

УДК 629.3.015.3

**В. П. Кужель, канд. техн. наук, доц.; А. Г. Буда, канд. техн. наук, доц.;
В. М. Павленко, канд. техн. наук, доц.; В. М. Павленко, канд. техн. наук, проф.**

ПОЄДНАННЯ ДИЗАЙНУ ТА АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЗОВНІШНІХ ФОРМ КУЗОВІВ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

Розглянуто найперспективніші види 3D-моделювання, які виявилися найпростішими та ефективними шляхами проєктування контурів. 3D-моделювання – це процес розробки математичного подання будь-якої тривимірної поверхні об'єкта за допомогою програмного забезпечення. Продуктом моделювання є 3D-модель (плавна тривимірна геометрична поверхня). Серед них особливу увагу привертають сплайнове (модель у вигляді сплайнів) та полігональне (модель створюється за допомогою полігонів).

Визначається вплив аеродинамічних факторів на зовнішні форми легкового автомобіля. Розглядаються сучасні підходи до оптимізації контурного фактора та елементи конструкцій автомобіля, що удосконалюють відповідні аеродинамічні форми і покращують належний рівень показників аеродинаміки.

Тривимірна комп'ютерна графіка, як і векторна, є об'єктно-орієнтованою, що дозволяє змінювати всі елементи тривимірної сцени, так і кожен об'єкт окремо. Цей вид комп'ютерної графіки має великі можливості для підтримки і створення технічних креслеників. За допомогою графічних редакторів тривимірної комп'ютерної графіки, наприклад Autodesk 3D Studio, можна виконувати наочні зображення об'єктів, деталей, виробів, що мають відношення до машинобудування та автомобілебудування.

З'явилися вбудована підтримка крапельно-сітчастих об'єктів, повноцінна мережева візуалізація, импорт даних із CAD-додатків, нові можливості для моделювання апроксимованих поверхонь з використанням багатокутників.

У тривимірній комп'ютерній графіці багатокутне моделювання – це підхід для моделювання об'єктів шляхом подання або апроксимації їх поверхонь з використанням багатокутників. Багатокутне моделювання добре підходить для рендеринга (візуалізації) і тому є методом вибору для комп'ютерної графіки в реальному часі. Альтернативні методи представлення 3D-об'єктів включають в себе поверхні NURBS, поверхні підрозділи і засновані на рівняннях уявлення.

Основним об'єктом, використовуваним в моделюванні сітки, є вершина, точка в тривимірному просторі. Дві вершини, з'єднані прямою, стають ребром. Три вершини, пов'язані один з одним трьома ребрами, визначають трикутник, який є найпростішим багатокутником в евклідовому просторі. Більш складні багатокутники можуть бути створені з кількох трикутників або як один об'єкт з більш ніж 3 вершинами. Чотиристоронні багатокутники і трикутники є найпоширенішими формами, використовуваними при багатокутному моделюванні.

В реальному світі велика кількість фізичних процесів за самою своєю природою є сплайнами. В механіці це деформація гнучкої пластини чи стержня, зафіксованих в окремих точках; траєкторія руху тіла, якщо сила, що діє на нього змінюється ступінчато (траєкторія штучного космічного об'єкта з активними та інерційними відрізками руху, траєкторія руху літака при ступінчатій зміні тяги двигунів та зміні профілю крила тощо.).

Сплайни – це потужний математичний інструмент, що забезпечує гнучкість у моделюванні, високий ступінь точності наближення та зниження обчислювальної складності. Вони знаходять широке застосування в аналізі сигналів, побудові технологічних об'єктів і оптимізації їх характеристик.

Ключові слова: 3D-моделювання, сплайнове та полігональне моделювання, вузли сплайна, вершина, точка, ребро, трикутник в тривимірному просторі, багатокутники евклідового простору, криві та поверхні Без'є, сучасні легкові автомобілі, модифікації, аеродинамічні властивості автомобіля, коефіцієнт аеродинамічного опору повітря.

Вступ

Останні розробки щодо зміни зовнішніх форм легковиків базуються на понятті стайлінга автомобіля (styling – стилізація) – зміна зовнішнього вигляду або салону, з метою індивідуального стилю, що виділяє автомобіль в загальному магістральному дорожньому потоці та привертає увагу навколо. Естетика автомобіля – це термін, який має відношення до загального зовнішнього вигляду та дизайну автомобіля. Він охоплює все, від форми і кольору транспортного засобу.

На сучасному етапі значна увага приділяється використанню 3D-моделювання автомобільного засобу, що дозволяє відновлювати, якісно змінювати зовнішні форми автомобіля з врахуванням його аеродинамічних характеристик.

Постановка задачі: розглянути відомі способи тривимірного моделювання легкового автомобіля з певним аналізом впливу аеродинамічних характеристик.

Огляд основних типів моделювання

Сплайнове моделювання – це вид 3D-моделювання, при якому модель створюється за допомогою сплайнів. Лінії сплайнів задаються тривимірним набором контрольних точок в просторі, які і визначають гладкість кривої. Використовує сплайни (криві) для опису поверхні об'єкта; криві можуть бути налаштовані за допомогою контрольних точок [1 – 3].

Сплайн – область визначення якої розбита на частки, а кожна із часток являє собою функцію, деякий поліном (многочлен). Сітка точок інтерполяції може суттєво впливати на ефективність розрахунків. Важливими є випадки рівномірної сітки, при цьому відстань між точками повинна бути кратною відстані між вузлами сплайна. Деякі поняття 3D-сітки показані на рис. 1. Вона буває трикутна або квадратна. Трикутників найчастіше намагаються уникати, через те, що при модифікації можуть виникати певні спотворення, внаслідок чого створюється уява неправильної геометрії 3D-моделі, також не виключається і пошкодження якості самої моделі.

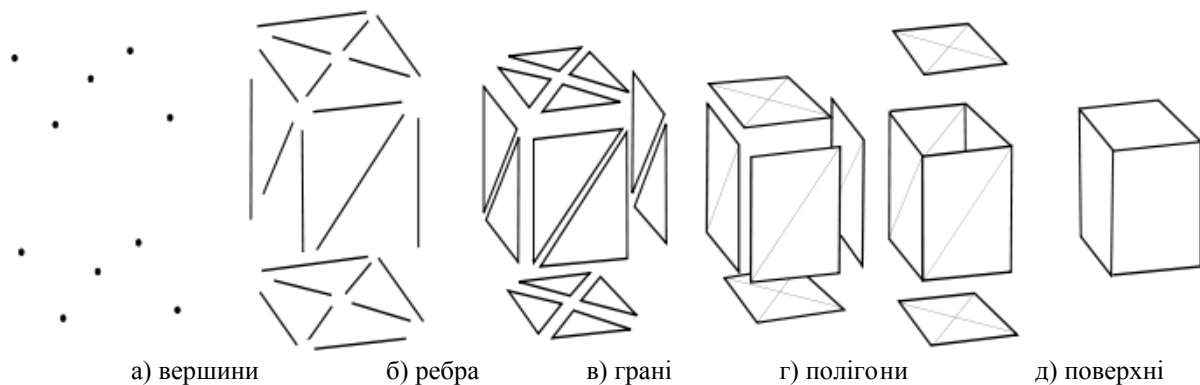
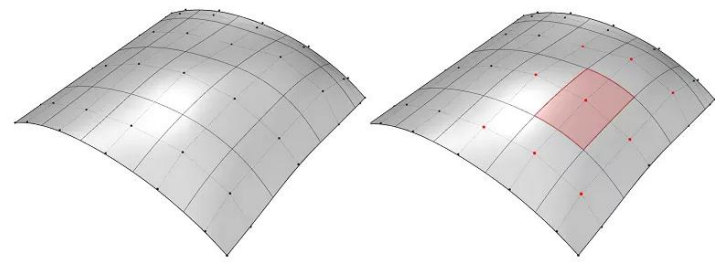


Рис. 1. Сітки, її різновиди при моделюванні сплайнами

Сама сітка складається з вершин та ребер. Ребра між собою утворюють грані, з граней складаються полігони. С полігонів складаються поверхні, а з поверхонь – 3D-модель.

Сутність сплайнового моделювання: формування геометричної поверхні за допомогою плавних криволінійних відрізків (рис. 2) у трьохвимірному просторі. Наближення скелета (рис. 2) до обтічних форм (рис. 2, б) дозволяє максимально наближати об'єкт до реальності та забезпечувати достатній рівень деталізації [5, 6].



а) скелет

б) обтічне покриття

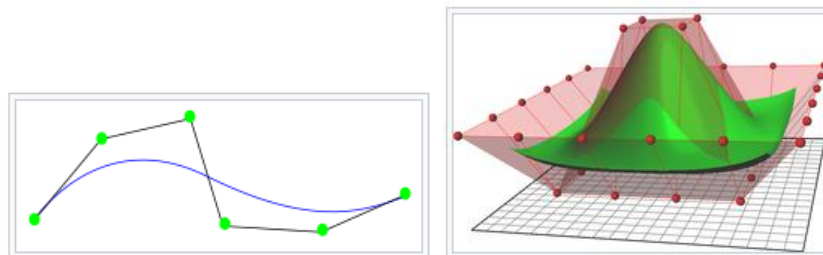
Рис. 2. Формування геометричної поверхні у трьох вимірах

Сплайнове моделювання проводиться двома способами:

- параметричним, що базується на геометричних та функціональних взаємозв'язках;
- NURBS-моделюванням.

1.2 NURBS-моделювання (рис. 3, а, б) – опис форм геометричних кривих за допомогою математичних рівнянь. В цьому випадку таке моделювання створює більш кращу плавність контуру, нерівні краї виглядають згладжуваними. Поняття NURBS-моделювання здебільшого має відношення до тривимірних відображень, створених за допомогою спеціальних криволінійних відрізків, тобто сплайнового напрямку.

Криву лінію (поверхню), розташування її, кривизну, задають контрольними точками. Отже, сплайновому моделюванню слугують «сплайни». Крива проходить за точками або між ними, не забезпечуючи обов'язкове дотикання до них (рис. 3, а). У сплайновому моделюванні практикують використання кривих Безьє, поверхонь Безьє, бі-сплайнів та поверхонь NURBS (рис. 3, б). Як видно з рис. 3, плавність кривої забезпечують лінії сплайнів з тривимірним положенням контрольних точок в просторі.



а) сплайн за контрольними точками

б) NURBS-поверхня

Рис. 3. Створення криволінійних відрізків у NURBS моделюванні

NURBS-моделювання вважається однією з найсучасніших методик, що має найбільш поширене використання в кінематографі, рекламі. Воно практично вбудоване в усі популярні програми і достатньо поєднується з іншими, розглядається як досить перспективне і в інших галузях. Знаходить вказане моделювання і в точному машинобудуванні, тому що кожна лінія грає роль функції координат, оскільки її можна обчислити у будь-якій точці на поверхні. Тобто розширюється область застосування у тому випадку, коли необхідно реалізовувати дуже точні контури, форми макетів, незалежно від фізичних габаритів.

Відомо два варіанти NURBS-моделювання, що використовують криві (рис. 4, а, б):

- P (форма змінюється за допомогою вершин, розміщених на самому відрізку);
- CV (форма коригується вершинами, розташованими поза відрізком).

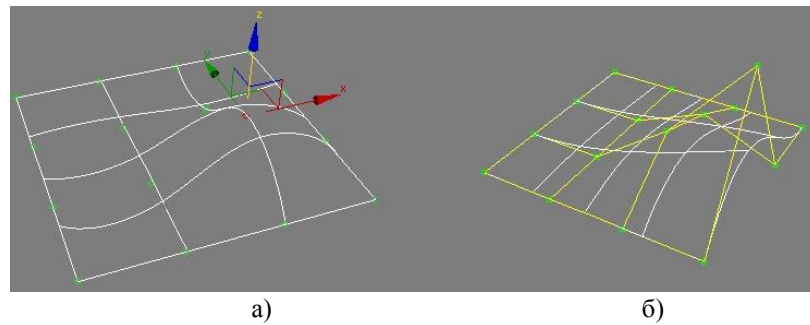


Рис. 4. Два варіанти NURBS моделювання

Залежно від складності проекту або із застосуванням індивідуального завдання фахівці обирають один із варіантів.

У будь-якому випадку, параметричне і NURBS-моделювання за участю сплайнів характеризується плавністю контурів, простим згладжуванням загострених граней.

Переваги сплайнового моделювання – можливість створення плавних та складних форм. Недоліки – вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Різниця сплайнового моделювання від полігонального полягає в тому, що в першому випадку використовуються кривоб'ємні форми, тоді, як полігональне моделювання формує об'єкти з використанням багатокутних граней (полігонів).

1.3 Полігональне моделювання – точки в тривимірному просторі, вершини яких з'єднані між собою ребром, утворюють поверхню за законом створення геометричних площин. Набір об'єднаних площин називають полігональною сіткою.

Полігональні сітки складаються з таких складових: вершина – точка з'єднання ребер, їх може бути скільки завгодно; **ребра** – лінії, що виступають межами граней; **грані або полігони** – осередки сітки, ділянки площині, які мають найчастіше трикутну (рис. 5) або чотирикутну форму. Полігональна сітка може складатися з величезної кількості однакових осередків.

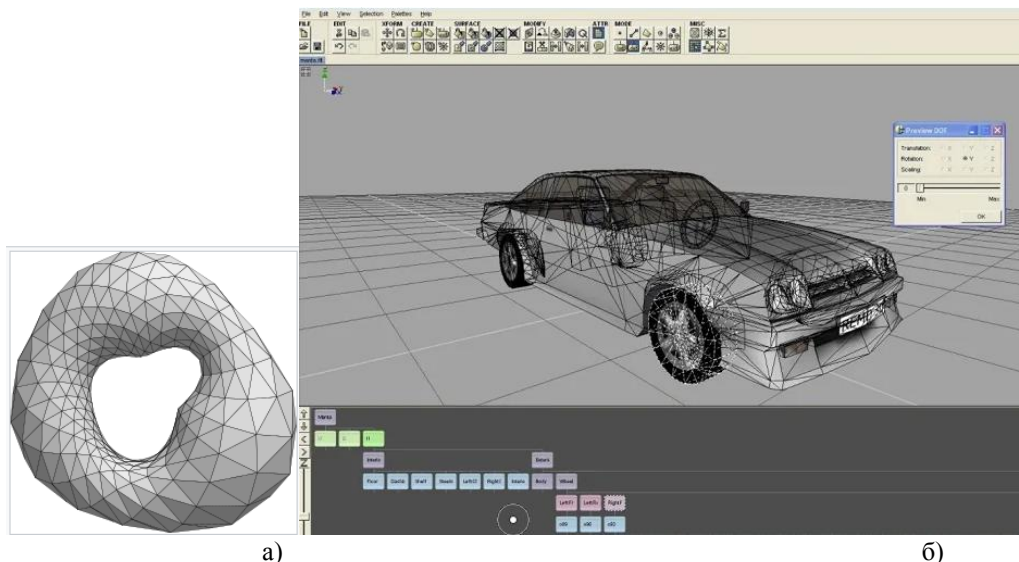


Рис. 5. Прилади полігональних моделей, складених з трикутників

Ґрунтується вона на визначенні точок у просторі по осях координат. При поєднанні цих позначок відрізками виходять багатокутники або, як вони називаються у графіку, полігони. Ці фрагменти можуть мати різну геометричну форму, забарвлення та текстуру. Саме зображення виходить шляхом з'єднання кількох полігонів.

Модифікують тривимірні моделі об'єкта шляхом зміни складових (їх масштаб і форму, обертають, об'єднують, ділять, а також застосовують інші операції, що дозволяють спеціальні

комп'ютерні програми).

Для створення 3D-сіткових моделей використовують наступні процедури: моделювання, скульптуринг, 3D-сканування, процедурне моделювання, текстурювання та матеріали.

Моделювання передбачає створення та редагування вершин, ребер і граней сіткової моделі вручну або за допомогою інструментів у програмному забезпеченні для 3D-моделювання.

Скульптуринг. У цьому методі сітковій моделі надається форма, подібна до глини, шляхом безпосереднього маніпулювання поверхнею об'єкта. Ліплення часто використовується в поєднанні з іншими техніками моделювання для створення реалістичних і складних моделей.

3D-сканування. Це техніка, яка перетворює фізичний об'єкт на тривимірну цифрову модель. Він передбачає використання 3D-сканера для захоплення поверхні об'єкта і створення цифрової сітчастої моделі. Цей процес особливо добре підходить для захоплення реальних об'єктів і їх детального відтворення в цифровому світі.

Процурне моделювання. Процурне моделювання генерує тривимірні сіткові моделі за допомогою алгоритмів і математичних функцій. Цей метод особливо корисний для створення складних і детальних моделей, які важко моделювати вручну, наприклад, природні ландшафти, хмари або рідини.

Текстурювання та матеріали. Після створення 3D-сіткової моделі наступним кроком часто є додавання текстур і матеріалів, щоб надати моделі реалістичного вигляду в подальшій 3D-візуалізації. Текстури – це двовимірні зображення, які проєктуються на поверхню сіткової моделі для додавання кольорів, візерунків і деталей. Матеріали, з іншого боку, визначають оптичні властивості поверхні, такі як відображення, прозорість і шорсткість.

Оптимізація 3D-сіткової моделі. Це фактично баланс між деталізацією та візуалізацією 3D-сіткової моделі (рис. 6, а – г). Найбільш широкого використання набуває першочергове створення високополігональної модель, що демонструє найкращу якість та точність. В подальшому цю модель можна оптимізувати та перетворити на низькополігональну модель, зменшивши кількість полігонів без надмірної втрати візуальної якості. Ця техніка, також відома як зменшення кількості полігонів або оптимізація сітки, є важливою частиною 3D-моделювання і дозволяє створювати моделі більш ефективно і з меншими витратами ресурсів [4].

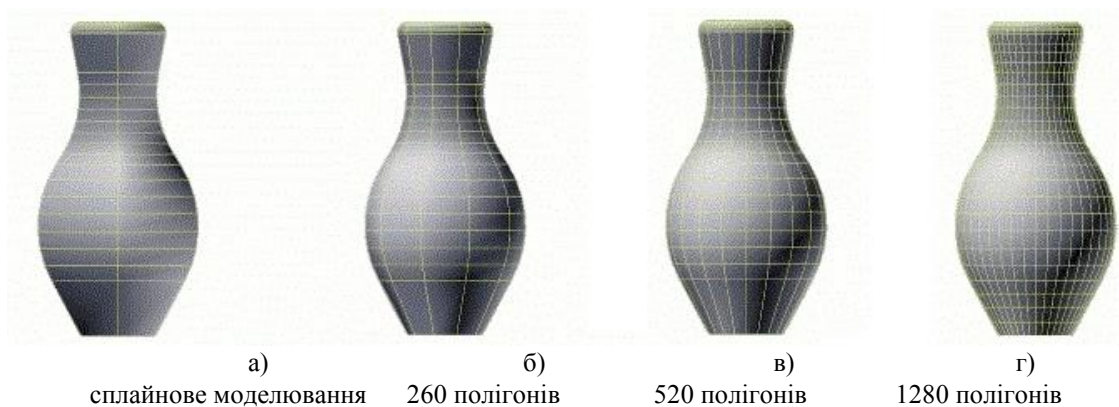


Рис. 6. Зразки оптимізації 3D-сіткової моделі

Низькополігональне моделювання (рис. 7, а) характеризується використанням невеликої кількості фігур на сітці. Використовується для економії ресурсів, коли не потрібно детально описувати модель автомобіля, тобто створюється проста мінімалістична ілюстрація. Такі моделі використовуються як фонові, наприклад, натовп на трибунах або припаркований автомобіль.

Середнє полігональне моделювання (рис. 7, б) – це більш складний процес, орієнтований,

зазвичай, середній рівень деталізації, правильну геометрію, середню кількість полігонів; до того ж придатні для рендерингу, ігрової індустрії та інженерії.

Високополігональна модель (рис. 7, в) – це найбільш трудомісткий і витратний підтип, оскільки застосовується до створення точних копій з допомогою великої кількості полігонних деталей. Нарощування ступеня деталізації проводиться поступово: від базових контурів, до високоточного відображення всіх частинок та застосування опцій згладжування. Такі моделі використовуються під час проєктування, оскільки також можуть бути дуже точними. Але працювати з такими моделями дуже важко, оскільки робота з ними потребує значних часових ресурсів.

Переваги полігонального моделювання – можливість формувати будь-який об'єкт різного ступеня складності з використанням багатокутних граней (полігонів), легкість та швидкість обробки. Однак є і недолік, який полягає у копіткості, складності та тривалості робочого процесу. Для забезпечення високого ступеня деталізації доводиться робити дуже багато дрібних елементів, інакше, краї будуть ограненими, а малюнок «плоский», тобто – нездатність передачі плавних кривих та форм.

ТОП програмного забезпечення, на якому доступно полігональне, параметричне та NURBS-моделювання: Maya (для кінематографа, ігор, нестандартних завдань); Rhinoceros (особливо підходить для проєктування суден, ювелірних виробів, автомобілів); Autodesk (для промислових цілей); полігональне моделювання в 3dmax (для дизайну, відеоігор); Modo (досить універсальне ПЗ); Cinema 4D (програма для анімації, відео монтажу, створення ефектів у кіно тощо).

Будь-які види 3D-моделювання допомагають точно відтворити майбутній об'єкт, наблизивши його зображення на екрані комп'ютера до реального вигляду.

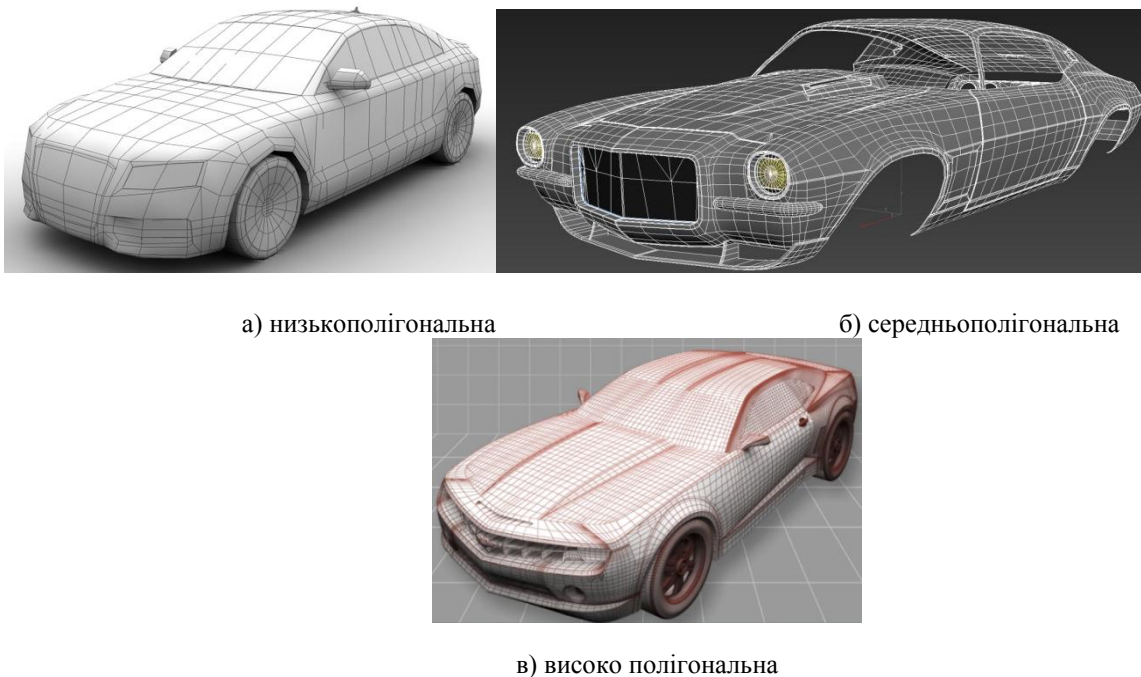


Рис. 7. Приклади полігональних моделей

Аналіз впливу аеродинаміки на автомобіль

2.1. Аеродинамічні характеристики.

Аеродинамічна сила – це сила, з якою зустрічний рухомий повітряний потік діє на поверхню твердого тіла. Аеродинаміка – це спосіб взаємодії повітря з об'єктами, в цьому випадку автомобілем. Найбільш аеродинамічною формою в природі є сльоза, вона має коефіцієнт аеродинамічного опору (C_d) 0,04. Ось чому так багато аеродинамічно ефективних автомобілів мають особливу видовжену форму. Коли вода падає на землю у вигляді дощу, Наукові праці ВНТУ, 2025, № 2

вона також зустрічає опір повітря. Однак у своїй рідкій формі вона може приймати будь-яку форму, що дозволяє їй рухатися вільніше.

Основною складовою аеродинамічного опору автомобіля є опір форми [4]. Форма автомобільного кузова (рис. 8) визначає величину і місце розташування зон підвищеного та зниженого тиску, а також джерел утворення вихорів при взаємодії кузова з потоком повітря.

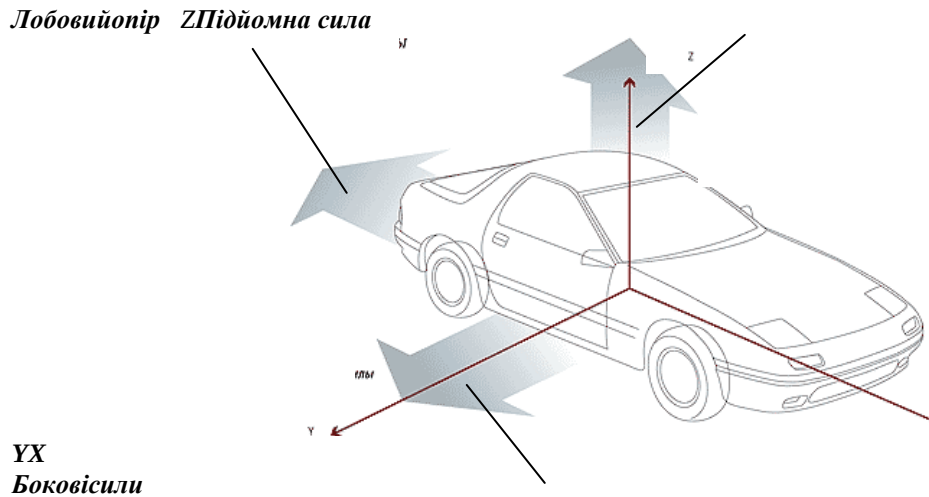


Рис. 8. Аеродинамічний опір автомобіля

Під впливом на автомобіль потоку повітря розуміють аеродинамічні сили: сила лобового опору, спрямована в бік, протилежна руху автомобіля, підйомна сила, перпендикулярна площині, в якій рухається автомобіль та бокові сили.

На витрату палива та динамічні характеристики, особливо за великих швидкостей руху, значний вплив (рис. 9) чинить опір повітря (аеродинамічний опір), сила аеродинамічного опору пропорційна квадрату швидкості і розраховується за формулою:

$$F_x = C_x \frac{\rho V^2}{2} S;$$

$$F_y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S;$$

де S – площа фронтальної проекції автомобіля, м^2 ; V – швидкість руху автомобіля відносно повітря, м/с ; ρ – щільність повітря, кг/м^3 ; C_x , C_y – коефіцієнт аеродинамічного опору. 6



Рис. 9. Аеродинамічний опір автомобіля

На утворення та схід вихрів з поверхні кузова витрачається значна кількість енергії, яка компенсується двигуном автомобіля, що споживає на це додаткову кількість палива. Тому при створенні великообтічних кузовів необхідно усунути зони підвищеного й зниженого тиску повітря.

Таким чином була створена ідеальна з точки зору аеродинаміки форма – форма краплі. Звичайно, є багато інших аспектів, які слід враховувати для легкового автомобіля (рис. 10), але форма краплі все одно лишається керівним принципом дизайну кузова. Однак ідеальна форма краплі має свої недоліки. Занадто довгий кузов менш практичний для крутих поворотів і паркування, а додатковий об'єм салону можна використовувати лише частково.

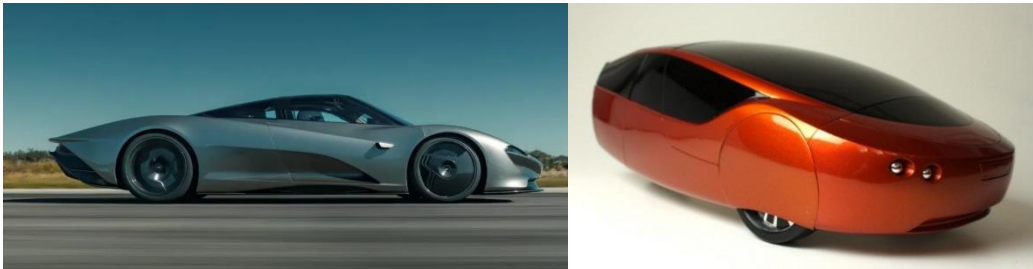


Рис. 10. Аеродинамічна форма зовнішніх поверхонь (дизайн) легкового автомобіля

2.2. Головні напрями удосконалення аеродинамічних показників.

Для поліпшення техніко-економічних показників значна увага приділяється покращенню аеродинамічних характеристик швидкісних автотранспортних засобів (АТЗ), в першу чергу, зниженню коефіцієнта аеродинамічного опору, що забезпечує підвищення паливної економічності і швидкісних властивостей, а отже їхньої продуктивності (табл. 1). Сприяють факторам керованості та стійкості автомобіля низькі коефіцієнти бічної і підйомної сил. Оптимізація характеру обтікання під днищем і кормової частини, зменшує аеродинамічний опір АТЗ та поліпшує екологію навколишнього середовища.

На сучасному етапі значна увага приділяється: збільшенню кутів нахилу облицювання радіатора, кришки капота, вітрового скла й радіусів закруглення фронтальних крайок кузова (оптимізації контурного фактора за рахунок зниження питомої ваги відривних плинів); додання передку автомобіля і його вітровому склу циліндричної форми в плані; видаленню з поверхні кузова всіх виступаючих елементів конструкції або їх ретельне аеродинамічне відпрацювання (у тому числі виконання в рівень з кузовом скляних панелей, усунення водостоків тощо).

Таблиця 1

Аеродинамічний опір різних автомобілів

Кузов автомобіля	Коефіцієнт аеродинамічного опору c_x	Потужність, що необхідна для подолання аеродинамічного опору при площі фронтальної проєкції 2 м ²		
		Швидкість (км/год)		
		40	80	120
Відкритий чотиримісний	0,7 – 0,9	1,18 – 1,47	9,6 – 11,8	31,0 – 40,5
Закритий, з наявними кутами та гранями	0,6 – 0,7	0,96 – 1,18	8,0 – 9,6	26,4 – 30,8
Закритий, із закругленими кутами та гранями	0,5 – 0,6	0,8 – 0,96	6,6 – 8,0	22,0 – 26,4
Закритий понтоподібний	0,4 – 0,5	0,66 – 0,8	5,2 – 6,6	22,0 – 17,6
Закритий з добре обтічними частинами	0,3 – 0,4	0,52 – 0,66	5,2 – 3,7	17,6 – 13,2
Закритий аеродинамічно удосконалений	0,20 – 0,25	0,33 – 0,44	3,3 – 2,6	11,0 – 9,8
Вантажний автомобіль	0,8 – 1,5	-	-	-
Автобус	0,6 – 0,7	-	-	-
Автобус з добре обтічним кузовом	0,3 – 0,4	-	-	-
Мотоцикл	0,6 – 0,7	-	-	-

Достатньої популярності набули стойлери – спеціальні елементи в автомобілі, що

змінюють аеродинамічні властивості кузова автомобіля, перенаправляють повітряні потоки так, що зменшується аеродинамічний опір автомобіля та збільшується притискне зусилля. Також у стойлерах додані спеціальні конструктивні елементи, що дозволяють знизити забруднюваність, рівень аеродинамічного шуму і додають привабливу стилізацію вигляду авто.

Висновки

Розглянуто та проаналізовано перспективні тенденції вдосконалення зовнішніх форм кузова легкового автомобіля; головні підходи до 3D-моделювання автомобільного засобу, що дозволяють створювати в тривимірному просторі складові кузова з достатнім рівнем візуалізації, в тому числі для особливо складних поверхонь; вводити нові модифікації моделі; отримувати якісну текстуру; поліпшувати якість створюваної поверхні; заощаджувати час на моделювання складних поверхонь, відновлювати, якісно змінювати зовнішні форми автомобіля з врахуванням його аеродинаміки. Запропоновані головні напрями удосконалення аеродинамічних показників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Буда А. Г., Кужель В. П., Юров А. Р. Графічні моделі конструювання форм кузова автомобіля. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. Луцьк: Луцький НТУ, 2016. №1 (5). С. 32–37.
2. Буда А. Г., Кужель В. П., Юров А. Р. Моделювання зовнішніх поверхонь легкового автомобіля в тривимірному просторі за допомогою сплайнів. *Вісник машинобудування та транспорту. Науковий журнал*. 2018. №1 (7). С. 26–34. URL: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/8>.
3. Кужель В. П., Буда А. Г., Юров А. Р. Сучасні підходи до моделювання зовнішніх форм легкового автомобіля в 3D середовищі. *Вісник Житомирського ДТУ*. 2019. № 2 (82). С. 74–82.
4. Кужель В. П., Буда А. Г., Павленко В. М., Корнев О. В. Рейтинги легкових автомобілів за аеродинамічними властивостями та сучасні підходи 3D моделювання зовнішніх форм кузовів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. №1 (17). URL: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/article/view/325/288>.
5. Види 3D моделювання: полігональне, сплайнове і RUBS моделювання. URL: https://koloro.ua/ua/3d_printing_and_modeling/vydy-3d-modelyuvannya-poligonalne-splajnove-i-nurbs-modelyuvannya/.
6. Volkov V., Gritsuk I., Taran I., Volkova T., Kuzhel, V., Semenov A., Voznyak O. Information Systems for Vehicles Technical Condition Monitoring. In: Semenov A., Yepifanova I., Kajanová J. (eds). *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 195. P. 61–96. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54012-7_4. (Collective monograph indexed in Scopus).

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ.

Стаття надійшла до редакції 04.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 16.06.2025.

Кужель Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: kuzhel2017@gmail.com, kuzhel_v@vntu.edu.ua.

Буда Антоніна Героніївна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки, e-mail: antbu@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет.

Павленко В'ячеслав Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів, e-mail: vp.khadi@gmail.com.

Харківський автомобільно-дорожній університет.

Павленко Віталій Миколайович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства, e-mail: v.pavlenko@khai.edu.

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут".