

УДК 62-6: 621.43

[https://doi.org/ 10.35546/kntu2078-4481.2019.3.3](https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2019.3.3)

А.А. ЄГОРОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-1023-054X

П.Н. КУЛИЧЕНКО

ТОВ “Hyundai Автопланета”, м. Херсон  
ORCID: 0000-0003-3549-6520

С.А. РУСАНОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

О.О. ЛОБОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-8486-3847

## ВИКОРИСТАННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ

В даній роботі представлено проекти трьох зразків спойлерів для поліпшення аеродинамічних характеристик автомобіля для команди з драг-рейсингу “Avto-Makss” на прикладі автомобіля BMW E46. Побудовані детальні САД-моделі для автомобіля, що розглядається, та модель, адаптована до CFD-розрахунків. Проведено комп'ютерне моделювання продувки автомобіля за методами обчислювальної аеродинаміки для визначення аеродинамічних характеристик з метою порівняння для вибору найкращого варіанту та подальшої модифікації. Проведено сесії продувки автомобілів з урахуванням внесених змін, що включають в себе крім установки спойлерів трьох варіантів (таких як *fin spoiler* – перший варіант виконання, *wing spoiler* – другий варіант виконання, *disk tail spoiler* – третій варіант виконання) також варіант з повністю закритим фендерами колесом. Порівняння проводилися за співставленням сил аеродинамічного опору та відповідних коефіцієнтів аеродинамічного опору. Крім того, враховувались підйомні сили. Було отримано, що спойлери за другим та третім варіантами виконання дають помітне поліпшення аеродинамічних характеристик автомобіля BMW E46. Чисельні розрахунки проводились в САЕ-системах за *k-ε* моделлю турбулентності. Для розрахунків була використана неструктурована сітка з тетраедричними елементами з додатково побудованим шаром призматичних комірок для врахування пограничного шару з контролем збіжності розрахунків за параметром  $y^+$ . Результати постпроцесору представлено у вигляді відповідно графіків тиску, ліній току, та перерахунку коефіцієнту аеродинамічного опору. За результатами досліджень візуалізовано процес віддалення точки відриву, перерозподіл ізоліній тиску та зміну вихрової картини за автомобілем. За рахунок правильно підібраних спойлерів вдається знизити коефіцієнт аеродинамічного опору з 0,315 для не модифікованого варіанту до 0,272 зі спойлером типу *disk tail* (третій варіант виконання).

**Ключові слова:** аеродинаміка автомобіля, спойлери, аеродинамічні характеристики, аеродинамічний опір, комп'ютерне моделювання, *k-ε* модель турбулентності.

А.А. ЕГОРОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID: 0000-0003-1023-054X

П.Н. КУЛИЧЕНКО

ТОВ “Hyundai Автопланета”, г. Херсон  
ORCID: 0000-0003-3549-6520

С.А. РУСАНОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

А.А. ЛОБОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID: 0000-0001-8486-3847

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В данной работе представлены проекты трех образцов спойлеров для улучшения аэродинамических характеристик автомобиля для команды по драг-рейсингу “Avto-Makss” на примере автомобиля BMW E46. Построены детальные САД-модели для рассматриваемого автомобиля и модель, адаптированная для CFD-расчетов. Проведено компьютерное моделирование продувки автомобиля в соответствии с методами вычислительной аэродинамики для определения

аэродинамических характеристик с целью сравнения для выбора наилучшего варианта и дальнейшей модификации. Проведены сессии продувки автомобиля с учетом внесенных изменений, которые включают в себя кроме установки спойлеров трех вариантов (таких как *fin spoiler* – первый вариант исполнения, *wing spoiler* – второй вариант исполнения, *duck tail spoiler* – третий вариант исполнения) также вариант с полностью закрытым фендерами колесом. Сравнение проводилось по сопоставлению сил аэродинамического сопротивления и соответствующих коэффициентов аэродинамического сопротивления. Кроме того, учитывались подъемные силы. Было получено, что спойлеры по второму и третьему вариантам исполнения дают заметное улучшение аэродинамических характеристик автомобиля BMW E46. Численные расчеты проводились в САЕ-системах в соответствии с *k-ε* моделью турбулентности. Для расчетов была использована неструктурированная сетка с тетраэдрическими элементами с дополнительно построенным слоем призматических ячеек для учета пограничного слоя с контролем сходимости расчетов по параметру  $y^+$ . Результаты постпроцессора представлены в виде соответственно графиков давления, линий тока, и перерасчета коэффициента аэродинамического сопротивления. По результатам исследований визуализированы процесс отдаления точки отрыва, перераспределение изолиний давления и изменение вихревой картины за автомобилем. За счет правильно подобранных спойлеров удается снизить коэффициент аэродинамического сопротивления с 0,315 для немодифицированного варианта до 0,272 со спойлером типа *duck tail* (третий вариант исполнения).

*Ключевые слова:* аэродинамика автомобиля, спойлеры, аэродинамические характеристики, аэродинамическое сопротивление, компьютерное моделирование, *k-ε* модель турбулентности.

A.A. EGOROV

Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-1023-054X

P.N. KULICHENKO

“Hyundai Автопланета”, Kherson  
ORCID: 0000-0003-3549-6520

S.A. RUSANOV

Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

A.A. LOBOV

Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-8486-3847

### USE OF COMPLEX PROFILE PARTS TO REDUCE THE AERODYNAMIC RESISTANCE

*This paper presents projects of three samples of spoilers for improving the aerodynamic characteristics of a car for the drag racing team “Avto-Makss” using the BMW E46 as an example. Detailed CAD-models for the car and a model adapted for CFD calculations were built. Computer modeling of the car blowing was carried out in accordance with the methods of computational aerodynamics to determine the aerodynamic characteristics in order to compare to select the best option and further modification. Car blowing sessions were carried out taking into account the changes made, which include, in addition to installing spoilers of three options (such as *fin spoiler* - the first version, *wing spoiler* - the second version, *duck tail spoiler* - the third version), also with the wheel completely closed with the fenders. The comparison was carried out by comparing the forces of aerodynamic drag and the corresponding drag coefficients. In addition, lifting forces were taken into account. It was found that the spoilers for the second and third versions give a noticeable improvement in the aerodynamic characteristics of the BMW E46. Numerical calculations were performed in CAE-systems in accordance with the *k-ε* turbulence model. For calculations, we used an unstructured mesh with tetrahedral elements with an additionally constructed layer of prismatic cells to take into account the boundary layer with control of the convergence of calculations with the parameter  $y^+$ . The results of the post-processor are presented in the form of, respectively, graphs of pressure, streamlines, and recalculation of the drag coefficient. According to the research results, the process of separation of the separation point, the redistribution of pressure isolines and the change in the vortex pattern behind the car are visualized. Due to correctly selected spoilers, it is possible to reduce the drag coefficient from 0.315 for the unmodified version to 0.272 with a *duck tail* type spoiler (third version).*

*Keywords:* car aerodynamics, spoilers, aerodynamic characteristics, aerodynamic drag, computer simulation, *k-ε* turbulence model.

### Постановка проблеми

Аеродинаміка автомобіля є одним з найважливіших факторів, які впливають на широкий спектр показників роботи сучасного транспорту. Від аеродинамічних показників залежить максимальна

швидкість, яку зможе розвивати автомобіль, а також його економічність. У випадку, якщо мова йде про спортивні змагання, треба враховувати ще й можливе появлення підйомної сили, величину якої достатньо складно контролювати. В роботі проводиться аналіз можливості застосування спойлерів різних типів з точки зору покращення аеродинаміки автомобіля.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найефективніший метод зменшення лобового опору без зміни геометричних параметрів кузову є установка спойлера на задню частину автомобіля [1-7]. Це дозволяє зменшити аеродинамічний опір, що дозволить автомобілю розвинути більшу швидкість та знизити витрату палива завдяки тому, що двигун буде витрачати менше потужності на подолання повітряного опору. Суть застосування спойлерів в тому, що коли вказаний елемент встановлюється на автомобіль, то відсувається точка зриву потоку, завдяки чому зменшується зона низького тиску. Існує багато варіантів виконання спойлерів. У даній роботі представлено три варіанта виконання спойлерів, які є найпоширенішими та частіше усього використовуються на практиці у спортивних змаганнях. Деякі з них використовуються і на звичайних дорожніх автомобілях.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є поліпшення аеродинамічних характеристик автомобіля BMW E 46 за рахунок використання спойлерів складного профілю, зменшення його лобового опору, а також пошук найкращого рішення для виконання завдання. Подальший етап являє собою проведення досліджень аеродинаміки з розрахуванням аеродинамічного опору автомобіля, визначення найбільш вдалої конструкції спойлера з найбільш високою ефективністю. Дана робота виконана у співпраці з командою з драг-рейсингу "Avto-Makss" на прикладі автомобіля BMW E46.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі були розглянуті результати розрахункових досліджень аеродинамічних характеристик автомобіля з визначенням його аеродинамічного опору і притисних зусиль автомобіля BMW E46.

Було здійснено чотири сесії продувки комп'ютерної моделі автомобіля BMW E46 з різними модифікаціями спойлерів. Було розраховано автомобіль з трьома видами спойлерів, приклади яких наведено нижче. Комп'ютерне моделювання продувки здійснювалось як процес набігання повітряних потоків на автомобіль з заданою швидкістю (240 км/год). Для виконання такого моделювання була створена 3D-модель автомобіля та певний простір навколо нього по якому повинні проходити повітряні потоки. Було створено декілька варіантів 3D-моделі автомобіля (рис. 1).

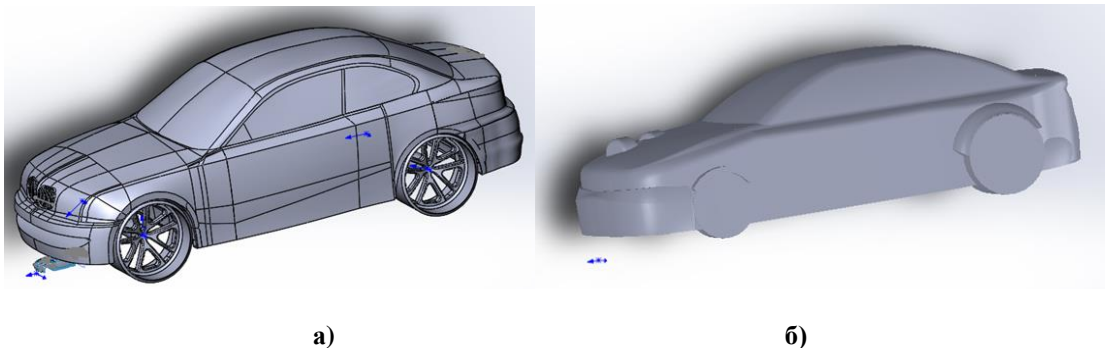


Рис. 1. Базові 3D-моделі автомобіля BMW E46 для розрахунків.

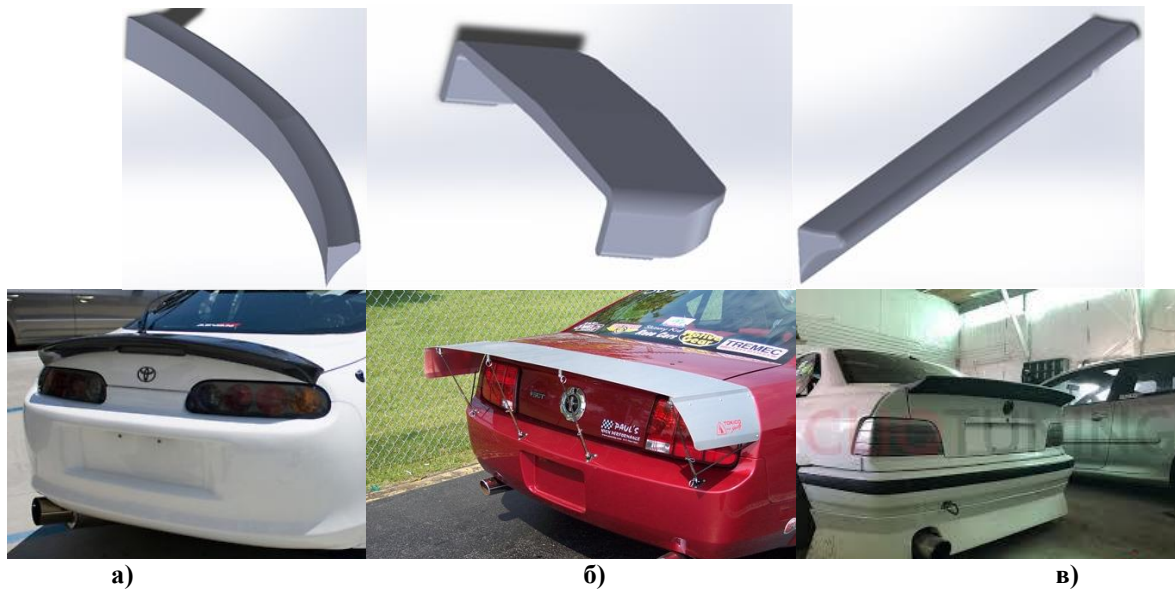
а) – більш детальна 3D-модель без урахування модифікацій, б) – менш детальна 3D-модель з урахуванням модифікацій

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

У роботі були розглянуті спойлери трьох видів:

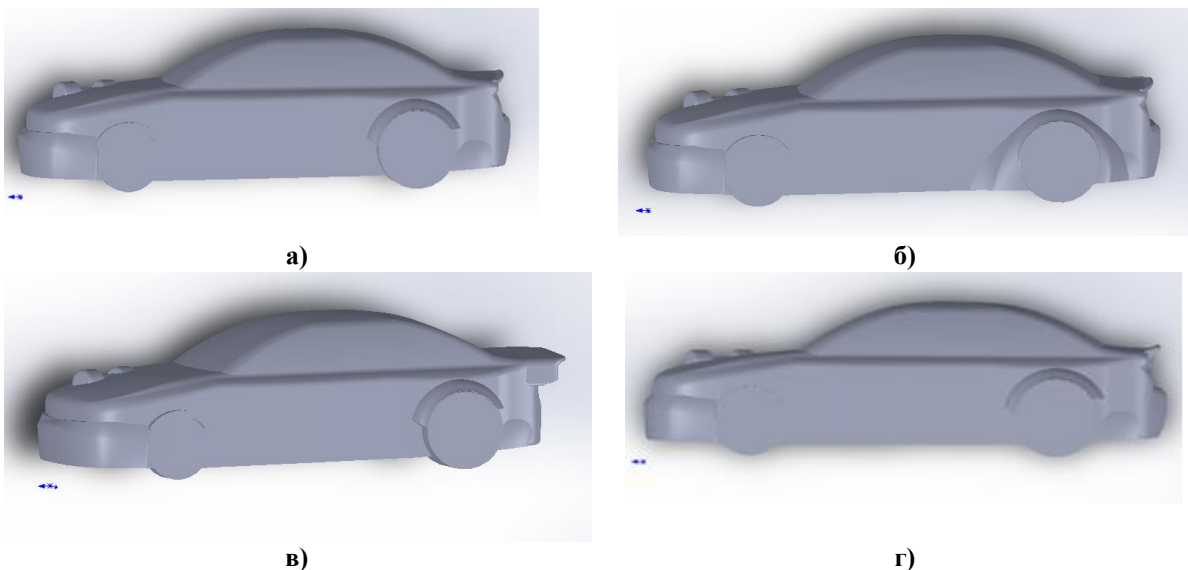
- fin spoiler (перший варіант виконання) представлено у вигляді напівкруглого обода, який встановлюється на задню частину автомобіля, як правило на багажник;
- wing spoiler (другий варіант виконання) має витягнуту форму є продовженням перетину задньої частини автомобіля. Найпопулярніший спойлер в змаганнях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

Геометрія спойлерів представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Варіанти спойлерів, які представлені в роботі.**  
**а) – fin spoiler (перший варіант виконання), б) – wing spoiler (другий варіант виконання),**  
**в) – duck tail spoiler (третій варіант виконання)**

Нижче представлені 3D-моделі автомобілів зі встановленими спойлерами, розрахунок яких було проведено у даній роботі (рис. 3).



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

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

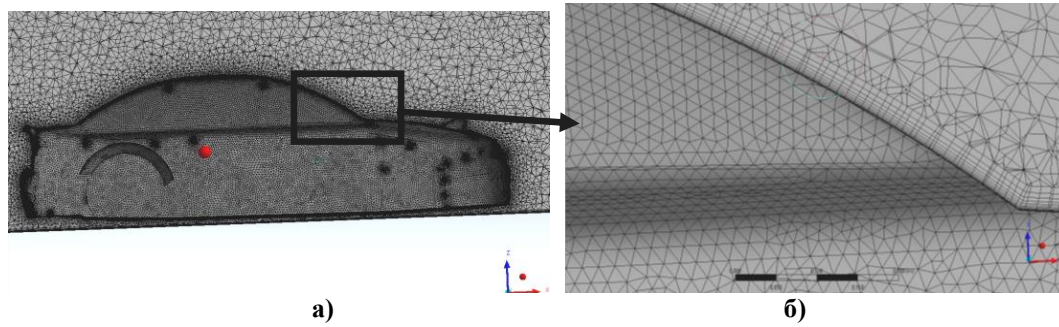


Рис. 4. Сітка скінченних елементів 3D-моделі автомобіля BMW E46.

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

Для моделювання пограничного шару до тетраедричної сітки були додані призматичні ячійки, які охоплюють увесь автомобіль (рис. 4, б). Повторними розрахунками контролювався фактор  $y^+$  [4].

У даному розрахунку використовується  $k-\varepsilon$  модель турбулентності [5]. Стосовно до стаціонарного процесу рівняння складаються як завжди з рівнянь нерозривності та руху (1, 2) (проводиться підсумовування за повторюваними індексами):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} p^* + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_\varepsilon \tau_{ij}) + f_i, \tag{2}$$

де

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

Де  $k$  – питома кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ,  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\nu_t$  – турбулентна в'язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $p$  – осереднений тиск, Па,  $u_i$  – осереднені компоненти вектора швидкості в декартовій системі координат,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $f_i$  – вектор масових сил,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Для замкнення (1,2) у відповідності з  $k-\varepsilon$  моделлю параметри турбулентності підраховуються з рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( k u_j - \nu_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = H_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \varepsilon u_j - \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = H_\varepsilon \tag{4}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \tag{5}$$

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

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

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

Емпіричні константи в наведених рівняннях дорівнюють:

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

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

Нижче представлено результати розрахунків аеродинаміки для різних моделей спойлерів.

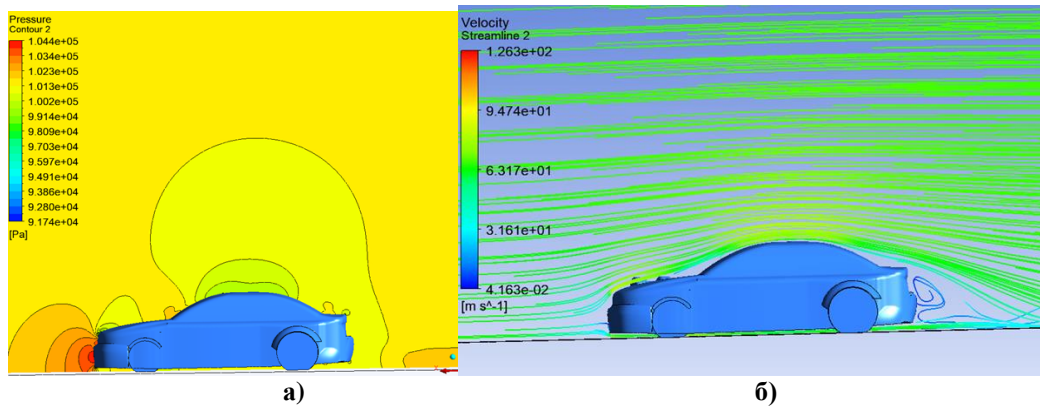


Рис. 5. Результати розрахунків базового варіанту автомобіля.  
а) – показник оточуючого тиску, б) – показник швидкості потоків

На рис. 5 представлений приклад розрахунку автомобіля базової версії. Розрахований аеродинамічний опір складає 1858 Н. Всі розрахунки проводилися при швидкості 240 км/год (така швидкість є вихідною швидкістю автомобіля на дистанції 400 м). У перерахунку на коефіцієнт лобового опору він становить:

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

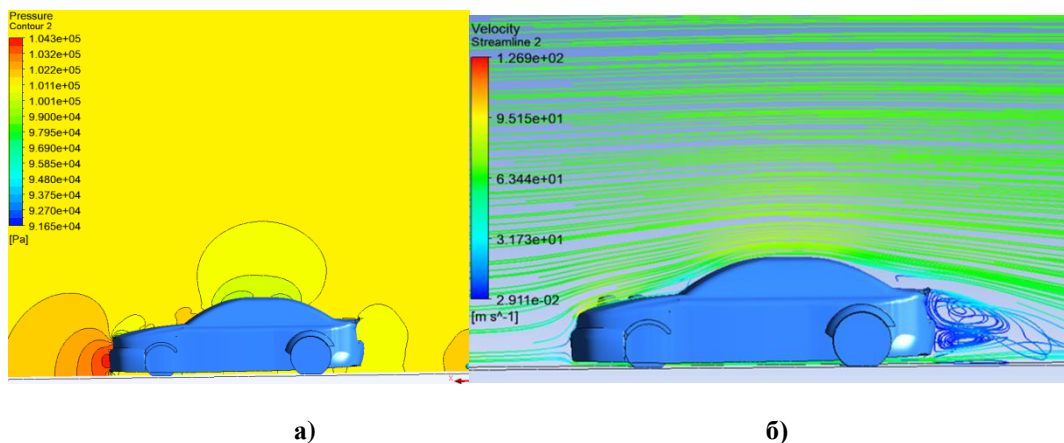
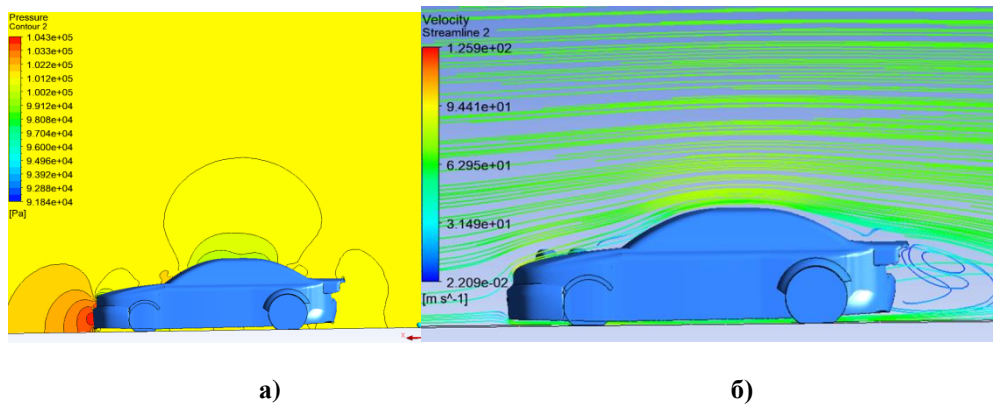


Рис. 6. Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler  
(перший варіант виконання);  
а) – показник оточуючого тиску, б) – показник швидкості потоків

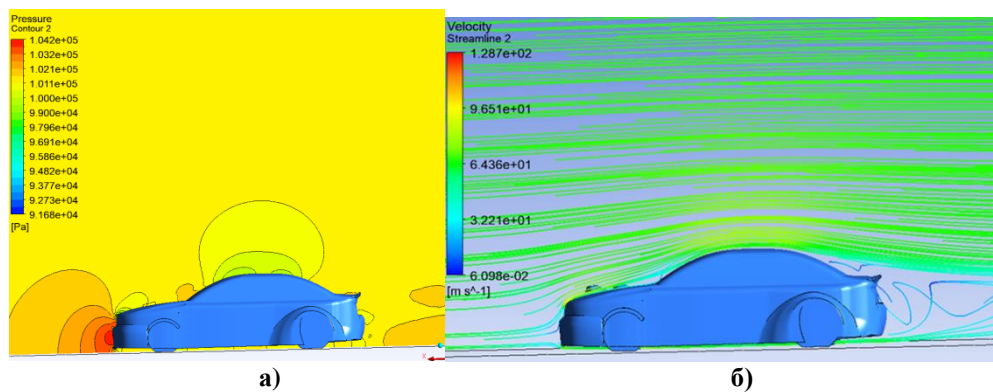
Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання) вказано на рис. 6. При застосуванні такого спойлера аеродинаміка автомобіля покращується. Лобовий опір зменшився до 1606,79 Н у порівнянні із 1856 Н на базовій моделі. Розрахунки проводилися на швидкості 240 км/год. У перерахуванні коефіцієнт опору складає 0,272.



**Рис. 7. Результати розрахунків моделі зі спойлером типу wing spoiler (другий варіант виконання).**

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

Аеродинамічний опір зі спойлером типу wing spoiler (другий варіант виконання) (рис. 7) мало відрізнятися у порівнянні з попереднім. Аеродинамічний опір складає 1612,7 Н, та, таким чином коефіцієнт складе 0,273. Перевагою даного спойлера є простота виготовлення, а недоліком велика матеріаломісткість та, як наслідок, значна маса. Крім того такий спойлер створює більшу притискну силу.



**Рис. 8. Результати розрахунків моделі зі спойлером типу fin spoiler (перший варіант виконання) і закритими фендерами.**

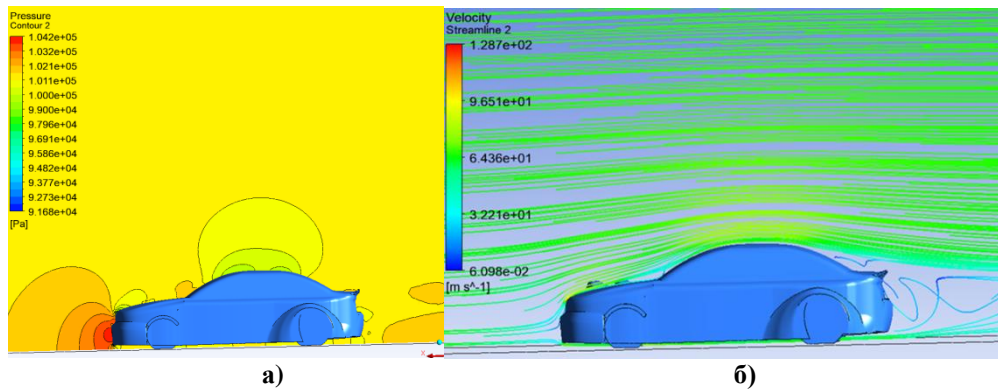
**а) – показник оточуючого тиску, б) – показник швидкості потоків**

Для спойлеру за типом fin spoiler (перший варіант виконання) закриття фендерів (рис. 8) дало лише погіршення аеродинамічних показників. Коефіцієнт в даному випадку буде становити:

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

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

Аеродинамічні показники автомобіля зі спойлером типу duck tail (третій варіант виконання) (рис. 9) кращі, ніж зі спойлером версії 1. Так аеродинамічний опір складає 1606,33 Н. Відповідний коефіцієнт аеродинамічного опору складає 0,272.



**Рис. 9. Результати розрахунків моделі зі спойлером типу duck tail (третій варіант виконання)**

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

### Висновки

Дана робота показує, що є два найкращі варіанти спойлерів. Це спойлер другого та третього варіантів виконання. Спойлер другого варіанту виконання знижує значення аеродинамічного опору практично на ту ж величину, що і спойлер за третім варіантом, але покращує значення притискового зусилля. Такий спойлер доречно використовувати, якщо автомобілю бракує зчеплення з дорогою та стабільності при русі. Якщо автомобіль при русі стабільно тримає дорогу і йому не потрібне додаткове навантаження, то можливе використання спойлера за третім варіантом виконання типу duck tail.

### Список використаної літератури

1. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля. – М: Издательство МГИУ, 2012. – 355 с.
2. Михайловский Е.В. Аэродинамика автомобиля. – М: Машиностроение, 1973. – 224 с.
3. Аэродинамика автомобиля [под ред. В. Г. Гухо; пер.с нем. Н. А. Юниковой]. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
4. Mook D., Nuhait A. Simulation of the interaction between aerodynamics and vehicle dynamics in general unsteady ground effect // Advanced Marine Vehicles Conference, Arlington, VA, U.S.A, 1989. – pp. 430-437. <https://doi.org/10.2514/6.1989-1498>
5. Katz J. Aerodynamics of Race Cars // Annu. Rev. Fluid Mech. 2006 – 38: 27 – 63, pp. 27-65. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>
6. Manan Desai. Experimental and computational aerodynamic investigations of a car / Manan Desai, S.A. Channiwala, H.J. Nagarsheth // WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS, 2008. – vol. 3, pp. 359-368.
7. Himeno R., Fujitani K. Numerical Analysis and Visualization of Flow in Automobile Aerodynamics Development // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993. – vol. 47, pp. 785-790.
8. Nielsen E., Anderson W. Recent improvements in aerodynamic design optimization on unstructured meshes // AIAA Journal, 2000. – vol. 40 (6), pp. 1155-1163.
9. CFX-5 Solver Theory, 2004, 261 p.
10. Черный С.Г. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей / С.Г. Черный, Ю.А. Грязин, П.А. Шашкин // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4. № 2. – С. 74-94.

### References

1. Evgrafov A.N. Aerodinamika avtomobilya [Automobile Aerodynamics]. Moscow, Vidavnictvo MGIU, 2012, 355 p.
2. Mihajlovskij E.V. Aerodinamika avtomobilya [Automobile Aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 224 p.
3. Guho V.G., Aerodinamika avtomobilya. [Automobile Aerodynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 425 p.
4. Mook D., Nuhait A. Simulation of the interaction between aerodynamics and vehicle dynamics in general unsteady ground effect. Advanced Marine Vehicles Conference, Arlington, VA, U.S.A, 1989, pp. 430-437. <https://doi.org/10.2514/6.1989-1498>
5. Katz J. Aerodynamics of Race Cars. Annu. Rev. Fluid Mech, 2006, 38: 27 – 63, pp. 27-65. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>



6. Manan Desai, Channiwala S.A., Nagarsheth H.J. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car. WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS, 2008, vol. 3, pp. 359-368.
7. Himeno R., Fujitani K. Numerical analysis and visualization of flow in automobile aerodynamics development. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.47, 1993, pp. 785-790.
8. Nielsen E., Anderson W. Recent improvements in aerodynamic design optimization on unstructured meshes. AIAA Journal, 2000, vol. 40, pp. 1155-1163.
9. CFX-5 Solver Theory, 2004, 261 p.
10. Chernyi S.G., Griazin Iu.A., Shashkin P.A. Chislennoe modelirovanie prostranstvennykh turbulentnykh techenii neszhimaemoi zhidkosti na osnove k-e modelei [Numerical modeling of spatial turbulent flows of an incompressible fluid based on k-e models]. Computing technology, 1999, no. 2 (4), pp. 74-94.