

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

АВЕРШИН АНДРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ

УДК 629.3.015.3

**ВДОСКОНАЛЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АВТОМОБІЛІВ ДЛЯ СПОРТУ МЕТОДАМИ ЧИСЕЛЬНОГО І НАТУРНОГО
ЕКСПЕРИМЕНТУ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Солодов Валерій Григорович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри теоретичної механіки і гідравліки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент,
Бондаренко Анатолій Ігорович,
Національний технічний університет «ХПІ»
доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування,

кандидат технічних наук, доцент,
Кайдалов Руслан Олегович,
Національна академія Національної гвардії України
заступник начальника науково-дослідного центру
службово-бойової діяльності.

Захист відбудеться «14» березня 2018 р. об 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розіслано « » лютого 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дисертаційної роботи Зростання інтересу до рішень в області аеродинаміки викликане потребами зниження аеродинамічного опору руху автомобіля, та, в кінцевому рахунку, підвищенням економічності, управлінням аеродинамічної притискної (підйимальної) сили, підвищенням стійкості руху. На сьогодні жоден спортивний автомобіль не випускається без спеціальних елементів управління потоком повітря, таких як антикрила, профільоване днище, повітрязабірники. Провідні світові виробники приділяють значну увагу аеродинамічному проектуванню спортивних і гоночних автомобілів.

Однак через високу конкуренцію в автоспорті, результати передових досліджень (часто дуже складних) є конфіденційними і не публікуються у відкритій літературі. Таким чином, відношення опублікованих даних реальних досліджень набагато менше, ніж в інших інженерних дисциплінах (наприклад, аерокосмічній).

В Україні автоспорт розвивається в основному завдяки зусиллям аматорських команд, які приділяють основну увагу вдосконаленню двигуна, трансмісії і підвіски. При цьому аеродинамічні рішення для гоночних автомобілів запозичуються за кордоном, без будь-якого наукового обґрунтування. Тому вдосконалення аеродинамічних характеристик швидкісних і гоночних автомобілів, відпрацювання методів математичного моделювання аеродинамічних характеристик є актуальним завданням і визначає напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана на кафедрі "Теоретична механіка і гідравліка" ХНАДУ і включає результати досліджень, які пов'язані з виконанням наступних науково-дослідних робіт, що фінансуються МОН України, в яких здобувач брав участь як співвиконавець окремих розділів:

- НДР № 15-53-04 «Створення спортивного автомобіля для кільцевих перегонів формули 1600 (за міжнародною класифікацією - E8) на основі попередніх теоретичних та експериментальних досліджень» ДР №0104U002034;

- НДР № 15-53-07 «Розробка та дослідження систем забезпечення безпеки гоночного автомобіля формули E» ДР №0104U002052;

- НДР № 15-53-09 «Розробка розрахунково-експериментального методу дослідження систем безпеки гоночного автомобіля формули 1600» ДР №0104U002068.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення аеродинамічних характеристик автомобілів для спорту методами чисельного і натурного експерименту, шляхом раціонального формоутворення елементів конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- виконати аналіз сучасного стану розвитку аеродинаміки в автомобілебудуванні;

- розробити методику чисельного експерименту по моделюванню внутрішніх і зовнішніх потоків навколо гоночного автомобіля;

- за допомогою чисельного експерименту визначити ефективну форму передніх і задніх антикрил, днища, повітрязабірників;

- за допомогою натурного експерименту підтвердити результати чисельного моделювання передніх і задніх антикрил, днища, повітрязабірників;
- за допомогою чисельного експерименту розробити аеродинамічну форму кузова екомобіля «Shell Eco-marathon».

Об'єкт дослідження процес обтікання повітрям зовнішніх і внутрішніх поверхонь елементів кузова автомобілів для спорту.

Предмет дослідження є параметри що впливають на формоутворюючі елементи-автомобілів для спорту на їх аеродинамічні характеристики.

Методи дослідження. Натурний експеримент з визначення розподілів тиску на поверхні елементів автомобіля; чисельне моделювання обтікання автомобіля, засноване на інтегруванні системи осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої турбулентної течії стисливого газу в тривимірній постановці.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

У результаті проведених досліджень автором розв'язана задача вдосконалення аеродинамічних форм автомобілів для спорту і дано рекомендації щодо поліпшення їх аеродинамічних характеристик, у тому числі:

- шляхом натурних випробувань низки автомобілів для спорту формули Е-8 вперше отримано узагальнені експериментальні дані з аеродинамічних характеристик антикрил, повітрязабірників, дифузору днища;
- дістав подальший розвиток чисельний експеримент для автомобілів для спорту: а саме, вперше в Україні сформульовано постановку чисельного моделювання обтікання антикрил, дифузора, днища та повітрязабірників в інтерференції з кузовом автомобілів для спорту формул Е8, «Shell Eco-marathon» та виконано чисельне дослідження.
- вперше визначено взаємозв'язок між аеродинамічною складовою притискової сили що діє на кузов автомобілів для спорту та формоутворенням дифузору днища, формою розміщення антикрил;
- вперше сформульовано основні принципи формування автомобільного кузова з наднизьким аеродинамічним опором, проведено його аеродинамічний аналіз;
- отримала подальший розвиток теорія криволінійного руху автомобіля, в частині визначення критичної швидкості за рахунок врахування аеродинамічної компоненти;
- вперше отримана залежність розташування та напрямлення вектору повної аеродинамічної сили від набору аеродинамічних елементів, що використовуються в автомобілі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у використанні отриманих рішень при удосконаленні існуючих гоночних автомобілів формули Е-8, а також у створенні нових зразків гоночних автомобілів, що дозволяє істотно підвищити енергетичні та ходові якості з урахуванням прогнозованих експлуатаційних навантажень і швидкостей.

На основі рішень дисертаційної роботи автором спроектований і побудований кузов рекордного екомобіля ХАДІ-34 (2010р) для участі у змаганнях «Shell Eco-marathon».

Результати дисертаційної роботи використовуються Лабораторією швидкісних автомобілів ХНАДУ в процесі проектування нових швидкісних рекордно-гоночних автомобілів, що підтверджується актами впровадження.

Основні результати використані в навчальному процесі кафедри теоретичної механіки і гідравліки ХНАДУ в курсах гідравліка, гідромашини та гідропривід, гідрогазодинаміка, в НДРС (підтверджується актами впровадження).

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто та викладені у роботах [1 – 14]. Серед них: аналіз сучасних методів розрахунку зовнішнього просторового обтікання кузовів швидкісних автомобілів [1,2,3,4]; постановка задачі тривимірного розрахунку зовнішньої течії навколо тіл; розрахунки й дослідження аеродинаміки гоночного автомобіля [5,6,7]; розробка й створення апаратури й програм, необхідних для проведення натурного експерименту щодо збору та обробки даних аеродинамічних характеристик [5]; постановка й проведення натурного експерименту щодо зняття основних аеродинамічних показників з елементів конструкції гоночного автомобіля [5,9,11,14]; зіставлення даних чисельного й натурного експерименту [11,14]; пошук раціональної форми заднього дифузора; визначення найкращого положення й переднього й заднього антикрил; пошук раціональної форми відсіку радіатора [8,9,10]; розробка й аеродинамічний аналіз кузова рекордного екомобіля за формою «Shell Eco-marathon»[7,12,13].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень оприлюднені й обговорені на таких науково-технічних і науково-методичних конференціях ХНАДУ та міжнародних наукових конференціях:

- 68-80 Науково-технічній і науково-методичній конференції Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 2004-2016 рр.);

- Міжнародній науково-технічній конференції «Технічні і економічні перспективи розвитку автотранспортного комплексу і дорожнього будівництва» (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 16-17 травня 2005 р.);

- III Міжнародній науково-практичній та науково-методичній конференції присвяченій 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з дня народження професора А.Б. Гредескула «Нові технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці спеціалістів» (м. Харків, ХНАДУ, 20-21 жовтня 2016 р.).

- XI Міжнародна конференція. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» - (НТУУ «КПІ» - Київ -22-26 травня 2006.)

- «Транспорт, екологія – сталий розвиток» (г. Варна, Болгарія, 18-20 травня 2006);

- «Транспорт, екологія – сталий розвиток» (г. Варна, Болгарія, 21-23 травня 2009);

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 11 наукових працях, у тому числі: 9 статей у наукових фахових виданнях України (з них 9 статей у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз); 2 публікації у закордонних виданнях; 5 тезах у збірниках доповідей наукових конференцій.

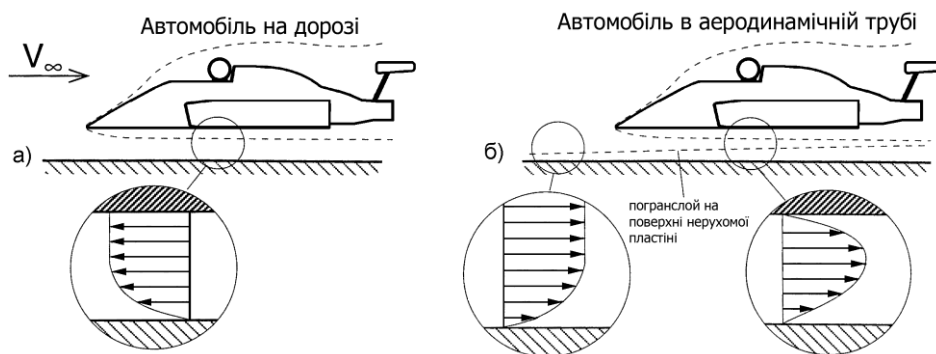
Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 179 сторінок, обсяг основного тексту 137 сторінки, 106 рисунків, 7 таблиць, 3 додатки на 12 сторінках. Список використаних джерел нараховує 114 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, наведено мету і основні завдання досліджень, охарактеризовані новизна, теоретична і практична цінність отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача в отриманні результатів досліджень, наведено дані про апробацію та публікації основних наукових положень, які містить дисертація.

У **першому розділі** представлено критичний огляд теоретичних і експериментальних робіт з проблеми дослідження зовнішньої та внутрішньої аеродинаміки автомобіля. Проведено огляд конструкцій гоночних і спортивних автомобілів. Проаналізовано аеродинамічні рішення форми кузовів та інших елементів гоночних і спортивних автомобілів.

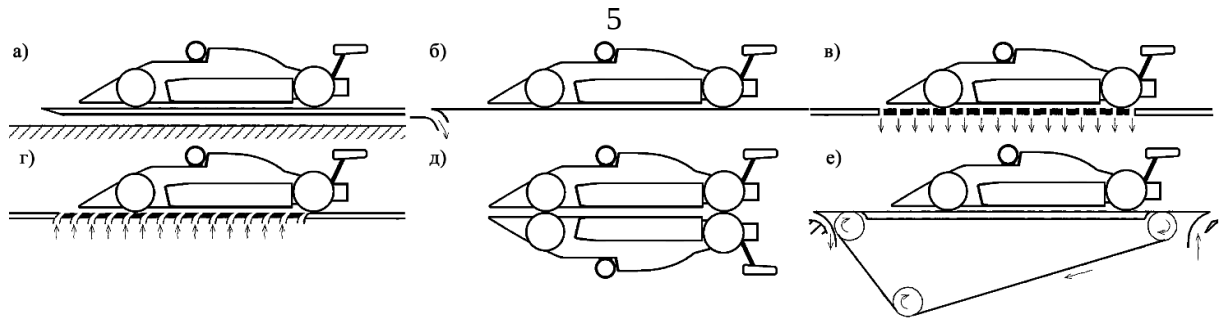
Представлено вибір раціональної базової конструкції гоночного автомобіля класу Е-8. Виконано огляд експериментальних методів дослідження аеродинаміки гоночних і спортивних автомобілів, в якому обговорюються способи вимірювання аеродинамічних характеристик для визначення впливу форми автомобіля на величину лобового опору; аеродинамічну стійкість автомобілів; внутрішніх повітряних потоків в моторних відсіках; генерації шуму; а також питань удосконалення методів аеродинамічних випробувань. Відзначено актуальність дорожніх випробувань, обговорюються особливості взаємодії рухомого автомобіля з повітряним середовищем при випробуваннях в аеродинамічній трубі і на дорозі. Приділено увагу питанням аеродинамічної подібності при моделюванні обтікання дорожнього полотна рис. 1. Моделювання дорожнього полотна за допомогою гладкої пластини призводить до гальмування примежового шару на пластині рис.1 б.



а) реальний рух, б) модель нерухомого дорожнього полотна

Рисунок 1 – Ілюстрація підходів при моделюванні дорожнього полотна

Обговорено пропозиції, що спрямовані на поліпшення імітації полотна дороги в аеродинамічній трубі рис. 2. Зокрема принцип зворотності згідно з яким дорога під моделлю автомобіля повинна рухатися з тією ж швидкістю, що і повітряний потік.



а) тонка пластина, б) відсос погранслою перед моделлю, в) відсос погранслою під моделлю, г) вдування погранслою під моделлю, д) симетричне обтікання, е) стрічка, що рухається.
Рисунок 2 – Способи імітації дорожнього полотна

У розділі дано короткий огляд чисельних методів і моделей дослідження зовнішньої та внутрішньої аеродинаміки гоночних і спортивних автомобілів. У підрозділі 1.3 виконано аналіз розрахункових методів для осереднених рівнянь Нав'є-Стокса, та обґрунтовано вибір розрахункового методу, реалізований у програмному комплексі *MTFS*, розробленому під керівництвом проф. В.Г. Солодова; запропоновано методику його застосування для вирішення завдань зовнішньої аеродинаміки з урахуванням корекції стисливості для малошвидкісних течій.

Даний комплекс інтегрує осереднені рівняння Нав'є-Стокса, записані у формі законів збереження для довільного об'єму, які приводяться до системи диференціальних рівнянь в узагальненій криволінійній системі координат $\psi_i = (\xi, \eta, \zeta)$, і замикаються диференціальною моделлю турбулентності. До системи застосовується скінчено-об'ємна різницева схема за методом Біма-Уормінга.

Алгоритм корекції стисливості для низькошвидкісних течій (С.Меркле) забезпечує зменшення жорсткості матриці конвективного оператора в рівняннях Нав'є-Стокса за допомогою корекції власних значень якобієвих матриць для малих чисел Маха. Для цього додатково до вектора консервативних змінних $Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e)^T$ запроваджується вектор примітивних змінних $q_T = (p, u, v, w, T)^T$ через перетворення $dQ = \Gamma_T dq_T$, тут ρ, p, u, v, w, T - щільність, тиск, компоненти швидкості, температура. У підсумку виходить неявне різницеве рівняння для приросту вектора консервативних змінних ΔQ в загальній формі.

$$\hat{\Gamma}_T \frac{\Delta q_T}{\Delta \tau} + \frac{3(Q^m + \Delta Q) - 4Q^n + Q^{n-1}}{2\Delta t} + \delta_\xi E^{m+1} + \delta_\eta F^{m+1} + \delta_\zeta G^{m+1} = RHS_v(Q^n, Q^{n-1}). \quad (1)$$

де δ_ψ - диференціальні оператори за напрямками; $RHS_v(Q^n, Q^{n-1})$ - права частина різницевої формули, яка містить в'язкі складові; $\hat{\Gamma}_T$ - матриця корекції стисливості. Основним параметром корекції стисливості є місцеве число Маха, обране по характерному розміру, місцевої швидкості звуку. Права частина схеми обчислюється явно. Ліва частина різницевої формули лінеаризується, і отриманий оператор факторизується по просторовим змінним

$$\left[I + \Delta \tau \Gamma_T \Phi_T^{-1} \sum_{(\psi)} D_\psi^m \delta_\psi \right] \Delta Q \approx \prod_{(\psi)} (I + \Delta \tau \Gamma_T \Phi_T^{-1} D_\psi^m \delta_\psi) \Delta Q = \Gamma_T \Phi_T^{-1} RHS^m. \quad (2)$$

Далі виконується розщеплення діагональних матриць Λ_ψ і якобіанів D_ψ^m на складові матриці зі знаковизначеними власними значеннями. Метод і схема зводять різницеву задачу до тридіагональних систем алгебраїчних рівнянь, що розв'язуються скалярними прогонами.

Конвективні члени різницевої схеми розраховуються через вектори потоків на межах гексагональних комірок, обчислених з рішення задачі Римана про розпад довільного розриву, для чого використовувався варіант лінеаризованого рішення (P.Roe). Екстраполяція параметрів вектору Q на грані комірок виконується із застосуванням похідних, обчислених по *ENO* алгоритму (J.Yang) з 2-м порядком точності по простору. Просторові похідні у «в'язких» членах апроксимуються з 2-м порядком точності за допомогою центральних різниць.

У підрозділі 1.4 наведено схему розрахункової області та її апроксимацію, особливості впровадження в обчислювальний алгоритм двох основних диференціальних моделей турбулентної в'язкості: *SA* і *SST*, питання стійкості і постановки граничних умов для рівнянь моделей.

У **другому розділі** роботи розглядається постановка і чисельне моделювання аеродинамічних характеристик гоночного автомобіля формули Е-8.

Твердотільна модель занурена в розрахункову область з розмірами $L \times H \times W = 10l \times 5l \times 5l$, яка описувалася гексагональною сіткою потужністю 7-10 млн. вузлів зі згущеннями поблизу твердих поверхонь для опису прикордонного шару. Замикання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса здійснювалося *SST* моделлю турбулентності Ментера. Для опису течії в прикордонному шарі на деяких елементах конструкцій використовувалися пристінні функції, при цьому мінімальне значення змінної примежового шару вибиралася за умови $Y^+ < 5$. Поза межами розрахункової області передбачалася незбурена течія. Швидкість потоку, що набігав вздовж поздовжньої осі автомобіля, складала 15-50 м/с і збігалася зі швидкістю дорожнього полотна; на видаленні задавався тиск P_∞ стандартної атмосфери.

У розділі також проведено чисельне моделювання переднього і заднього антикрила в двовимірній і тривимірній постановці, і представлено залежності аеродинамічних сил і коефіцієнтів від кута атаки рис. 3-5.

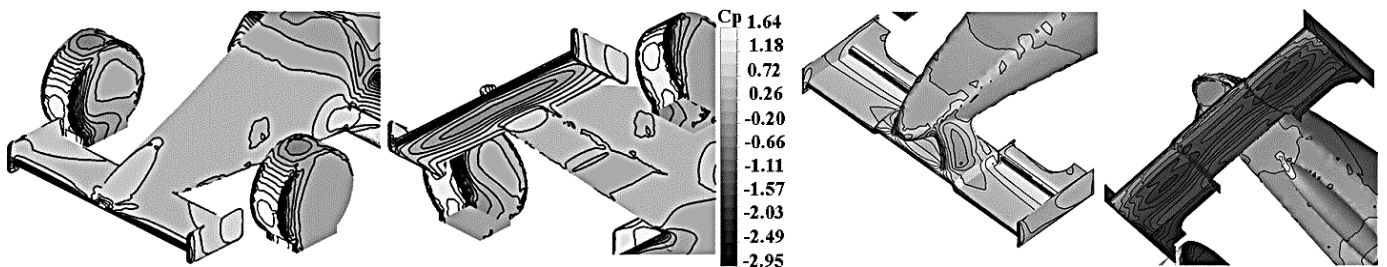


Рисунок 3 – Розподіл коефіцієнта тиску переднього антикрила GOE-624 і «Dallara»

Запропоновано методику проектування заднього антикрила з урахуванням впливу інтерференції кузова. За допомогою чисельного експерименту виявлена інтерференція потоку між кузовом і заднім антикрилом і нерівномірне набігання потоку на заднє антикрило по довжині, яка погіршує його аеродинамічні характеристики.

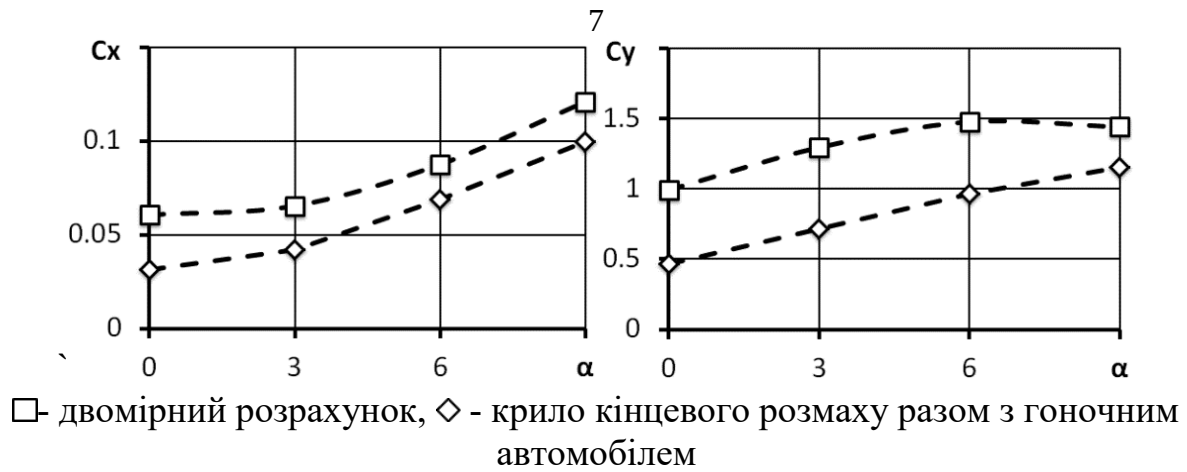


Рисунок 4 – Аеродинамічні характеристики крила з профілем GOE-624 залежно від кута атаки (відстань до екрану 100 мм)

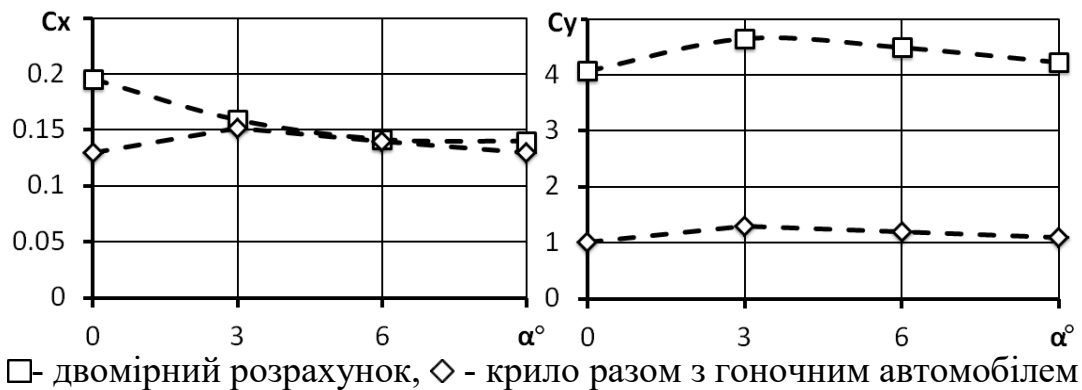


Рисунок 5 - Порівняння характеристик профілю «Dollara» і переднього антикрила на його основі в залежності від кута атаки (відстань до екрану 100 мм)

Збільшення притискної сили, яка діє на заднє антикрило, проводилося в два етапи: а) знайдено краще (2-а) положення заднього антикрила в просторі відносно кузова гоночного автомобіля рис.6; б) здійснено пошук аеродинамічних характеристик заднього антикрила в кращому варіанті розташування (2-а) при різних кутах установки, в межах $+6^\circ$ - 10° рис7.

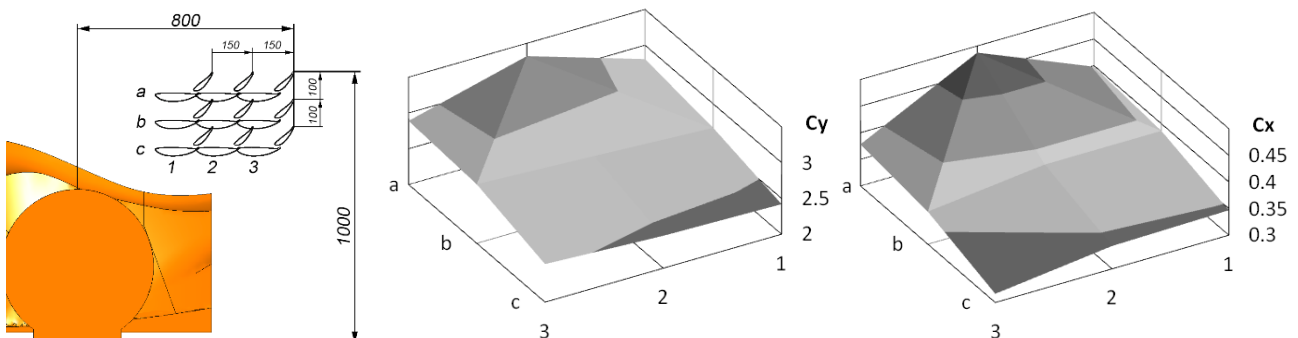


Рисунок 6 – Аеродинамічні властивості заднього антикрила при різних положеннях

На основі аналізу результатів тривимірних розрахунків запропоновано нову геометрію заднього антикрила з закрилком, що відрізняється від вихідної наявністю геометричної скрутки крила з закрилком навколо передньої кромки крила.

Характеристики модифікованого антикрила рис.7 відрізняються більш однорідним полем розподілу коефіцієнта тиску на передній кромці, поліпшенням C_y в порівнянні з базовим на 4.5%.

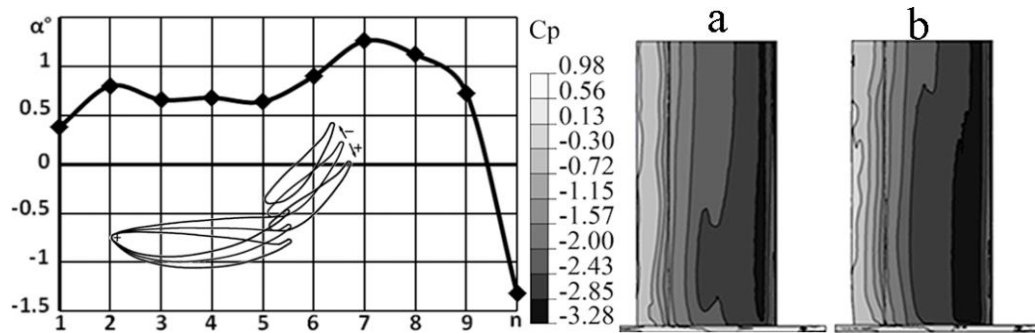


Рисунок 7 – Геометрична крутка антицирила та її вплив на розподіл тиску

Розглянуто принципи аеродинамічного удосконалення кузова і днища гоночного автомобіля формули Е-8. Основним параметром, що змінюється у варіантах заднього дифузора рис.8, прийнятий геометричний коефіцієнт дифузорності $n = A_{\text{вих}} / A_{\text{вх}}$. У зв'язку з конструктивними вимогами форма середньої секції у всіх варіантах дифузора була незмінною з власним коефіцієнтом дифузорності $n_{\text{сп}} = 2,165$.

Розрахунок обтікання кузова з вихідним дифузуром $n = 3,179$ вказав на наявність відриву потоку від верхньої стінки в бічній секції за входом в дифузур, а також значну циркуляційну зону на виході з бічної секції, викликану перетіканням потоку під бічною стінкою, але показав безвідривність течії у середній секції практично до виходу з дифузора. Це вказувало на завищений коефіцієнт дифузорності у бічній секції і стимулювало пошук ефективної форми її верхнього обводу.

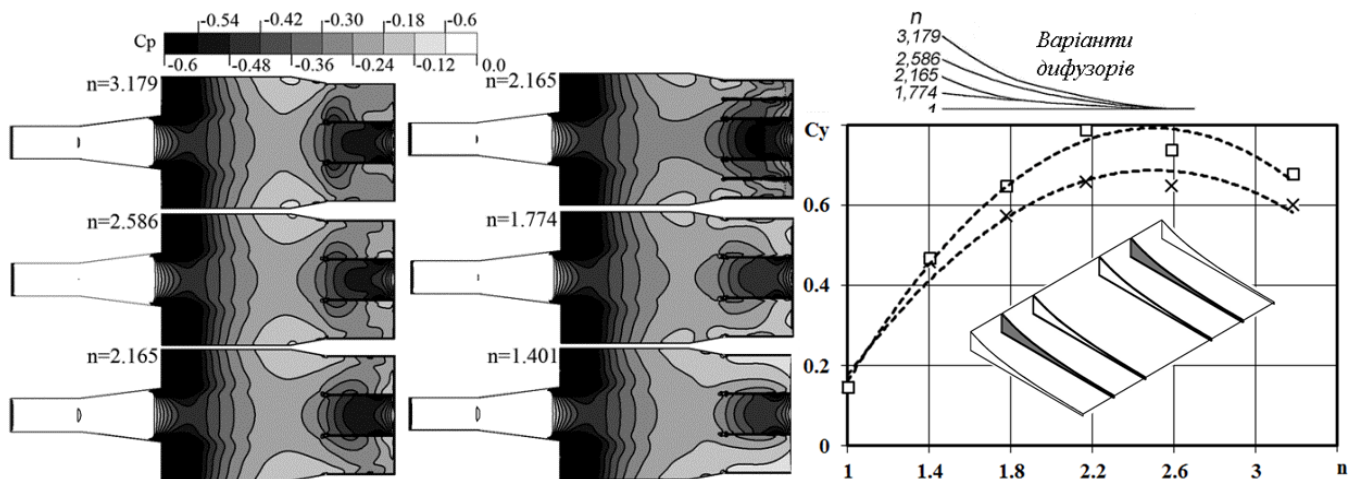


Рисунок 8 – Розподіл тиску на днищі в залежності від ступеня дифузорності і кількості секцій

На рис. 8 надані залежності коефіцієнтів притискної сили від ступеня дифузорності. Зростання коефіцієнта опору C_x при впровадженні заднього дифузора виявляється несуттєвим у порівнянні з приростом коефіцієнта притискної сили, що свідчить про його високу ефективність. Найбільшу притискну силу серед розглянутих варіантів трисекційного дифузора забезпечує конфігурація з $n = 2,165$.

Однак, аналіз течії в цьому варіанті дифузора показує, що вихор, який викликається перетіканням під бічною стінкою, зберігається, знижуючи ефективність бічної секції. В якості заходів щодо зменшення негативного впливу

бічного перетікання розглянуто установку додаткових стінок в бічних секціях. Тим самим була отримана і розрахована серія високоефективних п'ятисекційних дифузоров рис. 8. Порівняно з варіантом $n=2,165$ коефіцієнт притискної збільшився на 20%.

Наступний крок по удосконаленню п'ятисекційного дифузора $n=2,165$ полягав у зміні розташування додаткової стійки. Залежність притискної сили F_y від положення переборки представлено на рис.9.

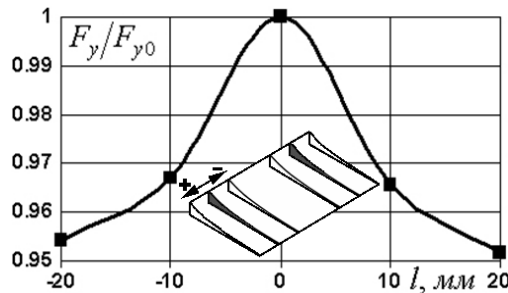


Рисунок 9 – Вплив зміщення бічної переборки на притискну силу

Таким чином, основні джерела зниження ефективності дифузора є такі: а) відрив потоку при обтіканні верхньої стінки дифузора; б) вихрова течія біля бічних стінок дифузора, викликана перетіканням зовнішнього потоку через бічні щілини в простір між днищем і поверхнею дороги. Основні напрями підвищення притискної сили при впровадженні дифузора, це: а) збільшення перепаду тиску між входом і виходом в канал під днищем; б) розгін потоку при обтіканні опуклої поверхні верхньої стінки дифузора. Практичним результатом досліджень стало збільшення притискної сили на 20% у порівнянні з вихідним варіантом. Зіставлення даних чисельного і натурного експерименту показало задовільну відповідність.

У **третьому розділі** виконано моделювання течії в повітрязабірниках і подано рекомендації з вибору ефективної форми.

Розглянуто постановку зв'язаної задачі зовнішньої і внутрішньої аеродинаміки про течію у повітрязабірниках гоночного автомобіля. У розрахункову область задачі про зовнішнє обтікання додано підобласть внутрішнього каналу бічного понтона спільно з радіатором.

Значення витрати повітря, необхідного для ефективного відводу тепла і необхідна площа поверхні охолодження радіатора визначалися з спрощеного аналітичного розрахунку системи охолодження двигуна. У підобласті радіатора використано модель пористого середовища, що підкоряється закону Дарсі $\partial p / \partial x_i = \mu U_i / K_{perm} + 0.5 K_{loss} \rho |U| U_i$, де: μ , K_{perm} , K_{loss} - коефіцієнти динамічної в'язкості, проникності та втрат. Коефіцієнт втрат $K_{loss} = 20$ підбирався з умови перепаду тиску в радіаторі $\Delta P = 0.5$ в серії модельних розрахунків течії через радіатор.

ХАДІ-33 виявлено основні причини, що негативно впливають на внутрішню аеродинаміку: захаращення переднім антикрилом входу до повітрязабірників, загальна конфузорність каналу (відношення площ входу і виходу $A_{вх} / A_{вих} = 4/3$), різке розкриття дифузора у вхідній частини каналу (перед радіатором), обумовлене особливостями компонування.

Аеродинамічне вдосконалення відсіку радіатора автомобіля ХАДІ-33 на першому етапі полягало в аналізі вихідних отворів для моделі: І - з верхнім вихідним отвором; ІІ - з бічним вихідним отвором; ІІІ - з верхнім і бічним отворами рис. 10. ІІІ - й варіант забезпечив найбільшу витрату повітря (таблиця 1). На другому етапі досліджень здійснювався пошук кращого розташування з урахуванням обмежень щодо компонування та інтерференції зовнішніх елементів на основі ІІІ-го варіанту модифікації радіаторного відсіку.

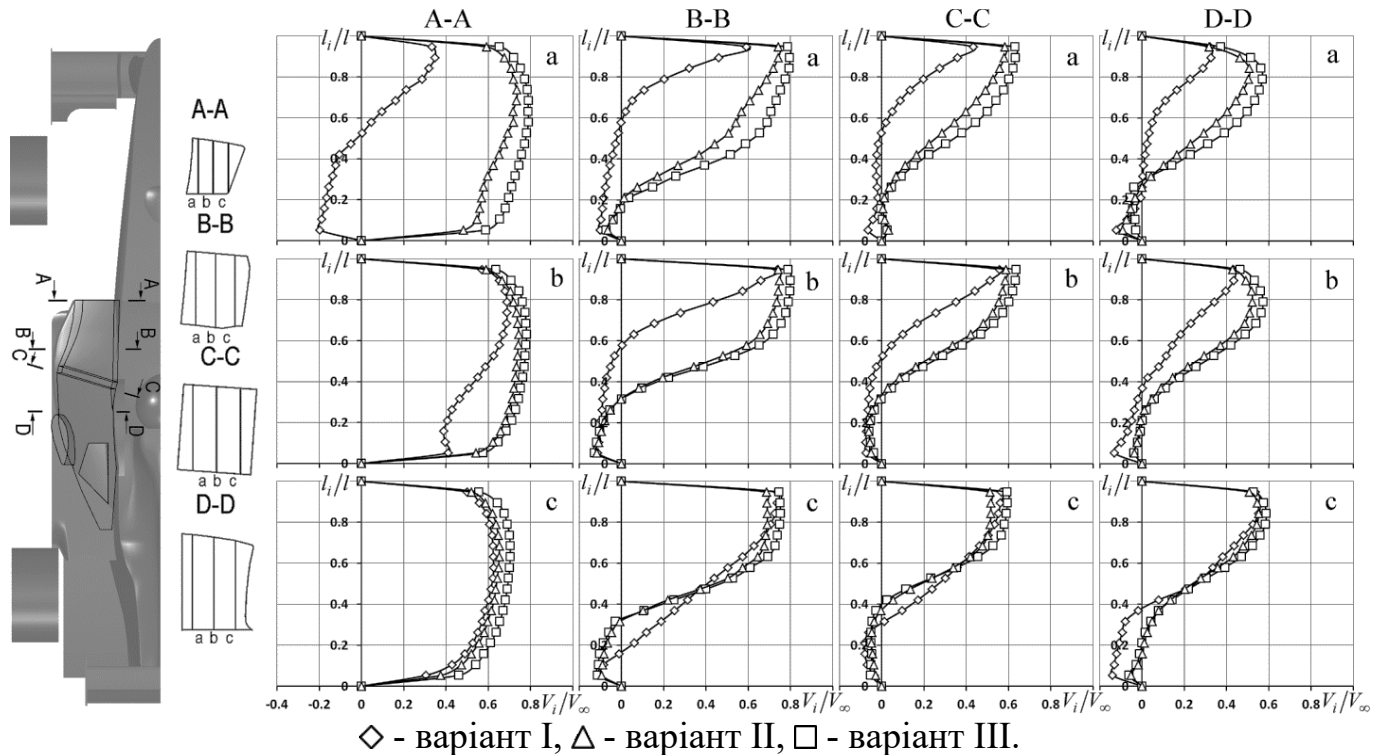


Рисунок 10 – Удосконалення вихідних отворів відсіку радіатора

Таблиця 1– Витрата повітря через радіатор

	I	II	III
C_x	0.83	0.87	0.87
C_y	-0.86	-0.84	-0.87
Масова витрата кг/с	0.789	1.222	1.442

У серії розрахунків варіювалося розташування вхідного перетину в повітрязабірник по висоті рис.11.

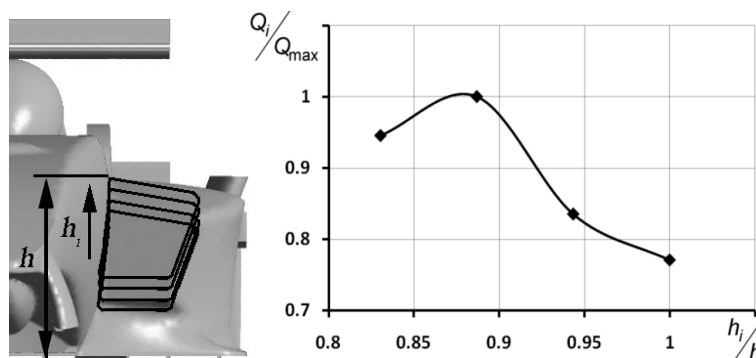


Рисунок 11 – Залежність витрати повітря через радіатор від розташування вхідного перетину по висоті повітрязабірника

Таким чином, на основі аналітичного розрахунку системи охолодження і чисельного моделювання визначено необхідну витрату повітря і мінімальну площу охолоджувальної поверхні радіатора, а також найкраще для даної компоновки розташування входних і вихідних отворів відсіку радіатора.

Четвертий розділ роботи присвячений питанням експериментального дослідження аеродинаміки гоночного автомобіля та порівняння з чисельними дослідженнями.

Для тестування чисельного методу виконано моделювання обтікання моделі гоночного автомобіля Естонія-25 в масштабі 1:10 і проведено зіставлення з аеродинамічним експериментом в аеродинамічній трубі рис. 12. (труба Т-1 ХУПС).

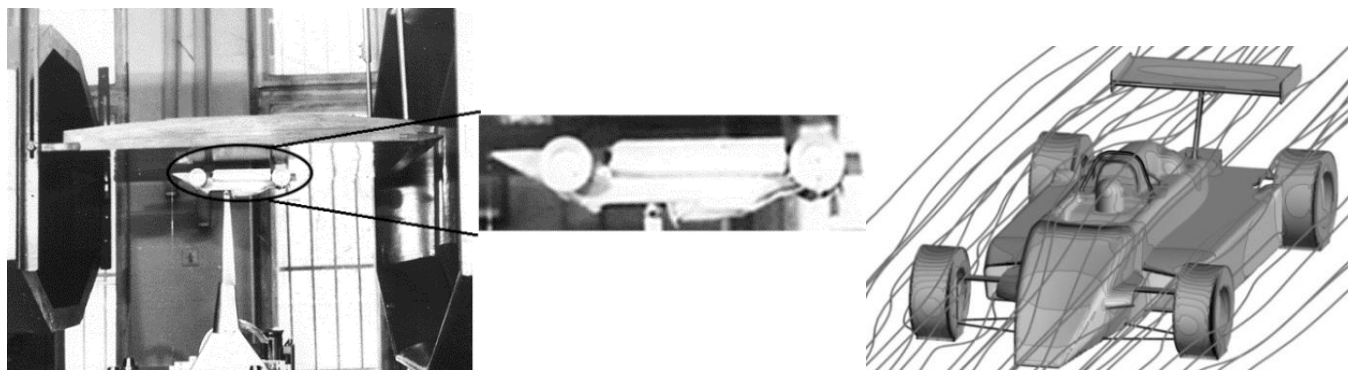


Рисунок 12 – Фізична та чисельна моделі автомобіля в аеродинамічній трубі

На рис. 13 показано, що залежності C_x, C_y від швидкості набігаючого потоку для Естонія-25 відповідають даним модельного експерименту і встановлено вплив екрана на аеродинамічні характеристики.

$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho_\infty \cdot v_\infty^2 \cdot S_m}, \quad C_y = \frac{F_y}{0.5\rho_\infty \cdot v_\infty^2 \cdot S_m}$$

Тут S_m – площа міделевого перерізу автомобіля,

F_y, F_x – вертикальна і горизонтальна компоненти аеродинамічної сили,

v_∞, ρ_∞ – швидкість і густина незбуреного потоку.

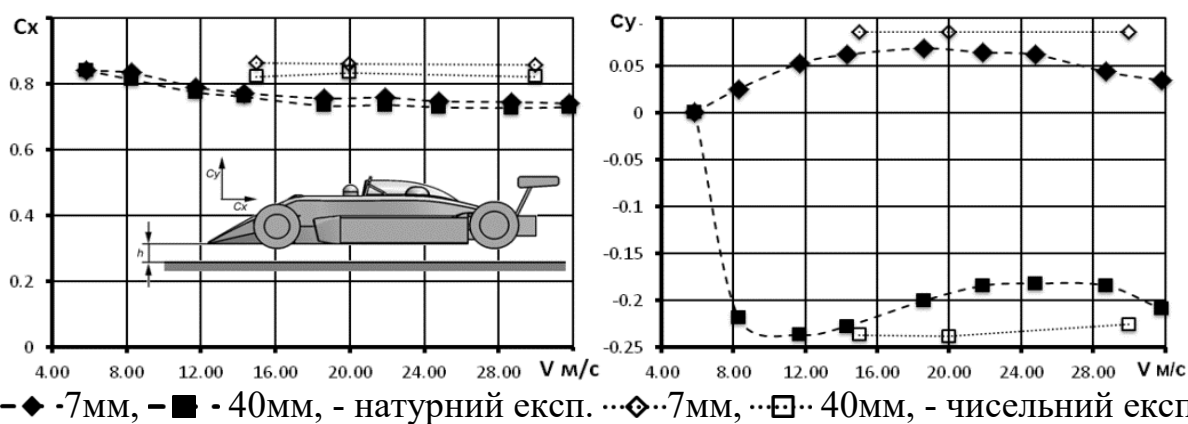


Рисунок 13 – Аеродинамічні коефіцієнти залежно від швидкості набігаючого потоку, і відстані до екрану

Обрано прямий метод дорожніх випробувань гоночних автомобілів ХАДІ-31, ХАДІ-33 рис. 14 у зв'язку з відсутністю аеродинамічної труби, і через відносну

дешевизну дорожніх випробувань. Описано постановку, проведення та обробку експерименту, обладнання яке було використане.

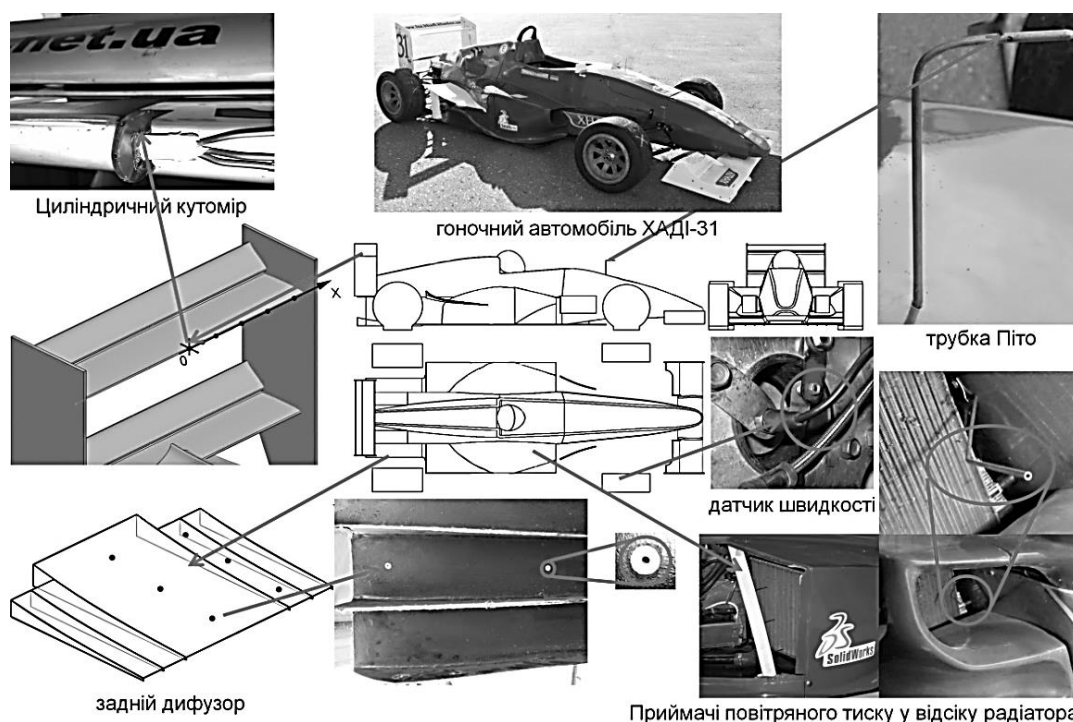
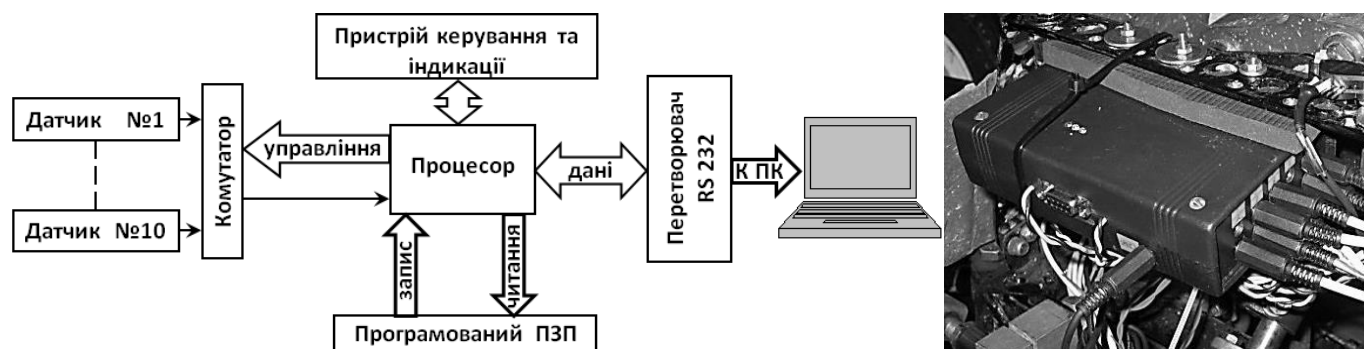


Рисунок 14 – Розміщення контрольно-вимірювальних точок на гоночному автомобілі

Гоночний автомобіль класу Е-8 має наступні основні характеристики: двигун об'ємом 1600 см², потужністю 190 кВт. Габарити гоночного автомобіля: довжина $l=3950$ мм, висота кокпіта $h=860$ мм, ширина $b=1300$ мм, база передніх коліс - 1650 мм, ширина колеса - 220 мм, діаметр - 535 мм, база задніх коліс - 1650 мм, ширина колеса - 280 мм, діаметр - 565 мм. Кузов типу «монокок» обладнаний повітрязабірниками з поперечним перерізом входу. Автомобіль оснащений переднім і заднім антикрилами.

Вимірювальний комплекс рис. 15, розроблений для проведення натурального експерименту з визначення тиску на поверхні кузова гоночного автомобіля залежно від швидкості руху, складався з частин: 1) блок прийому і обробки сигналів; 2) датчики тиску, 3) датчик швидкості (датчик Холла). Блок прийому та обробки сигналів представляв собою аналого-цифровий перетворювач рис. 15 із записом даних у внутрішню пам'ять пристрою для подальшої обробки на ПК.

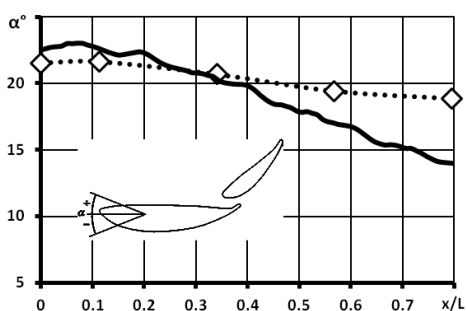


а) – блок-схема АЦП сигналів; б) – блок прийому та обробки сигналів

Рисунок 15 – Вимірювальний комплекс

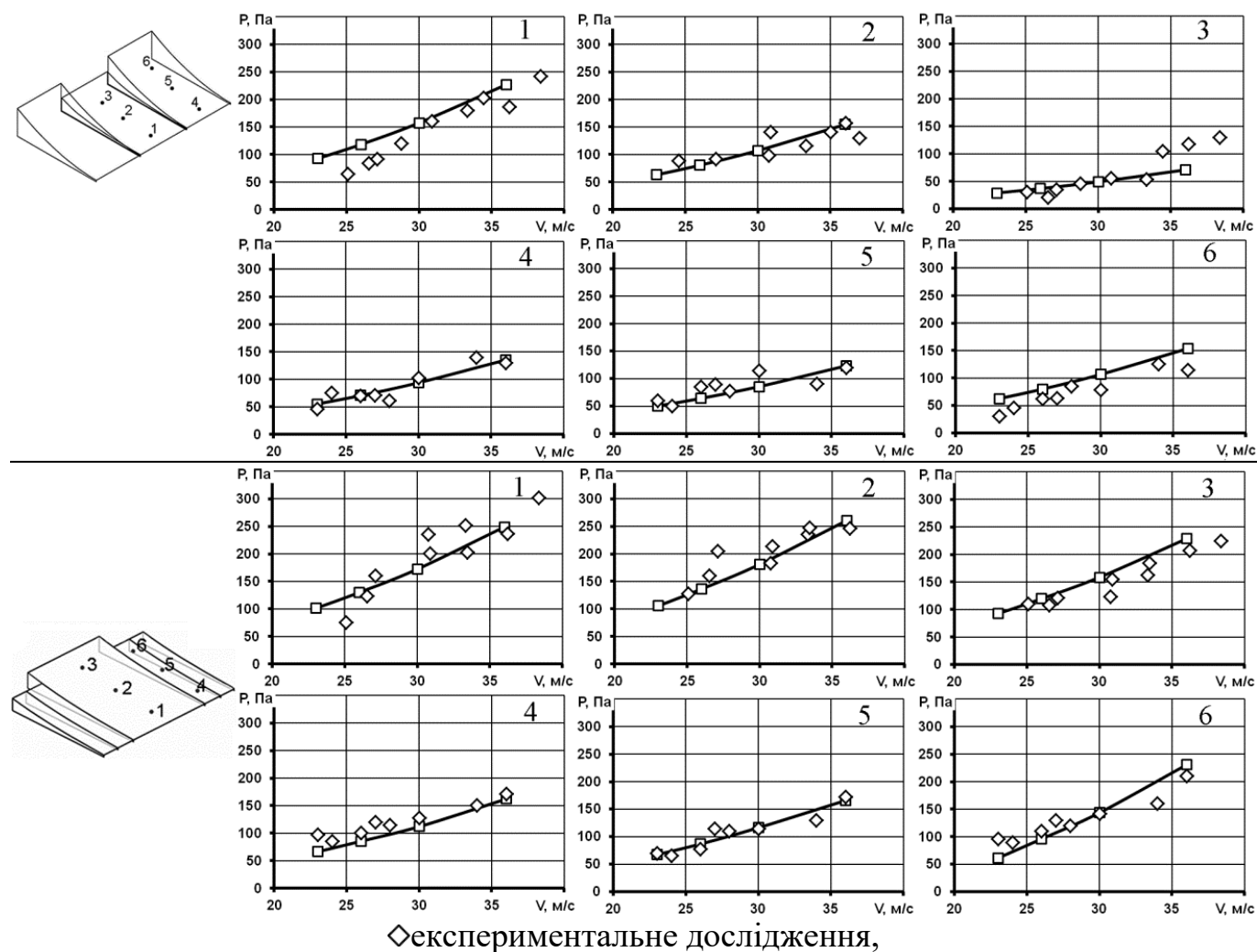
Для вимірювання тиску на поверхні стінки кузова гоночного автомобіля використовувалися диференціальні датчики MPXV5004DP. Для вимірювання тиску у відсіку радіатора в характерних точках встановлювалися приймачі повітряного тиску. Положення контрольних точок на поверхні кузова вибиралося виходячи з наявності на поверхні найбільших локальних градієнтів тиску. Тарування датчиків проводилося порівняльним методом.

За допомогою розробленого комплексу виконано вимірювання і представлено результати експериментальних досліджень заднього антикрила дифузора, радіатора, рис.16-18.



◇ експериментальні. — чисельні значення

Рисунок 16 – Напрямок кутів атаки на задньому антикрилі внаслідок інтерференції



◇ експериментальне дослідження,

□ чисельне моделюванням у вихідній і поліпшеній конфігурації

Рисунок 17 – Порівняння тиску в контрольних точках

Аналіз результатів по дифузору вказав на наявність відривної течії у вихідній конфігурації бічних відсіків дифузора, що свідчить про його неефективну роботу. Вимірювання кутів атаки заднього антикрила за допомогою циліндричного кутоміра виявило нерівномірне обтікання заднього антикрила внаслідок інтерференції кузова і антикрила. Дослідження у відсіку радіатора виявили нерівномірне обдування радіатора потоком з повітрязабірника. У верхній частині радіатора обдув більш інтенсивний, в нижній частині радіатора існує «застійна зона» рис.18.

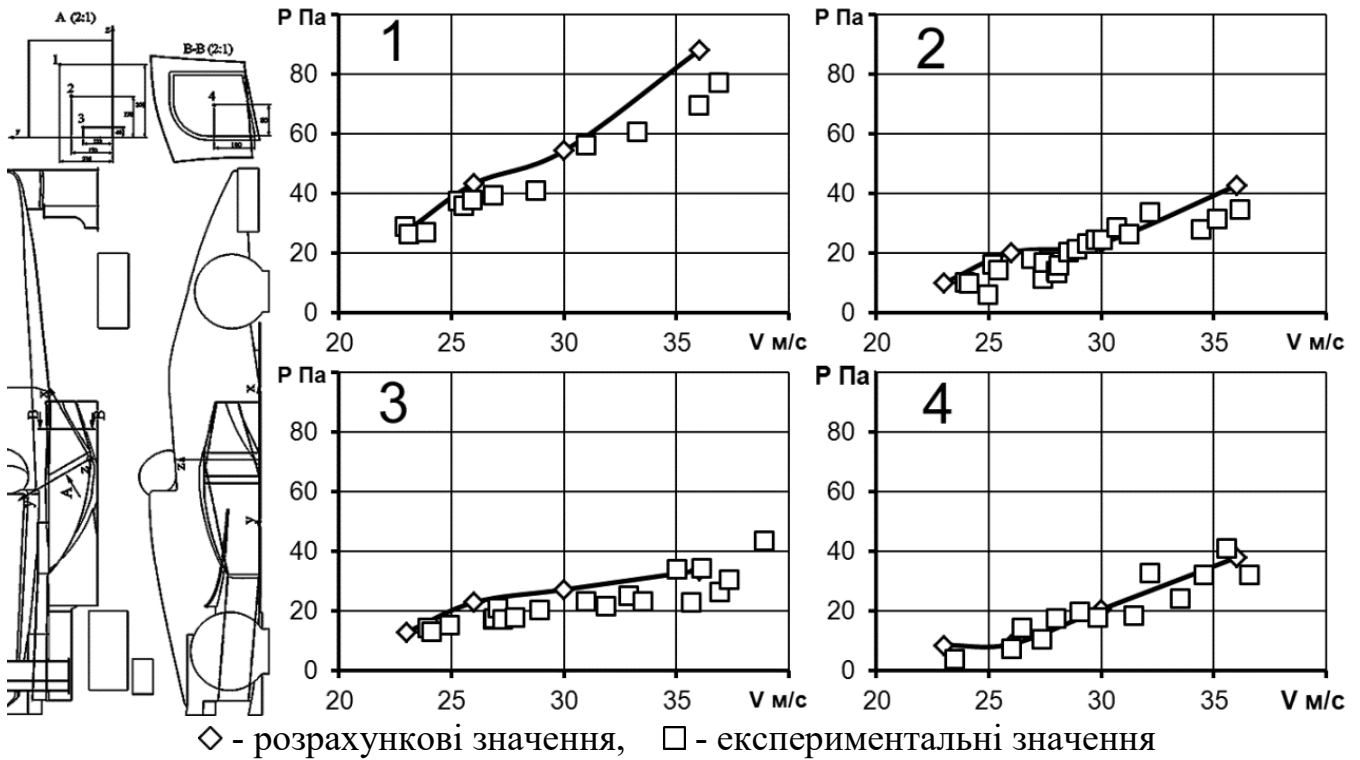


Рисунок 18 – Зіставлення чисельного і натурного експерименту

Виконано зіставлення даних чисельного і натурного експерименту по контрольних точках у відсіку радіатора рис. 18 на швидкостях 23, 26, 30, 36 м/с. Підвищений тиск в контрольній точці 1, у порівнянні з контрольними точками 2, 3 (за радіатором), показали нерівномірне обдування радіатора. У верхній частині радіатора (точка 1) обдув більш інтенсивний, в нижній частині існує «застійна зона». У результаті аналізу течії через радіаторний відсік гоночного автомобіля виявлені основні причини, що справляють негативний вплив на внутрішню аеродинаміку радіаторного відсіку. Такими причинами стали захащення переднім антикрилом перед повітрязабірниками, загальна конфузорність каналу (відношення площ входу й виходу $A_{вх} / A_{вих} = 4/3$), а також різке розкриття дифузора у вхідній частині каналу (перед радіатором), обумовлене конструктивними особливостями компонування гоночного автомобіля.

У **п'ятому розділі** розглянуто питання аеродинамічного проектування екомобіля з наднизьким аеродинамічним опором для участі у змаганнях «Shell Eco-marathon».

Представлено чисельний аналіз базових зовнішніх форм кузова біля екрану рис.19, що дозволило мінімізувати вплив особливостей форми кузова екомобіля. Запропоновано та розглянуто можливі компонувальні рішення для екомобілів рис.20

для участі у змаганнях «Shell Eco-marathon». Розглянуто принципи проектування форми кузова екомобіля з мінімальним аеродинамічним опором.

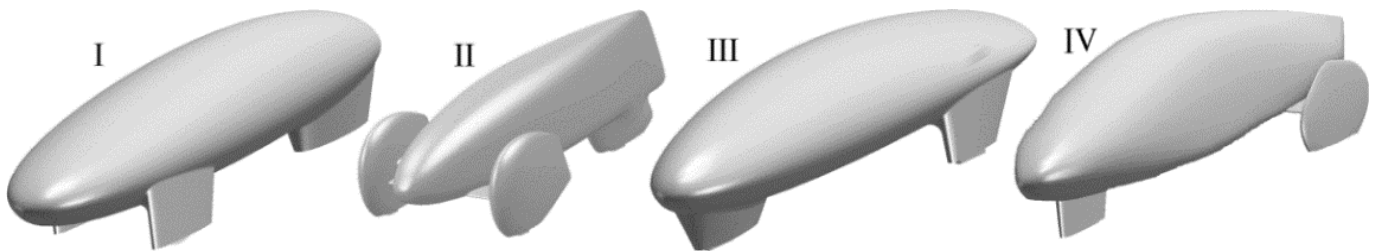
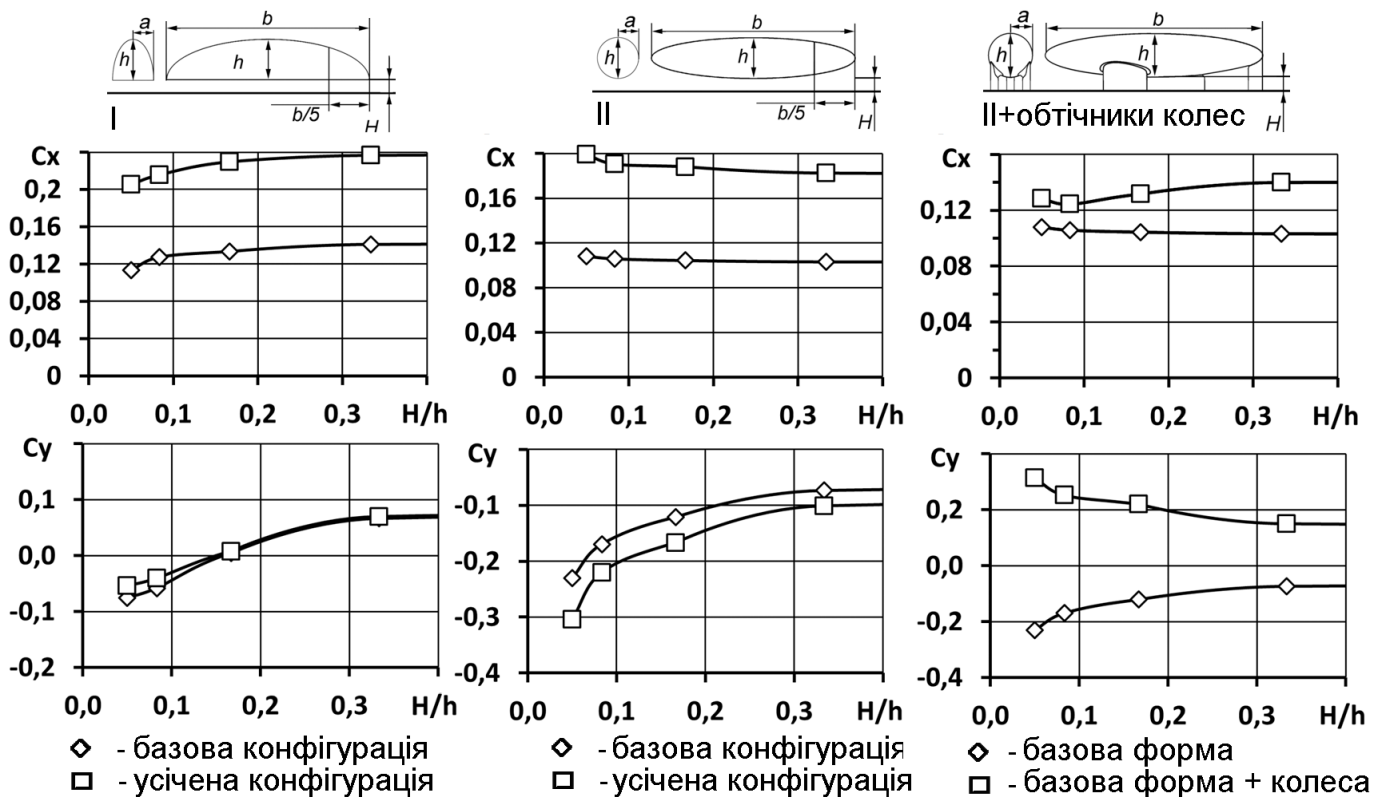


Рисунок 20 – Типи конструкцій екомобіля для змагань «Shell Eco-marathon»

Результати чисельного дослідження можливих компоновальних рішень для екомобілів формули «Shell Eco-marathon» подано в таблиці 2.

Таблиця 2 Аеродинамічні властивості типів екомобіля

	I	II	III	IV
Cx	0.105	0.134	0.118	0.13

Висновок: вивчено вплив бічного вітру на аеродинаміку екомобілів формули «Shell Eco-marathon», який може суттєво впливати на результати змагань. На рис.21 показано аеродинамічні характеристики екомобіля при бічному вітрі 5 м/с під різними кутами атаки і при швидкості руху екомобіля 30 м/с.

У розділі сформульовано загальні вимоги до проектування автомобілів з низьким аеродинамічним опором. Розглянуто типові варіанти конструкції екомобілів з низьким аеродинамічним опором.

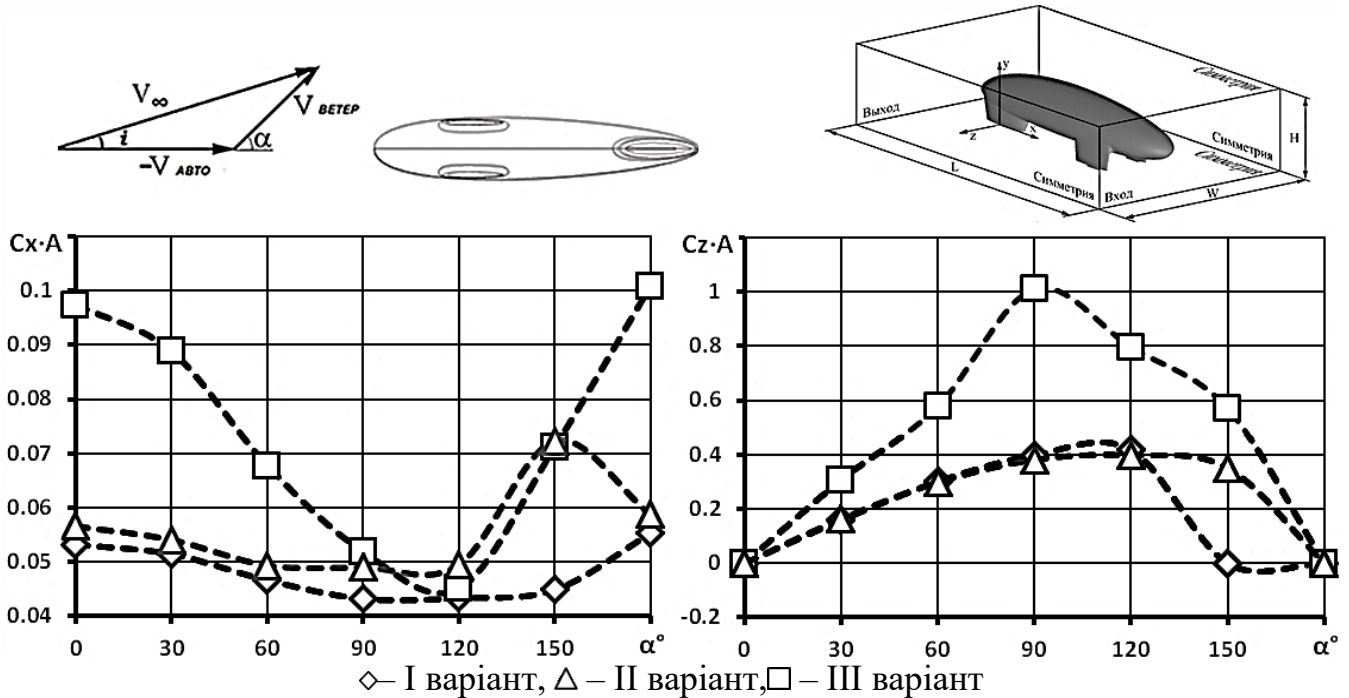


Рисунок 21 – Вплив бічного вітру на аеродинамічні характеристики екомобіля

Показано, що значний вплив на аеродинамічний опір чинять обтічники коліс; бічний вітер істотно впливає на аеродинамічні характеристики екомобіля, що дає змогу прогнозувати тактику змагань з урахуванням погодних умов. На підставі одержаних залежностей запропоновано форму екомобіля з мінімальним опором.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі вдосконалення аеродинамічних характеристик гоночних автомобілів формули Е-8 і екомобіля з наднизьким аеродинамічним опором методами чисельного і натурного експерименту. Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Сформульовано основні напрямки вдосконалення аеродинамічних характеристик елементів кузова гоночних автомобілів на основі аналізу та узагальнення вітчизняних та закордонних літературних даних.

2. Запропоновано математичну модель та розвинуто розрахунковий метод, що дозволяє адекватно визначати аеродинамічні характеристики розглянутих гоночних автомобілів і замінити коштовний натурний експеримент.

3. За результатами натурного експериментального дослідження вихідної конфігурації дифузора, радіатора, антикрил показано необхідність їх аеродинамічного удосконалення: а) встановлено негативний вплив інтерференції між антикрилом і кузовом; б) виявлено резерви збільшення притискної сили за рахунок удосконалення переднього антикрила.

4. Виявлено основні джерела, що знижують ефективність дифузора днища: а) відрив потоку при обтіканні верхньої стінки дифузора, б) вихрова течія біля бічних стінок дифузора з перетіканням зовнішнього потоку через бічні щілини в простір між днищем і поверхнею дороги; на основі натурного експерименту і

чисельного аналізу варіантів заднього дифузора гоночного автомобіля формули Е-8 встановлено основні аеродинамічні механізми підвищення притискної сили при впровадженні дифузора.

5. Встановлено залежності аеродинамічних характеристик антикрил залежно від кута атаки і близькості екрана на основі чисельного моделювання обтікання передніх і задніх антикрил спільно з кузовом автомобіля.

6. Запропоновано підхід та спроектовано нове антикрило з покращеною на 4.5% притискною силою на підставі чисельного моделювання шляхом пошуку кращого кута атаки в поперекових перетинах.

7. Запропоновано рішення щодо профілювання днища, яке спрямоване на ефективне відновлення тиску у задньому дифузори; збільшено притискну силу на 20% у порівнянні з вихідним варіантом.

8. Для прийнятого компоновання кузова і повітрязабірників гоночного автомобіля на підставі рішення зв'язаної задачі зовнішньої і внутрішньої аеродинаміки визначено найкраще розташування вхідних і вихідних отворів відсіку радіатора; шляхом пошуку раціонального положення вхідних та вихідних отворів до системи охолодження збільшено витрату повітря крізь радіатор на 45%.

9. Уперше сформульовано основні принципи формування автомобільного кузова з наднизьким аеродинамічним опором з урахуванням бокового вітру; уперше в Україні спроектовано і побудовано кузов рекордного екомобіля (2010 р.) для участі в змаганнях формули «Shell Eco-marathon» із коефіцієнтом аеродинамічного спротиву $C_x=0.13$.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Авершин А.Г. Аэродинамическое совершенствование заднего диффузора гоночного автомобиля формулы 1600 / А.Г. Авершин, Ю.В. Стародубцев. // Автомобільний транспорт. – 2005. – № 17. – С.21–25.

2. Авершин А.Г. Математическое моделирование порывов ветра на магистральных автодорогах с учетом рельефа местности и насаждений [текст] / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев // Автомобільний транспорт. – 2005. – № 16. – С.232–235

3. Авершин А.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических характеристик гоночного автомобиля ХАДИ-31 [Текст] / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов // Автомобільний транспорт. Сб. наук. пр. – Х., ХНАДУ. – 2005. – № 16. – С.228-231.

4. Авершин А.Г. Усовершенствование внешней аэродинамики гоночного автомобиля формулы 1600 [текст] / А.Г. Авершин, Ю.В. Стародубцев // Промислова гідраліка і пневматика: Всеукраїнський наук.–техн. журнал. – Вінниця: ВГАУ. – 2007. – №16. – С.23-26.

5. Авершин А.Г. Экспериментальное исследование аэродинамики гоночного автомобиля Х-31 [текст] / А.Г. Авершин // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Сб. наук. пр. Харків. – 2009. – №44 – С39-44.

6. Авершин А.Г. Аэродинамическое совершенствование радиаторного отсека гоночного автомобиля ХАДИ-33 [текст] / А.Г. Авершин // Автомобільний транспорт. Харків:, –№29, –2011, –С. 84-90.

7. Авершин А.Г. Принципы аэродинамического проектирования внешних форм экомобиля для соревнований Shell "eco-marathon", [текст] / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов // Східно-Європейський журнал передових технологій, Харків:, –2012, –4/7(58), – С. 21-25.

8. Авершин А.Г. Аэродинамическое проектирование внешних форм экомобиля [текст] / А.Г. Авершин // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. –2012. –№56. – С. 138–143.

9. Авершин А.Г. Разработка эффективной формы воздухозаборника гоночного автомобиля ХАДИ-31 / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сб. наук. пр. – Х., НТУ «ХПІ». – 2014. – вып.1(1044). – С.198-204. – ISSN 2078-774X.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Авершин А.Г. Исследование аэродинамики заднего диффузора гоночного формулы 1600 / А.Г. Авершин, Ю.В. Стародубцев // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XII научно-техническая конференция с международным участием, 18–20 мая 2006 г.: – Варна, Болгария, 2006. – С. 129–136.

11. Avershin A.G. Experimental study of aerodynamic characteristics of racing car/ A.G. Avershin, V.G. Solodov. // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XVI научно-техническая конференция с международным участием, 21–23 мая 2009 г.: – Варна, Болгария, 2009. – С. 462–469.

12. Авершин А.Г. Опыт проектирования аэродинамической формы энергоэффективного автомобиля для соревнований Shell "eco-marathon" / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов, Е.В. Аль-Дара, // Матеріали Всеукраїнського науково-методичного семінару "Застосування ANSYS в науково-дослідній роботі студентів" 14 грудня 2015 р., ХНАДУ. – 2015.– Режим доступ http://af.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F_Automobile/TeorMech/Seminar_Ansys/Avershin_T3.pdf.

13. Авершин А.Г. Опыт проектирования внешних форм экомобиля для соревнований Shell "eco-marathon" / А.Г. Авершин, В.Г. Солодов. // Новейшие технологии развития конструкции, производства, эксплуатации, ремонта и экспертизы автомобиля: Международная научно-практическая конференция по случаю Дня автомобилиста и дорожника посвященная 90-летию проф. Говорущенко Н. Я., 15-16 октября 2014 г.: тезисы докладов. – Харьков, 2014. – С. 15 – 17.

14. Авершин А. Г. Совершенствование аэродинамических характеристик гоночных автомобилей методами численного и натурного эксперимента / А.Г. Авершин // Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовки фахівців: Міжнародна науково-практична та науково-методична конференція присвячена 85-річчю кафедри автомобілів, та 100-річчю з дня народження професора А.Б. Гредескула, 20-21 жовтня 2016 р.: наукові праці. – Харків, 2015. – С. 224 – 225.

АНОТАЦІЯ

Авершин А.Г. Удосконалення аеродинамічних характеристик гоночних автомобілів ХНАДУ методами чисельного і натурного експерименту . - Рукопис .

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 . автомобілі та трактори. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена питанням зовнішньої і внутрішньої аеродинаміки гоночних автомобілів. Проведено чисельні і натурні експерименти на базі автомобілів ХАДІ-25,31,33,34 лабораторії швидкісних автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Особлива увага приділяється питанням аеродинамічного вдосконалення заднього дифузора , переднього і заднього антикрила, радіаторного відсіку.

У роботі представлені результати аеродинамічних досліджень у вигляді таблиць і графіків . Дана оцінка впливу різних факторів на аеродинамічні властивості гоночних автомобілів і запропоновано шляхи їх поліпшення.

Для натурних випробувань гоночного автомобіля використаний прямий метод дорожніх випробувань. Важливе місце в роботі займає зіставлення чисельного експерименту з натурним.

Також в роботі розглядається досвід проектування кузова гоночного автомобіля з наднизьким аеродинамічним опором ХАДІ -34.

Ключові слова: аеродинаміка, гоночний автомобіль, антикрило, дифузор, радіатор, аеродинамічні сили, обтікання.

ABSTRACT

Avershyn AG The perfection of aerodynamic performance of cars for sports by numerical methods and model experiment. - Manuscript.

Thesis for candidate's degree in technical sciences by speciality 05.22.02 – automobiles and tractors. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov, 2018.

The Thesis is dedicated of external and internal aerodynamics of racing cars formula E-8. Based on racing car KhADI-25,31,33,34 of Laboratory of Speed Automobiles of KhNAHU experimental and numerical investigations are conducted. Problem of aerodynamic improvements of rear diffuser, front and rear wing, and radiator section special attention is paid.

Results of aerodynamic research presented in the tables and graphs. Various factors on the aerodynamics of racing cars assess the impact and ways of improvement are proposed.

Comparison of experimental and numerical investigations important place in the thesis takes.

For full-scale tests of a racing car, a direct method of road tests is used. Aerodynamic perfection of the rear diffuser, front and rear wing, radiator compartment, special attention is paid to issues.

Experience of designing ultra-low aerodynamic resistance shape of the vehicle «Shell Eco-marathon» in the Thesis as seen is dedicated.

Keywords: aerodynamics, racing car, wing, diffuser, radiator, aerodynamic forces, flow.

АННОТАЦИЯ

Авершин А.Г. Совершенствование аэродинамических характеристик автомобилей для спорта методами численного и натурного эксперимента. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 - автомобили и тракторы. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена вопросам внешней и внутренней аэродинамики гоночных автомобилей. Проведены численные и натурные эксперименты на базе автомобилей ХАДИ-25,31,33,34 Лаборатории скоростных автомобилей Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Численное моделирование проводилось на основе интегрирования осредненных уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого газа в трехмерной постановке в программном комплексе *MTFS*[®]. Интегрирование полных осредненных уравнений Навье-Стокса осуществлялось разностной схемой 2-го порядка точности на основе TVD аппроксимации при замыкании $k-\varepsilon$ моделью турбулентности в формулировке Лаундера. Для описания вязких эффектов в пограничном слое использовались пристенные функции, при этом минимальное значение переменной пограничного слоя соответствует $Y^+ = 4.5$

Особое внимание уделено вопросам аэродинамического совершенствования заднего диффузора, переднего и заднего антикрыла, радиаторного отсека.

Благодаря исследованию обтекания заднего диффузора обнаружен отрывной характер течения. Практическим результатом исследования явилось увеличение прижимающей силы на 30% в сравнении с исходным вариантом. Сопоставление данных численного и натурного эксперимента показало удовлетворительное соответствие.

Важным результатом совершенствования антикрыльев является создание модифицированного заднего антикрыла. При проектировании антикрыла учитывалась интерференция крыла и кузова. Характеристики модифицированного антикрыла отличаются более однородным полем распределения коэффициента давления на передней кромке, улучшенным C_y в сравнении с базовым на 4.5%.

Результатом аналитического расчета системы охлаждения гоночного автомобиля является определение минимальной площади охлаждаемой поверхности радиатора, а также наилучшее для данной компоновки расположение выходных и входных отверстий в системе охлаждения.

В работе представлены результаты аэродинамических исследований в виде таблиц и графиков. Дана оценка влияния различных факторов на аэродинамические характеристики гоночных автомобилей и предложены пути их улучшения.

В работе рассматривается опыт проектирования кузова гоночного автомобиля со сверхнизким аэродинамическим сопротивлением ХАДИ-34. Рассмотрены вопросы, связанные с аэродинамическим сопротивлением формы кузова и его положения относительно экрана (земли). Исследовано влияние бокового ветра на аэродинамические характеристики автомобиля ХАДИ-34.

Ключевые слова: аэродинамика, гоночный автомобиль, антикрыло, диффузор, радиатор, аэродинамические силы, обтекание.

Підписано до друку 07.02.2018 р. Формант 60х84/16
Папір офсетний. Друк – цифрова. Умов. друк. Арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 12

Надруковано у ФО-П Миронов М.В.
Свідоцтво ВО 4 №022953 від 24.04.2003 р.
61002, м. Харків, вул Конарева, 3