

УДК 004.9; 514.18; 621.87; 621.869

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0.146

## ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ СПОРТКАРА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Назарько О. О., Рагулін В. М., Ярижко О. В., Зайцев І. С.  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** За допомогою програмних продуктів Autodesk було здійснено комп'ютерне дослідження обтічності форми автомобіля спортивної модифікації, точність якого оцінювалась порівнянням значень отриманих коефіцієнтів аеродинамічного опору  $C_x$  для його базової моделі та з використанням додаткових аеродинамічних деталей. Тривимірні моделі прототипів було відтворено з максимальним наближенням до оригіналів за розмірами, що зазначені в їхніх технічних характеристиках.

**Ключові слова:** комп'ютерне дослідження, тривимірна модель, аеродинаміка автомобіля, обтічність форми, Autodesk Inventor, Autodesk Flow Design.

### Вступ

Сучасні автомобілі мають задовольняти не тільки вимогам безпеки та технічної стабільності, але й естетичним вподобанням споживача. Щодо цього найбільш привабливими є спорткари, які мають більш складну форму, ніж базові моделі, через наявність навісних елементів. Варто зазначити, що аеродинамічні деталі таких автомобілів здійснюють не лише декоративну функцію. Їх застосуванню передують багаторазові експериментальні дослідження, спрямовані на раціональний розподіл повітряного потоку на заданій швидкості з метою поліпшення динаміки автомобіля. Розвиток CAD-програм дозволив здійснити віртуальний аналіз тривимірних моделей без використання натурних зразків.

Під час аналізу аеродинамічних процесів вихідним показником є форма об'єкта, що піддається дії повітряного потоку. Основним елементом автомобіля, що сприймає найбільше (до 70 %) повітряне навантаження, є кузовна частина.

Оцінним показником під час дослідження обтічності форми автомобіля є коефіцієнт опору повітря  $C_x$ . Чим більше значення  $C_x$ , тим гірше автомобіль протистоїть впливу повітряного потоку, тим більша сила лобового опору.

### Аналіз публікацій

Однією з основних зовнішніх збурювальних сил, що діє на автомобіль та зростає зі збільшенням швидкості руху, є сила опору повітряного середовища. Дослідження аеродинаміки автомобіля було розпочато в 30-ті роки ХХ століття [1], коли дослідження в

аеродинамічній трубі здійснювали саме для автомобілів, а не тільки для льотної техніки. Коефіцієнт опору повітря  $C_x$  є одним з аеродинамічних показників, що визначався виключно експериментальним способом в аеродинамічній трубі.

Питання аеродинаміки форми транспортних засобів невід'ємно пов'язане з його експлуатаційними властивостями, а саме стійкістю та керованістю. Базовими роботами, в яких аналізувались ці проблеми, є роботи [1–8].

Розвиток технологій та глобальна комп'ютеризація дозволили здійснити віртуальні експерименти з використанням 3D-моделей з розмірами та фізичними параметрами досліджуваних об'єктів [9–16].

### Мета та постановка завдання

Метою роботи було визначення коефіцієнта аеродинамічного опору спорткара під час комп'ютерного експерименту та обґрунтування доцільності використання навісних деталей для поліпшення його аеродинаміки. Для досягнення даної мети попередньо було створено тривимірні моделі реального автомобіля в пакеті Autodesk Inventor у двох версіях – базовій та спортивній. Експеримент було здійснено в програмному середовищі Autodesk Flow Design, що дає змогу змоделювати процес обдуву автомобіля повітряним потоком за можливості зміни його швидкості та визначити тип розподілу навантажень вздовж поверхні кузова.

### Аналіз особливостей кузовів спорткарів та створення тривимірних моделей

Розвиток автомобілебудування дозволяє створювати автомобілі високого технічного

рівня. Та питання дизайну транспортного засобу для сучасного ринку має таке саме важливе значення, як і його технічні характеристики. Сучасний автомобіль – це поєднання техніки та естетики. Лідерами в поєднанні високотехнологічного оснащення, аеродинаміки та дизайну є автомобілі класу S за європейською класифікацією – спорткари. Ці автомобілі є високошвидкісними. Їхні швидкісні властивості реалізуються завдяки аеродинамічності форми кузова та використанню додаткових навісних деталей. Всі спорткари мають такі спільні риси, що здійснюють функцію покращення їхньої аеродинаміки:

- зменшена висота (для зниження центру парусності) та збільшена ширина (для підвищення притискної сили);
- максимально згладжена поверхня кузова без виступальних елементів;
- наявність аеродинамічних деталей (дефлектори, спойлери, антикрила, сплітери, дифузори);
- низький кліренс (менше 15 мм) для мінімізації підйомної сили;
- використання спеціальних матеріалів для полегшення маси автомобіля (алюміній, вуглецеве волокно для кузовних деталей, титан).

Для аеродинамічного аналізу було взято за основу базову та спортивну версії реального легкового автомобіля S-класу Audi R8, порівняльні характеристики яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики прототипів, використані для моделювання та експериментального дослідження

| Параметри                       | Базова версія | Спортивна версія |
|---------------------------------|---------------|------------------|
| Висота $B$ , мм                 | 1240          | 1240             |
| Ширина $H$ , мм                 | 1938          | 1994             |
| Довжина, мм                     | 4420          | 4426             |
| Споряджена маса, кг             | 1595          | 1555             |
| Колісна база, мм                | 2650          | 2650             |
| Максимальна швидкість, км/год   | 310           | 331              |
| Коефіцієнт опору повітря, $C_x$ | 0,37          | 0,34             |

Використовуючи відомі геометричні характеристики, насамперед було створено 3D-модель бази (рис. 1).

Створення 3D-моделей в Autodesk Inventor потребувало складних ескізів та використання більше ніж 400 команд моделювання.

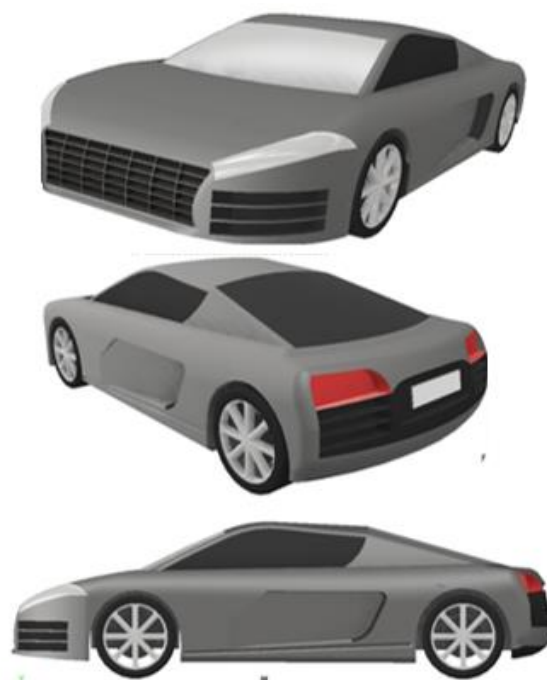


Рис. 1. Тривимірна модель базової версії автомобіля Audi R8.

Робота над спортивною модифікацією складалась зі створення та приєднання додаткових аеродинамічних деталей – антикрило, дифузор, закрilки переднього бампера (канарди), а також деякі видозміни форми кузова (рис. 2).

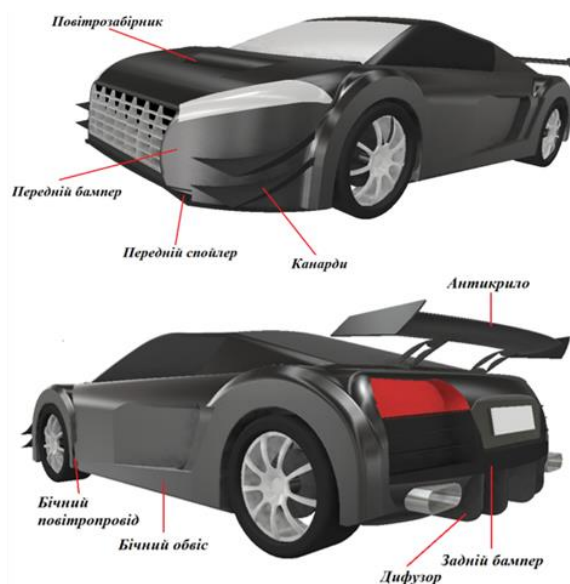


Рис. 2. Тривимірна модель спортивної версії автомобіля Audi R8.

Для аналізу точності моделювання за формулою 1 було здійснено розрахування лобової площі тривимірних моделей:

$$F = \alpha \cdot B \cdot H, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт заповнення площі ( $\alpha = 0,8$  для легкових автомобілів);  $B$  – найбільша габаритна висота автомобіля, м;  $H$  – найбільша габаритна ширина автомобіля, м.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахункові значення лобової площі  $F$  реальних автомобілів та їхніх тривимірних моделей

| Модифікація кузова | Лобова площа $F$ , м |           |
|--------------------|----------------------|-----------|
|                    | Оригінал             | 3D-модель |
| База               | 1,9225               | 1,8889    |
| Спорт              | 1,9284               | 1,9715    |

### Аеродинамічне дослідження тривимірних моделей

Дослідження здійснювалося в програмному середовищі Autodesk Flow Design, що є віртуальним аналогом аеродинамічної труби. Тривимірні моделі почергово піддавались дії потоку, що набігає, швидкість якого відповідає максимальним швидкостям руху реальних автомобілів. Так, для базової моделі вона становила 310 км/год, а для спорт-модифікації – 330 км/год.

У процесі віртуального експерименту відбувається візуалізація потоку, що дає змогу визначити наявність зони вихорів та в автоматичному режимі підрахувати значення коефіцієнта аеродинамічного опору  $C_x$  (рис. 3).

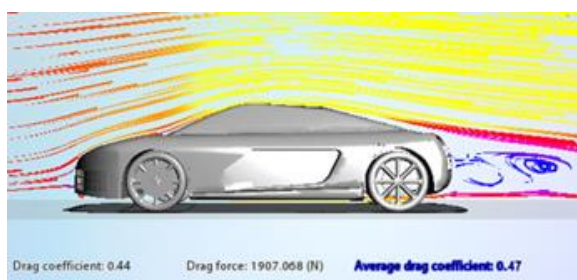


Рис. 3. Розподіл повітряного потоку та визначення коефіцієнта аеродинамічного опору  $C_x$  досліджуваної моделі

Розміри повітряного коридору також можна регулювати, використовуючи шкалу та спеціальні «ручки» (рис. 4).

У цьому випадку були вибрані такі параметри коридору: довжина – не менше 2 довжин моделі, ширина – не менше 1,5 ширини моделі, висота – 1,5 висоти моделі.

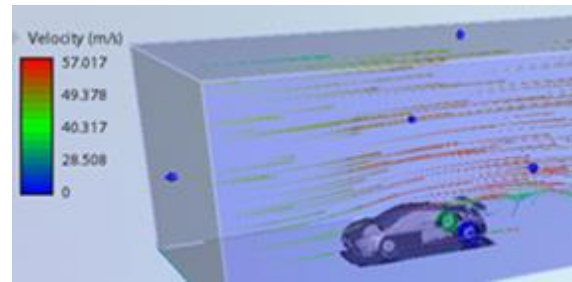


Рис. 4. Візуалізація повітряного коридору в середовищі Autodesk Flow Design.

Також програма дозволяє скористатися режимом відображення навантажень на поверхні кузова та містить шкалу чисельних значень відповідно до кольорів (рис. 5).

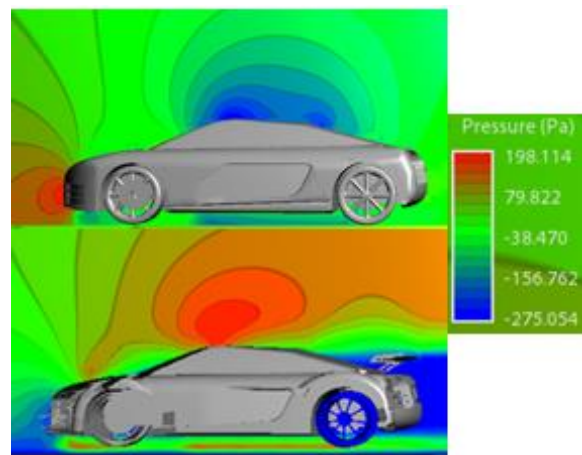


Рис. 5. Картина розподілу тиску на поверхнях моделей під час руху з максимальною швидкістю

Аналіз результатів, поданих на рис. 5, демонструє, що використання навісних елементів значно зменшило тиск на передню частину кузова, як порівняти з базовою моделлю, в якій немає такого обладнання.

Здійснений експеримент дав змогу отримати такі значення коефіцієнтів аеродинамічного опору  $C_x$ : 0,44 – для базової моделі, 0,36 – для спортивної версії.

### Висновки

Застосування методу комп'ютерного моделювання з використанням програмних продуктів Autodesk Inventor та Autodesk Flow Design в процесі дослідження аеродинаміки автомобіля дозволяє отримати достатньо точні результати. Так, оптимізація форми базової моделі та приєднання аеродинамічних деталей дала змогу зменшити лобовий опір на 4,2 %.

Відносна похибка розрахунку лобової площі  $F$  склала 1,77 % – для бази, 2,2% – для спорт-версії, що підтверджує точність відтворення вибраних прототипів у процесі тривимірного моделювання.

### Література

1. Михайловский Е. В. Аэродинамика автомобиля. Москва: Машиностроение, 1973. 224 с.
2. Зимелев Г. В. Теория автомобиля Москва: Машгиз, 1959. 312 с.
3. Королев Е. В., Тур Е. Я. Об аэродинамике легкового автомобиля. Автомобильная промышленность. 1981. № 1. С. 38–39.
4. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля. Суми: Університетська книга, 2010. 320 с.
5. Гухо В. Г. Аэродинамика автомобиля / пер. с нем. Н. А. Юниковой. Москва: Машиностроение, 1987. 424 с.
6. Джонс И. С. Влияние параметров автомобиля на дорожно-транспортные происшествия. Москва: Машиностроение, 1979. 207 с.
7. Оценка устойчивости неподвижного автомобильного колеса против бокового скольжения / Абдулгасис У. А и др. Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. 2011. № 27. С. 53–59.
8. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Собрание сочинений. Москва: Изд-во АН СССР, 1956. 384 с.
9. Евграфов А. Н. Аэродинамика автомобиля: учебное пособие. Москва: МГИУ, 2010. 365 с.
10. Анучин И. Е. Исследования аэродинамических свойств масштабной модели спортивного автомобиля класса Formula Student. Будущее технической науки: тез. докл. XIII Междунар. молодеж. научно-техн. конф. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Н. Новгород, 2014.
11. Оценка устойчивости автомобиля с помощью ЭВМ при выполнении анализа тягово-скоростных свойств / Алёкса Н. Н., Клименко В. И., Подригало М. А., Клец Д. М. Вестник ХНАДУ. 2009. Вып. 45. С. 66–69.
12. Рагулін В. М. Комп'ютерне моделювання при аналізі механізму підвіски тягової рами автогрейдерів. Сучасні проблеми моделювання: зб. наукових праць. 2018. Випуск 13. С. 154–161.
13. Підвищення точності вимірювання параметрів руху автомобіля у процесі динамічних випробувань / Подригало М. та ін. Метрологія та прилади. 2010. № 3. С. 49–52.
14. Шевченко В. О., Рагулін В. М., Ходирев С. Я. Дослідження навантаження модернізованого механізму підвіски тягової рами автогрейдера сімейства ДЗк-250. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2019. Вып. 87. С. 18–23.
15. Динамика колеса и устойчивость движения автомобиля / Абдулгасис У. А., Абдулга-

зис А. У., Клец Д. М., Подригало М. А. Симферополь: ДИАИПИ, 2010. 208 с.

16. Черников А. В., Рагулин В. Н. Применение современных технологий компьютерного моделирования в исследовании подвески рабочего оборудования автогрейдера. Сучасні проблеми моделювання: зб. наукових праць. 2016. Випуск 7. С. 172–178.

### References

1. Mihajlovskij E. V. Aerodinamika avtomobilya. Moskva: Mashinostroenie, 1973. 224 s. [in Russian].
2. Zimelev G. V. Teoriya avtomobilya Moskva: Mashgiz, 1959. 312s. [in Russian].
3. Korolev E. V., Tur E. YA. Ob aerodinamike legkovogo avtomobilya. Avtomobil'naya promyshlennost'. 1981. № 1. Str. 38–39 [in Russian].
4. Volkov V. P. Vil'skiy H. B. Teoriia rukhu avtomobilya. Sumy: Universytetska knyha, 2010. 320 s. [in Ukrainian].
5. Guho V. G. Aerodinamika avtomobilya / per. s nem. N. A. YUnikovoj. Moskva: Mashinostroenie, 1987. 424 s. [in Russian].
6. Dzhons I. S. Vliyanie parametrov avtomobilya na dorozhno-transportnye proisshestiya. Moskva: Mashinostroenie, 1979. 207 s. [in Russian].
7. Ocenka ustojchivosti nepodvi-zhnogo avtomobil'nogo kolesa protiv bokovo-go skol'zheniya / Abdulgazis U. A. ta in. Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2011. № 27. S. 53–59 [in Russian].
8. Lyapunov A. M. Obshchaya zadacha ob ustojchivosti dvizheniya. Sbranie sochinenij. T. 2. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1956. 384 s. [in Russian].
9. Evgrafov A. N. Aerodinamika avtomobilya: uchebnoe posobie. Moskva: MGIU, 2010. 365 s. [in Russian].
10. Anuchin I. E. Issledovaniya aerodinamicheskikh svojstv masshtabnoj modeli sportivnogo avtomobilya klassa Formula Student Budushchee tekhnicheskoy nauki: tez. dokl. XIII Mezhdunar. molodezh. nauchno-tekhn. konf. NGTU im. R. E. Alekseeva. N. Novgorod, 2014. [in Russian].
11. Ocenka ustojchivosti avto-mobilya s pomoshch'yu EVM pri vypolnenii analiza tyagovo-skorostnykh svojstv / Alyoksa N. N., Klimenko V. I., Podri-galo M. A., Klec D. M. Vestnik HNADU. 2009. Vyp. 45. S. 66–69. [in Russian].
12. Ragulin V. M. Kompiuterne modeliuvannia pry analizi mekhanizmu pidvisky tiahovoi ramy avtoh-reideriv. Suchasni problemy modeliuvannia: zbirnyk naukovykh prats. 2018. Vypusk 13. S. 154–161 [in Ukrainian]
13. Pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia parametrov rukhu avtomobilya u protsesi dynamichnykh vypro-buvan / Podryhalo M. ta in. Metrolohiia ta prylady. 2010. № 3. S. 49–52 [in Ukrainian]
14. Shevchenko V. O., Ragulin V. M., Khodyriev S. Ia. Doslidzhennia navantazhennia

- modernizovanoho mekhanizmu pidvisky tiahovoi ramy avtohdredera simeistva DZk-250. Vestnyk Kharkovskoho natsyonalnoho avtomobylnodorozhnoho unyversyteta. 2019. Vър. 87. S. 18–23. [in Ukrainian]
15. Dinamika kolea i ustojchivost' dvizheniya avtomobilya / Abdulgazis U. A., Abdulgazis A. U., Klec D. M., Podrigalo M. A. Simferopol': DIAJPI, 2010. 208 s. [in Russian].
16. Chernikov A. V., Ragulin V. N. Primenenie sovremennykh tekhnologiy komp'yuternogo modelirovaniya v issledovanii podveski rabochego oborudovaniya avtogrejdera. Suchasni problemi modelyuvannya: zbirnik naukovih prac'. 2016. Vypusk 7. S. 172–178 [in Russian].

**Назарько Ольга Александрівна**, к.т.н., доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [olganazamail@gmail.com](mailto:olganazamail@gmail.com), тел.: +38-066-66838-96,

**Рагулін Віталій Миколайович**, к.т.н., доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [ragulinrvn@ukr.net](mailto:ragulinrvn@ukr.net), тел.: +38-050-545-80-70,

**Яришко Олександр Володимирович** к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [yaryzko@gmail.com](mailto:yaryzko@gmail.com), тел.: +38-097-655-08-60,

**Зайцев Іван Сергійович**, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [vanya2073@ukr.net](mailto:vanya2073@ukr.net), тел.: +38-095-084-18-16.

### Study of sports car aerodynamics using computer simulation methods

**Abstract. Problem.** The results of the value of the coefficient of aerodynamic resistance of a sports car and the calculations of the frontal area of its three-dimensional model are given. **Goal.** The goal is determination of the coefficient of aerodynamic resistance for a sports car by means of a computer experiment and justification of the feasibility of using attached parts to improve aerodynamics. **Methodology.** The method of computer experiment and three-dimensional modeling was used based on a comparison with the geometric and technical characteristics of a real car **The results.** The accuracy of the construction of the three-dimensional model and virtual experiment was confirmed based on the obtained values of the frontal area and the coefficient of aerodynamic resistance.

**Key words:** computer modeling, 3D model, car aerodynamics, shape flow, Autodesk Inventor, Autodesk Flow Design.

**Nazarko Olga**, PhD, Assoc. Prof. Department of Engineering and Computer Graphics, Kharkiv National Automobile and Highway University, [olganazamail@gmail.com](mailto:olganazamail@gmail.com), tel.: +38-066-66838-96,

**Ragulin Vitaliy**, PhD, Assoc. Prof. Department of Engineering and Computer Graphics, Kharkiv National Automobile and Highway University [ragulinrvn@ukr.net](mailto:ragulinrvn@ukr.net), tel.: +38-050-545-80-70,

**Yaryzhko Aleksandr** PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University [yaryzko@gmail.com](mailto:yaryzko@gmail.com), tel.: +38-097-655-08-60,

**Zaitsev Ivan**, student, Kharkiv National Automobile and Highway University, [vanya2073@ukr.net](mailto:vanya2073@ukr.net), tel.: +38-095-084-18-16.