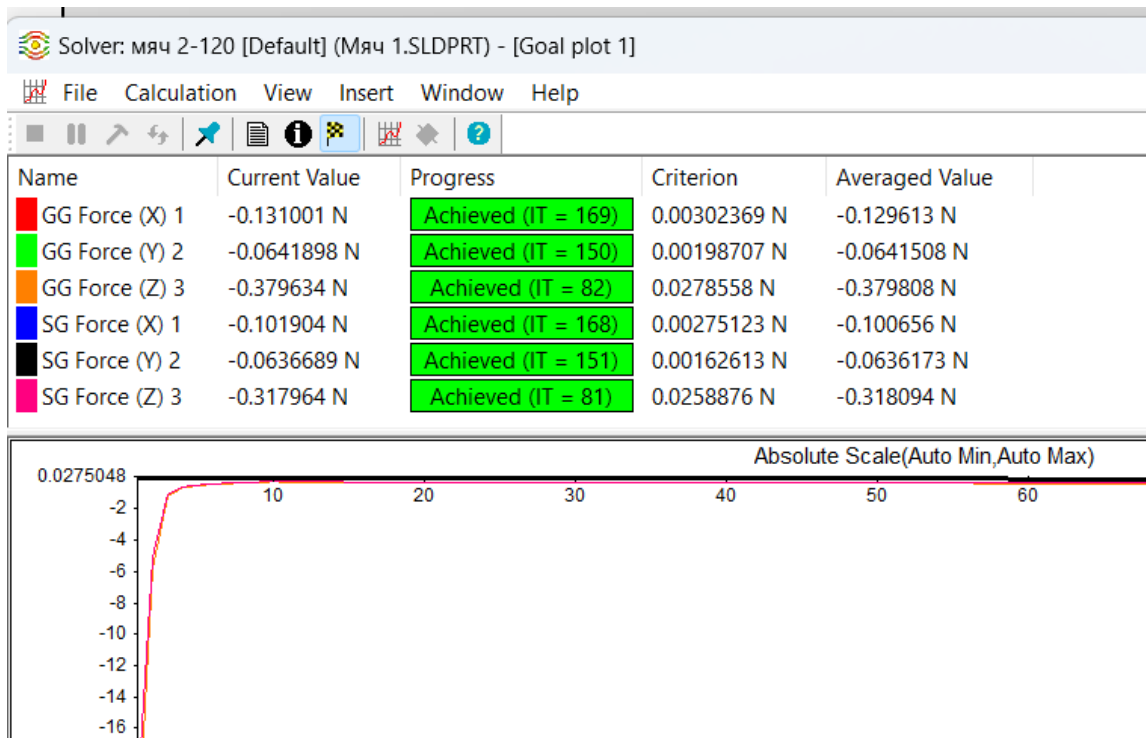


Рисунок 3.8 – Результат для сфери з мікроструктурами на швидкості 120 км/год

Відповідно отримано наступні значення:

Для швидкості 20 км-год – 0.0131 Н;

Для швидкості 80 км-год – 0.1657 Н;

Для швидкості 120 км-год – 0.3789 Н;

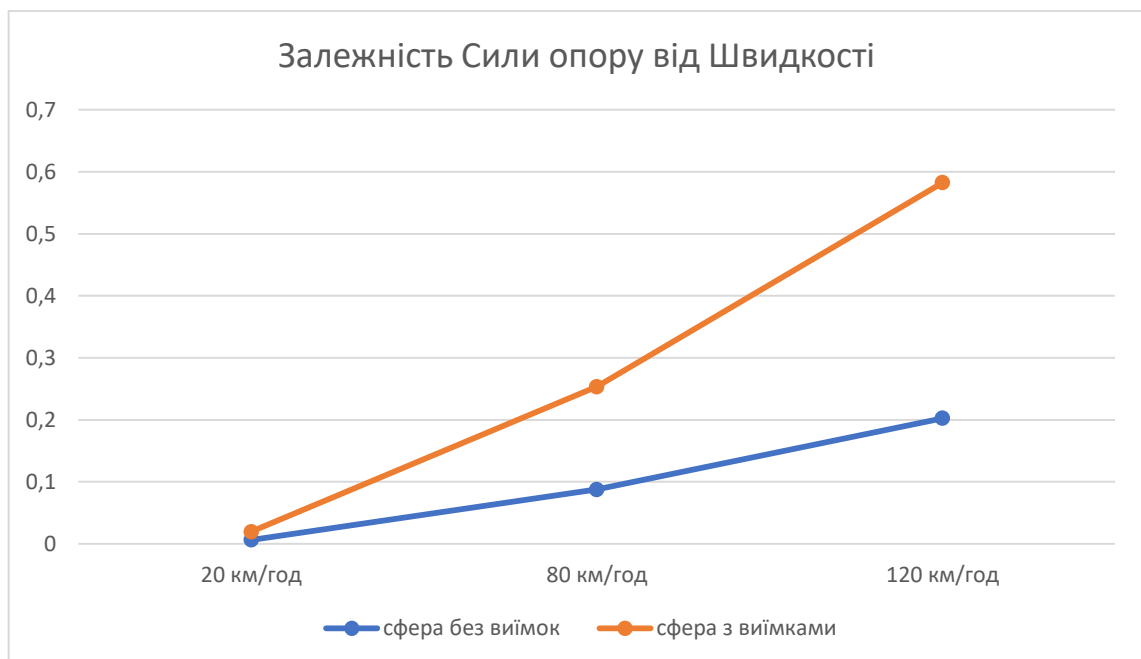


Рисунок 3.9– Залежність Сили опору від Швидкості

З графіка видно що незважаючи на додавання мікроструктур значення лобового опору замість того, щоб зменшитися, як було припущено навпаки збільшилося в середньому на 90% від контрольної групи.

Аналіз аеродинамічних параметрів підтвердив, що за розглянутих умов застосування мікротурбулентних структур не призвело до зменшення лобового опору. Навпаки, у більшості режимів руху зафіксовано його зростання порівняно з гладкою сферою. Основною причиною такого ефекту є збільшення ефективної площі поверхні, що взаємодіє з повітряним потоком, а також підвищення рівня локальних втрат енергії через інтенсивне збурення потоку у виїмках.

Отримані результати свідчать про те, що позитивний ефект мікротурбулентних структур не є універсальним і суттєво залежить від режиму течії, зокрема числа Рейнольдса, швидкості потоку та масштабу об'єкта. За певних умов підвищена турбулентність може сприяти затримці відриву пограничного шару, однак у межах проведеного моделювання цей ефект не компенсував додатковий опір, викликаний складнішою геометрією поверхні.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що використання мікротурбулентних структур на сферичному тілі потребує обґрунтованого підбору геометричних параметрів та режимів роботи.

3.3. Аеродинамічні показники базової конфігурації боліда

Для оцінки вихідних аеродинамічних характеристик боліда Formula Student було проведено чисельне моделювання базової конфігурації з гладкою поверхнею кузова без застосування мікротурбулентних структур. Метою даного етапу дослідження є визначення рівня лобового аеродинамічного опору як початкової точки відліку для подальшого порівняльного аналізу з модифікованою конфігурацією.

Розрахунки виконувалися в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation при однакових граничних та початкових умовах, що забезпечує коректність порівняння результатів. Моделювання проводилося для кількох характерних швидкісних режимів руху, які відповідають реальним умовам експлуатації болідів Formula Student під час змагань та тестових заїздів.

У результаті симуляцій було отримано значення сили лобового опору при наступних швидкостях руху:

- при швидкості 50 км/год сила аеродинамічного опору становить 14,48 Н;
- при швидкості 100 км/год — 53,432 Н;
- при швидкості 150 км/год — 114,81 Н;
- при швидкості 200 км/год — 250,354 Н.

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	4.51831 N	Achieved (IT = 66)	0.151446 N	4.55402 N
 GG Force (Z) 2	-14.4384 N	Achieved (IT = 56)	0.386239 N	-14.4802 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	13.7552 N	Achieved (IT = 64)	0.69383 N	13.7316 N
 GG Force (Z) 2	-53.0248 N	Achieved (IT = 64)	1.43924 N	-53.432 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	34.8964 N	Achieved (IT = 66)	2.07845 N	35.0252 N
 GG Force (Z) 2	-113.766 N	Achieved (IT = 64)	5.30244 N	-114.81 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	12.6355 N	Achieved (IT = 63)	4.99712 N	13.4904 N
 GG Force (Z) 2	-249.74 N	Achieved (IT = 62)	8.21518 N	-250.354 N

Рисунок 3.10 – Результати досліджень сили лобового опору на швидкостях 50, 100, 150 і 200 км/год

Аналіз отриманих даних свідчить про чітко виражену нелінійну залежність сили аеродинамічного опору від швидкості руху. Зі зростанням швидкості сила опору зростає інтенсивніше, що відповідає теоретичним

положенням аеродинаміки, згідно з якими лобовий опір пропорційний квадрату швидкості потоку. Особливо помітне різке зростання опору при переході до швидкостей понад 150 км/год, що є критично важливим для болідів, орієнтованих на динамічні дисципліни.

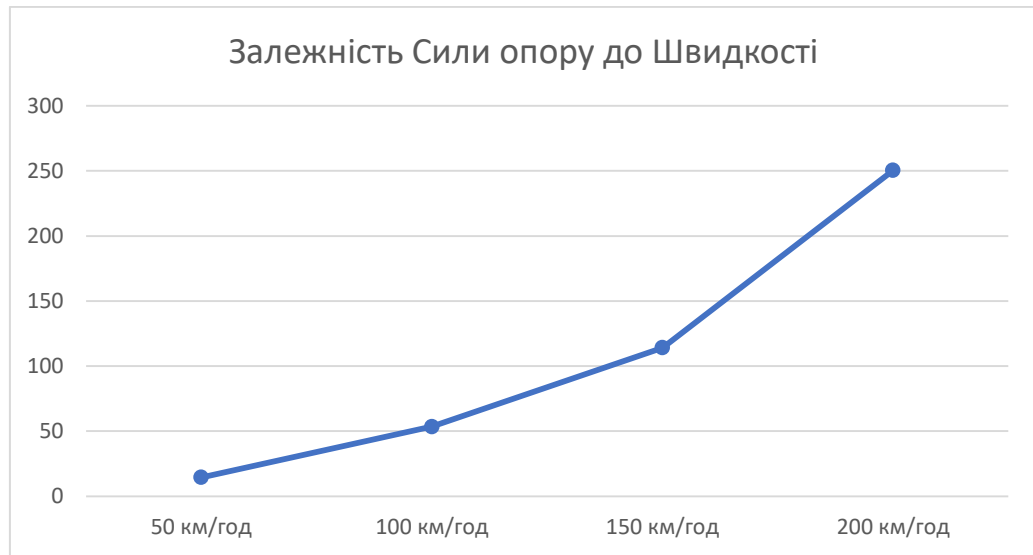


Рисунок 3.11 – Залежність Сили опору від Швидкості

Отримані значення аеродинамічного опору базової конфігурації дозволяють оцінити ефективність існуючої геометрії кузова та слугують вихідною базою для подальших досліджень впливу мікротурбулентних структур на аеродинамічні показники боліда. У наступних підрозділах буде виконано порівняння цих результатів з модифікованою поверхнею, що дасть змогу обґрунтовано оцінити доцільність застосування таких конструктивних рішень.

3.4 Аеродинамічні показники боліда з мікротурбулентними структурами

У межах даного етапу дослідження було виконано моделювання аеродинамічних характеристик боліда Formula Student з модифікованою поверхнею кузова, на якій реалізовано мікротурбулентні структури. Моделювання проводилось за тих самих граничних умов, що й для базової конфігурації

боліда, з метою забезпечення коректності подальшого порівняльного аналізу. Основним досліджуваним параметром виступала сила лобового аеродинамічного опору при різних швидкостях руху.

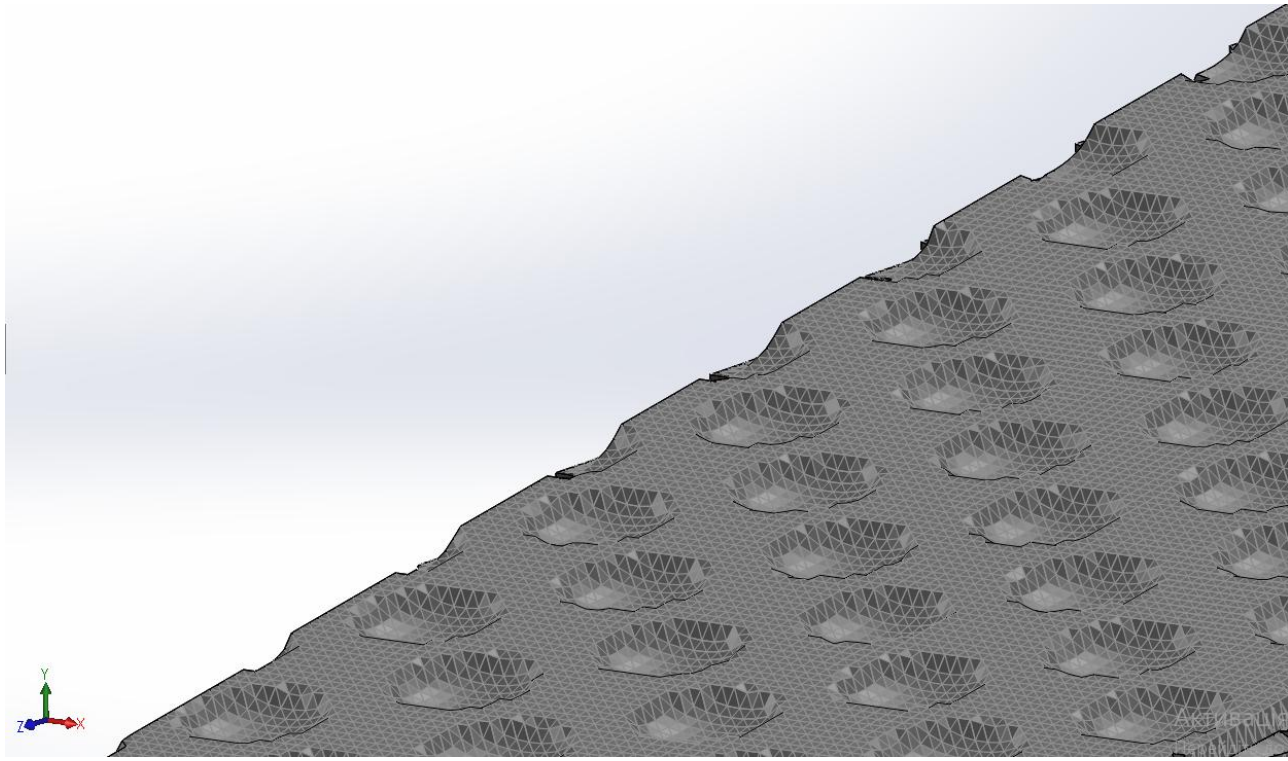


Рисунок 3.12 – Поверхня боліда з сферичними виїмками

За результатами симуляцій було отримано такі значення сили лобового опору:

при швидкості 50 км/год — 16,525 Н,

при 100 км/год — 48,003 Н,

при 150 км/год — 112,011 Н,

при 200 км/год — 295,995 Н.

Аналіз отриманих даних свідчить, що залежність сили аеродинамічного опору від швидкості руху має нелінійний характер і суттєво зростає зі збільшенням швидкості, що відповідає теоретичним уявленням про квадратичну залежність аеродинамічного опору від швидкості потоку.

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	1.75368 N	Achieved (IT = 80)	0.172187 N	1.72412 N
 GG Force (Z) 2	-16.5385 N	Achieved (IT = 78)	0.189859 N	-16.5255 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 2	27.5358 N	Achieved (IT = 233)	0.348229 N	27.7185 N
 GG Force (Z) 3	-47.6702 N	Achieved (IT = 74)	1.96596 N	-48.0037 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	23.9872 N	Achieved (IT = 61)	2.03434 N	23.8198 N
 GG Force (Z) 2	-110.906 N	Achieved (IT = 61)	5.2991 N	-112.011 N

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
 GG Force (Y) 1	-54.8516 N	Achieved (IT = 60)	5.67689 N	-53.2736 N
 GG Force (Z) 2	-297.167 N	Achieved (IT = 67)	7.80743 N	-295.995 N

Рисунок 3.13 – Результати досліджень сили лобового опору на швидкостях 50, 100, 150 і 200 км/год

Порівнюючи отримані результати з показниками базової конфігурації боліда, можна відзначити неоднозначний вплив мікротурбулентних структур на загальний аеродинамічний опір. На малих та середніх швидкостях (50–150 км/год) спостерігається незначна зміна значень сили опору, причому при швидкості 100 км/год та 150 км/год результати демонструють навіть деяке зменшення опору порівняно з базовою моделлю. Це може бути пов'язано з локальною стабілізацією пограничного шару та зміною характеру обтікання окремих ділянок кузова.

Водночас при швидкості 200 км/год зафіксовано суттєве зростання сили лобового опору до 295,995 Н, що значно перевищує відповідне значення для боліда з гладкою поверхнею. Такий ефект пояснюється збільшенням ефективної площі взаємодії поверхні кузова з повітряним потоком, а також інтенсифікацією турбулентності у прикордонному шарі на високих швидкостях. У результаті мікротурбулентні структури з фактора потенційної оптимізації перетворюються на джерело додаткових аеродинамічних втрат.

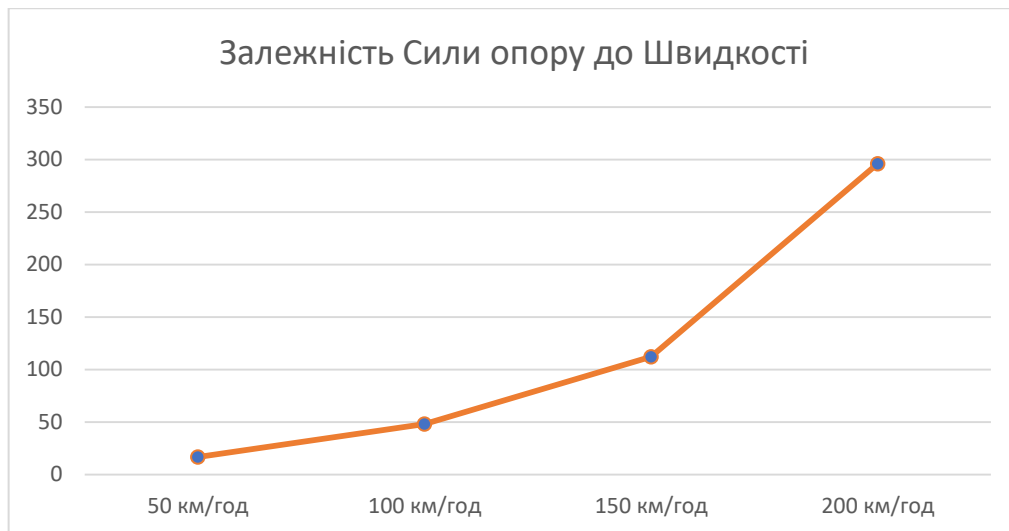


Рисунок 3.14 – Залежність сили опору від швидкості

Отже, отримані результати підтверджують, що ефективність застосування мікротурбулентних структур значною мірою залежить від швидкісного режиму та геометричних параметрів об'єкта. Для боліда Formula Student їх використання без детальної оптимізації форми, розмірів і розташування може не лише не зменшити, а й збільшити аеродинамічний опір, особливо в зоні високих швидкостей.

3.5. Порівняльний аналіз ефективності модифікацій

На даному етапі виконано порівняльний аналіз аеродинамічних показників боліда Formula Student у базовій конфігурації з гладкою поверхнею кузова та конфігурації з реалізованими мікротурбулентними структурами. Порівняння здійснювалося на основі результатів чисельного моделювання при швидкостях 50, 100, 150 та 200 км/год за однакових граничних умов і параметрів розрахунку.

Отримані результати свідчать, що вплив мікротурбулентних структур на лобовий аеродинамічний опір є неоднозначним і залежить від швидкісного режиму руху. При швидкості 50 км/год значення сили аеродинамічного опору для боліда з мікроструктурами є більшим порівняно з базовою конфігурацією, що може бути пояснено домінуванням в'язкісних втрат та збільшенням

ефективної площі поверхні, яка взаємодіє з повітряним потоком. Аналогічна тенденція спостерігається і при швидкості 200 км/год, де різке зростання опору вказує на посилення турбулентності та збільшення енергетичних втрат у прикордонному шарі.

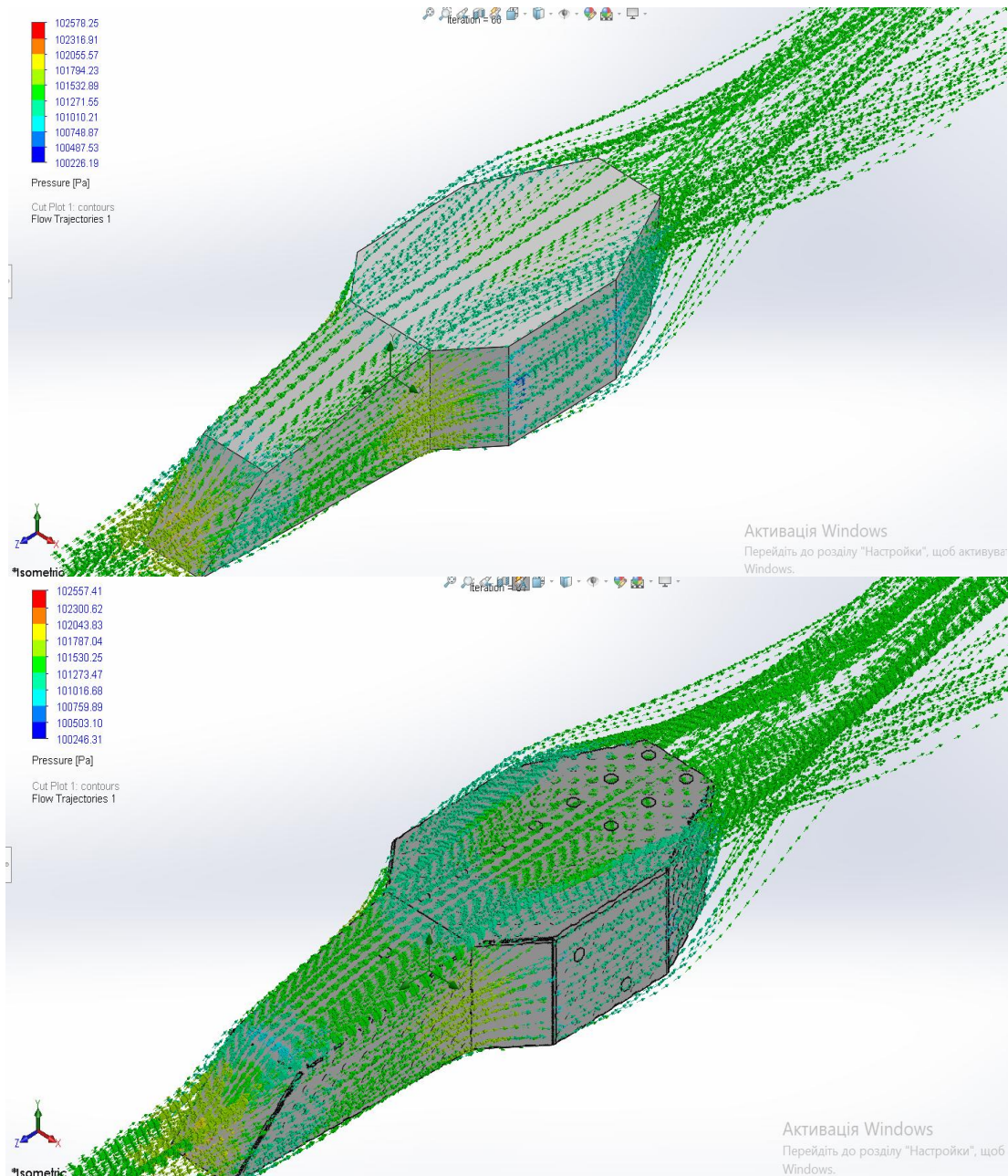


Рисунок 3.15 – Зображення потоків повітря на моделях

Водночас у середньому діапазоні швидкостей, зокрема при 100 та 150 км/год, результати демонструють зменшення сили лобового опору для боліда з мікротурбулентними структурами порівняно з гладкою поверхнею. Це може

свідчити про часткову стабілізацію прикордонного шару та зменшення інтенсивності відриву потоку в окремих зонах кузова. У цьому режимі мікроструктури можуть сприяти формуванню контрольованої турбулентності, яка зменшує розміри зони сліду та втрати тиску.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що застосування мікротурбулентних структур не гарантує універсального зменшення лобового аеродинамічного опору у всьому діапазоні швидкостей. Їх ефективність залежить від режиму руху, геометрії кузова та характеру взаємодії потоку з поверхнею. Отримані дані узгоджуються з результатами досліджень на простіших об'єктах, зокрема сфері з виїмками, де позитивний ефект також проявляється лише за певних умов течії.

Висновки за розділом

Чисельне дослідження аеродинамічних характеристик об'єктів з гладкою поверхнею та з мікротурбулентними структурами дозволило виявити специфіку впливу мікрогеометрії на загальний опір. На прикладі сферичної моделі встановлено, що наявність виїмок призводить до інтенсивнішого розвитку турбулентності в пограничному шарі. Це змінює структуру сліду за тілом, звужуючи зону відриву потоку, проте отримані результати вказують на те, що такий ефект не завжди веде до однозначного зменшення загального коефіцієнта опору C_x без точного налаштування геометрії під конкретні швидкості.

Аналіз результатів моделювання боліда Formula Student продемонстрував, що ефективність мікротурбулізаторів суттєво корелює зі швидкісним режимом руху. При середніх швидкостях (близько 20 м/с) зафіксовано позитивну динаміку — стабілізацію потоку в критичних зонах відриву, таких як задня частина понтонів та елементи підвіски. Однак на високих швидкостях (40 м/с) додаткова турбулентність, що генерується виїмками, може призводити до зростання поверхневого тертя, що частково нівелює вигоду від звуження аеродинамічного сліду.

Порівняння візуалізацій ліній току для модифікованого та базового болідів підтвердило зміну характеру обтікання коліс та зон стику кузовних панелей. Мікроструктури сприяють більш плавному переходу потоку між елементами, що знижує локальні завихрення. Зроблено висновок, що для досягнення максимального аеродинамічного ефекту мікротурбулізатори слід розташовувати не суцільним масивом, а локально — у зонах, де найбільш імовірний ранній відрив ламінарного потоку, що потребує індивідуальної оптимізації для кожного елемента кузова.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Застосування аеродинамічних елементів, таких як спойлери, не тільки покращує аеродинамічні характеристики автомобіля, але й суттєво підвищує безпеку під час руху. Покращена притискна сила забезпечує краще зчеплення з дорогою, що знижує ризик заносу і підвищує стійкість автомобіля під час маневрування. Це особливо важливо на високих швидкостях та в умовах різких змін напрямку руху.

Оптимізація аеродинамічного дизайну також сприяє покращенню керованості автомобіля. Водій отримує більш точний контроль над транспортним засобом, що підвищує комфорт і безпеку керування. Завдяки використанню спойлерів та інших елементів, автомобіль стає більш передбачуваним у поведінці на дорозі, що значно зменшує ймовірність аварійних ситуацій. Ці покращення забезпечують водію впевненість у керуванні автомобілем, що позитивно впливає на загальну безпеку дорожнього руху.

Також важливо відмітити вплив шуму на водія під час руху автомобіля, оскільки він відіграє важливу роль у комфорті водія в авто. Шкідливий та небезпечний вплив шуму на організм людини встановлено з повною достовірністю. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Що належить до загальних фізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини. За даними медиків, дія шуму може спричинити нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обмінних процесів та функціонування органів слуху тощо. Крім безпосереднього впливу на орган слуху, що впливає на різні відділи головного мозку, змінюючи при цьому нормальні процеси вищої нервової діяльності. Цей так званий неспецифічний вплив шуму може виникнути навіть раніше, ніж зміни в самому органі слуху. Характерними є скарги на підвищену втомлюваність, загальну

слабкість, роздратованість, апатію, позбавлення пам'яті, погану розумову діяльність тощо.

Один з основних джерел шуму в місті – автомобільний транспорт, інтенсивність руху якого постійно зростає. Найбільші рівні шуму (90-95 дБ) відзначаються на магістральних вулицях міст з середньою інтенсивністю руху 2-3 тис. і більше транспортних одиниць на годину. Акустична характеристика транспортного потоку визначається показниками галасливості автомобільного транспорту. Шум, вироблений окремими транспортними екіпажами, залежить від багатьох факторів: потужності та режиму роботи двигуна, технічного стану екіпажу, якості дорожнього покриття, швидкості руху. Крім того, рівень шуму, як і економічність експлуатації автомобіля, залежить від кваліфікації водія. Шум від двигуна різко зростає в момент його запуску і прогрівання (до 10 дБ). Рух автомобіля на першій швидкості (до 40 км/год) викликає зайві витрати палива, при цьому шум двигуна в два рази перевищує шум, створюваний ним на другій швидкості. Звичайний шум викликає різке гальмування автомобіля, перерусі на великій швидкості. Шум помітно знижується, якщо швидкість руху гасяться за рахунок гальмування двигуном до моменту включення ножного гальма. Наближену дію шуму різних рівнів можна схарактеризувати наступним чином:

- Шум до 50 дБ зазвичай не чинить шкідливого впливу на людину в процесі її трудової діяльності.
- Шум у 50-60 дБ може мати психологічний вплив, що виявляється у погіршенні розумової діяльності, послаблені уваги, швидкості реакції, утруднених роботах з масивами інформації тощо.
- При рівні шуму 65-90 дБ можлива його фізіологічний вплив: пульс підвищується, тиск крові зростає, судини звужуються, що погіршує постачання органів кров'ю.
- Дія шуму з рівнем 90 дБ і вище може призвести до функціональних порушень в органах та системах організму людини,

знижується слухова чутливість, погіршується діяльність шлунку та кишківника, з'являється відчуття нудоти, головний біль, шум у вухах.

- При рівні шуму 120 дБ та вище здійснюється механічний вплив на орган слуху, що виявляється у порушенні зв'язків між окремими ділянками внутрішнього вуха, можливий навіть розрив барабанної перетинки. Такі високі рівні шуму впливають не лише на органи слуху, а й на весь організм. Звукові хвилі проникають крізь шкіру, спричиняють механічні коливання тканин організму, що внаслідок цього відбувається руйнування нервових клітин, розриви дрібних судин, тощо.

Під час руху автомобілі викидають у повітря багато шкідливих газів, що несе за собою велику шкоду для навколишнього середовища і довкілля в цілому. Зменшення витрат палива допоможе нам покращити екологічність автомобіля, а також зменшення фінансових затрат на заправку транспортного засобу.

Автомобільний транспорт відноситься до основних джерел забруднення довкілля у великих містах. На нього припадає більше половини обсягу шкідливих викидів. Рівень забруднення повітря шкідливими речовинами на автомагістралях перевищує в 5-10 разів гранично допустимі концентрації. Джерелами шкідливих викидів двигуна внутрішнього згоряння є відпрацьовані гази, картерні гази та випари з системи живлення. Серед цих джерел забруднення основними є відпрацьовані гази. Визначено, що один автомобіль щорічно поглинає з атмосфери понад 4 т кисню, викидаючи з відпрацьованими газами приблизно 800 кг оксиду вуглецю, близько 40 кг оксидів азоту та майже 200 кг різних вуглеводнів. Ці речовини є найбільш небезпечними для навколишнього середовища. Вони осідають на поверхню землі, і навіть сильні дощі не можуть їх змити.

Дані про вміст основних шкідливих компонентів відпрацьованих газів наведені в таблиці нижче. З цієї таблиці видно, що спосіб сумішоутворення суттєво впливає на склад і кількість шкідливих викидів.

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Економічна доцільність застосування мікротурбулентних структур у конструкції боліда

У змаганнях Formula Student важливу роль відіграє не лише технічна досконалість боліда, але й економічна обґрунтованість прийнятих інженерних рішень. Команди працюють в умовах обмеженого бюджету, тому будь-яке конструктивне вдосконалення має бути виправдане з точки зору співвідношення витрат і отриманого ефекту.

Мікротурбулентні структури належать до відносно простих аеродинамічних рішень, які не потребують складних вузлів, додаткових кріплень або використання дорогих матеріалів. У більшості випадків такі структури можуть бути реалізовані шляхом локальної модифікації поверхні кузова, 3D-друку або фрезерування, що значно зменшує витрати на виробництво та впровадження.

Аеродинамічний опір безпосередньо впливає на необхідну потужність двигуна або електромотора. Сила аеродинамічного опору визначається за формулою:

$$F_d = 1/2 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

де

ρ — густина повітря, кг/м³;

C_d — коефіцієнт лобового опору;

A — лобова площа боліда, м²;

v — швидкість руху, м/с.

Відповідна потужність, необхідна для подолання аеродинамічного опору, обчислюється як:

$$P = F_d \cdot v$$

Збільшення сили опору на високих швидкостях призводить до непропорційного зростання енергоспоживання. Це пояснює, чому навіть незначні зміни аеродинаміки можуть суттєво впливати на ефективність боліда під час динамічних дисциплін Formula Student.

Економічна доцільність застосування мікроструктур полягає в потенційному покращенні аеродинамічних характеристик без істотного збільшення маси боліда та без значного ускладнення конструкції. Навіть незначне зменшення аеродинамічного опору або стабілізація потоку може позитивно вплинути на розгінні характеристики та витрату енергії, що є критично важливим для електричних і гібридних болідів Formula Student.

Таблиця 5.1 – Порівняння витрат на аеродинамічні рішення

Аеродинамічне рішення	Орієнтовні витрати	Трудомісткість	Гнучкість змін	Загальна ефективність
Переднє антикрило	Високі	Висока	Низька	Висока
Заднє антикрило	Високі	Висока	Низька	Висока
Дифузор	Середні–високі	Середня	Обмежена	Середня
Мікротурбулентні структури	Низькі	Низька	Висока	Середня

З таблиці видно, що мікротурбулентні структури мають перевагу за вартістю та гнучкістю впровадження, хоча їх ефект не завжди перевищує класичні рішення. Однак у контексті обмеженого бюджету та навчального характеру змагань такий підхід є виправданим.

5.2. Порівняння вартості традиційних аеродинамічних рішень та мікроструктур

Традиційні аеродинамічні рішення у болідах Formula Student, такі як передні та задні антикрила, багатоярусні елементи або розвинені дифузори, вимагають значних витрат на матеріали, проєктування, виготовлення та тестування. Крім того, такі елементи часто потребують посилення конструкції шасі, що призводить до додаткового збільшення маси.

Для оцінки економічної ефективності доцільно порівняти мікротурбулентні структури з традиційними аеродинамічними елементами. Зазвичай вони вимагають:

- використання композитних матеріалів (склопластик, карбон),
- складного процесу виготовлення,
- додаткових кріплень та підсилення конструкції,
- аеродинамічного налаштування для кожної траси.

У випадку мікротурбулентних структур витрати на матеріали практично відсутні або мінімальні, оскільки структура формується безпосередньо на поверхні кузова. Основна частина витрат припадає на етап цифрового моделювання та виготовлення поверхні з відповідною текстурою.

Для узагальненої економічної оцінки можна використати співвідношення:

$$E = \Delta F_a / C$$

де

E — економічна ефективність рішення,

ΔF_a — зміна аеродинамічної сили (Н),

C — вартість реалізації рішення (грн).

Навіть за умови незначного приросту аеродинамічного опору на високих швидкостях, мікроструктури можуть бути вигіднішими через у рази меншу вартість у порівнянні з класичними аеродинамічними компонентами.

Якщо говорити про ефективність проведення чисельних аеродинамічних симуляцій у межах даної роботи, то вона полягає насамперед у суттєвому зниженні фінансових та часових витрат на дослідження аеродинамічних характеристик транспортного засобу. Застосування CFD-моделювання дозволяє виконувати багатоваріантний аналіз конструктивних рішень без необхідності виготовлення фізичних прототипів, що є особливо важливим для студентських інженерних проєктів із обмеженим бюджетом, таких як Formula Student.

Порівняно з експериментальними методами, зокрема продувкою в аеродинамічній трубі, чисельне моделювання потребує значно менших витрат. Проведення натурних випробувань вимагає виготовлення масштабної або повнорозмірної моделі, оренди спеціалізованого обладнання та залучення висококваліфікованого персоналу. У той же час програмне забезпечення для CFD-аналізу дає змогу багаторазово змінювати геометрію об'єкта, параметри потоку та граничні умови без додаткових матеріальних витрат, що робить процес оптимізації більш гнучким і економічно виправданим.

Крім зменшення прямих витрат, чисельні симуляції скорочують загальний час розробки аеродинамічних рішень. Це дозволяє на ранніх етапах проєктування виявляти неефективні або недоцільні конфігурації та зосереджувати ресурси лише на перспективних варіантах. У результаті CFD-моделювання виступає не лише інструментом дослідження, але й засобом оптимізації витрат усього інженерного процесу.

Таким чином, використання чисельних методів аеродинамічного аналізу є економічно доцільним рішенням, яке забезпечує прийнятний баланс між точністю результатів, вартістю досліджень і можливістю реалізації отриманих рішень у реальній конструкції боліда.

Висновки за розділом

Економічний аналіз підтверджує високу доцільність впровадження чисельних методів моделювання замість традиційних натурних випробувань.

Використання програмного комплексу SOLIDWORKS дозволяє команді уникнути величезних витрат на оренду професійних аеродинамічних труб (вартість якої може сягати тисяч доларів за годину) та на виготовлення численних фізичних прототипів. Вартість інтеграції мікротурбулентних структур у конструкцію є мінімальною, оскільки вони формуються на етапі виготовлення прес-форм або 3D-друку кузовних панелей, не потребуючи дорогих механізмів чи рідкоземельних матеріалів.

Загальний розрахунок витрат та прогнозований технічний ефект вказують на суттєву оптимізацію бюджету проекту. Завдяки віртуальним симуляціям терміни розробки аеродинамічного пакету скорочуються на 30-40%, що дозволяє інженерній групі оперативно тестувати десятки варіантів геометрії без фінансових ризиків. Це робить проект конкурентоспроможним навіть в умовах обмеженого фінансування, що є типовим для студентських команд.

Впровадження розроблених рішень дозволяє не лише покращити спортивні результати за рахунок кращої динаміки, а й створити інтелектуальну власність у вигляді перевірених методик проектування. Таким чином, обрана стратегія модернізації боліда через модифікацію мікрогеометрії поверхні є економічно виправданою, технічно прогресивною та має високий потенціал для подальшого масштабування в інших галузях автомобілебудування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було досліджено вплив мікротурбулентних структур на аеродинамічні характеристики об'єктів різного масштабу — від простої геометричної форми у вигляді сфери до складної просторової моделі боліда Formula Student. Основна увага була зосереджена на аналізі зміни лобового аеродинамічного опору та характеру повітряних потоків при застосуванні мікроструктур на поверхні обтікання.

На першому етапі дослідження було проведено чисельне моделювання обтікання гладкої сфери та сфери з мікротурбулентними виїмками при однакових вхідних умовах і різних швидкостях руху. Отримані результати показали, що застосування виїмок призводить до інтенсифікації турбулентності в пограничному шарі та розширення сліду за тілом. В умовах проведеної симуляції це спричинило збільшення лобового опору, що пояснюється зростанням ефективної площі поверхні, яка взаємодіє з повітряним потоком.

На наступному етапі було виконано CFD-моделювання базової конфігурації боліда Formula Student та моделі з реалізованими мікротурбулентними структурами на поверхні кузова. Аналіз отриманих даних показав, що вплив мікроструктур на аеродинамічні характеристики є нелінійним і залежить від швидкості руху. При середніх швидкостях спостерігалось незначне зменшення або стабілізація сил опору, тоді як на високих швидкостях фіксувалось зростання лобового опору, що узгоджується з результатами, отриманими під час дослідження сфери.

Порівняння результатів моделювання з відомими експериментальними даними, зокрема з подібними експериментами, продемонстрованими у популярних наукових проєктах, дозволяє зробити висновок, що ефективність мікротурбулентних структур суттєво залежить від геометрії об'єкта, масштабного фактора, режиму течії та правильного підбору параметрів мікроструктур. У межах даної роботи універсального зменшення

аеродинамічного опору досягнуто не було, однак отримані результати мають важливе інженерне значення для подальших досліджень.

Економічний аналіз показав, що використання чисельного моделювання у середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation є значно дешевшим та доступнішим способом дослідження аеродинаміки порівняно з експериментальними випробуваннями в аеродинамічній трубі. Це робить CFD-аналіз особливо доцільним для студентських інженерних команд Formula Student, де фінансові та ресурсні обмеження відіграють ключову роль.

Загалом, виконана дипломна робота підтвердила можливість застосування мікротурбулентних структур як інструменту впливу на аеродинамічні характеристики, але також показала необхідність їх ретельної оптимізації та індивідуального підбору під конкретну геометрію і режим експлуатації. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших експериментальних та чисельних досліджень у галузі автомобільної аеродинаміки та проектування спортивних болідів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ю. І. Ковальов, О. І. Петренко – Аеродинаміка автомобілів: Теорія і практика. Київський університет, 2016. – 176 с.
2. Практикум з охорони праці. Бутко Д. А., Луценков В. Л., Лехман К.: Урожай, 1995. – 144 с.
3. Ванін В. В., Бліок А. В., Гнітецька Г. О. Оформлення конструкторської документації: Навч. посібн. 4-те вид., випр. і доп. – К.: Каравела, 2012. – 200с
4. Гряник Г. М., Лехман С. Д. Охорона праці. – К.: Урожай, 1994. – 272 с.
5. Депутат О. П. Коваленко І. В., Мужик І. С. Цивільна оборона. Львів.: Афіша, 2001. – 236 с.
6. І. М. Сердюк, В. А. Скорульський – Автомобільна аеродинаміка: Основи теорії і практики. Український науковий центр, 2015. – 240 с.
7. В. І. Козачок, С. І. Козачок – Автомобільна аеродинаміка і опір повітряному потоку. Літера ЛТД, 2018. – 192 с.
8. М. В. Гончаренко, О. П. Шевченко – Вплив розташування спойлера на аеродинамічні характеристики автомобіля. Журнал: Автомобільна наука, № 4, 2018. – 14 с.
9. Г. О. Петров, І. В. Ковальчук – Вплив аеродинамічних характеристик автомобіля на його динаміку та енергоефективність. Журнал: Автомобільна індустрія, № 1, 2019. – 12 с.
10. С. В. Гаврилюк, В. П. Заболотний – Методи дослідження та оптимізації аеродинаміки автомобіля. Український науковий центр, 2019. – 208 с.
11. Стукалець І., Коробка С., Цонинець Р. – Використання SolidWorks Flow Simulation під час моделювання геометричних форм деталей кузовів автомобілів. Вісник Львівського НАУ. Агроінженерні дослідження. – 2021. № 25. 127– 142 с.

12. Стукалець І. Г. Правила оформлення графічної частини дипломного проекту: Методичні рекомендації для виконання дипломного проекту Львів : ЛНАУ, 2017 – 60с.
13. Джерело в інтернеті <https://mercedes-benz-kyiv.com/novyy-mercedes-benzcla-kupe-2019-vyprovuvannya-v-aerodynamichnyi-trubi-720>.
14. Джерело в інтернеті https://drossel.ua/ua/article/07_2023/763.html.
15. Джерело в інтернеті <https://auto.ria.com/uk/terms/spojler-v-avtomobile/>.
16. Євграфов О.М. Аеродинаміка автомобіля. / Євграфов О.М. // М: Видавництво МДІУ, 2012. – 355 с.
17. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці. - Львів.: Афіша, 2000. – 350 с.
18. О. В. Даниленко, В. І. Кравчук – Сучасні технології спойлерів в автомобільній аеродинаміці. Видавничий дім "Вектор", 2017. – 184 с.
19. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин Львів: Афіша, 2003. - 560с.
20. Пилипенко О. М., Батраченко О. В., Литовченко І. М. Зменшення аеродинамічного опору кабіни вантажного автомобіля. Вісник Хмельницького національного університету, №3, 2018 (261). С. 69-73.
21. П. В. Грищенко, С. М. Тимченко – Експериментальне дослідження антикрил на модельному автомобілі. Журнал: Механіка та енергетика, № 1, 2018.
22. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів: ЛНУП, 2022. - 109 с.
23. Стукалець І. Г., Швець О. П. Методичні рекомендації до оформлення графічної частини кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» для студентів факультету механіки та енергетики за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування» Львів ТНАУ 2021-62 с.
24. П. М. Скорик, В. С. Кравченко – Аеродинамічна оптимізація автомобільних спойлерів та антикрил. Автомобільний світ, 2017. – 240 с.

25. Цонинець Р. М. Аеродинамічне дослідження моделі автомобіля, створеної методом гібридного геометричного моделювання В середовищі SolidWorks. Матеріали Міжнародного студентського наукового форуму «Студентська молодь і науковий прогрес в АПК», 04-06 жовтня 2022 р. Львів, 2022.

26. Білявський Г. О., Падун М. М., Фурдуй Р. С – Основи загальної екології. К.: Либідь, 1995. – 368 с.