

М.С. АРСЕНЮК

Інститут транспортних систем і технологій НАН України

Д.О. РЕДЧИЦЬ

Інститут транспортних систем і технологій НАН України;

Дніпровський державний технічний університет

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ НОВОЇ ЧАСТИНИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для дослідження впливу форми носової частини на аеродинамічні характеристики високошвидкісного транспортного засобу застосовують тривимірні нестационарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса. Для моделювання турбулентності використовували модель турбулентності SST. Розроблено програмно-методичне забезпечення для чисельного моделювання та визначення основних параметрів нестационарного обтікання високошвидкісного транспортного засобу. Чисельне розв'язання системи вихідних рівнянь виконано методом контрольних об'ємів. Блочно-матрична система лінійних алгебраїчних рівнянь неявної схеми розв'язувалася методом мінімізації узагальненої нев'язки (GMRES) з неповним LU-розкладанням ($ILU(k)$) загальної матриці системи як передумовлювання. Наведено результати візуалізації тривимірної течії. Установлено розподіл газодинамічних характеристик обтікання корпусу високошвидкісного транспортного засобу поблизу шляхової структури. Проведено аналіз та визначено вплив довжини, ширини й висоти носової частини на аеродинамічні характеристики високошвидкісного транспортного засобу. Збільшення довжини та висоти зменшує лобовий опір, а збільшення ширини носової частини високошвидкісного транспортного засобу призводить до збільшення коефіцієнта лобового опору. Незалежно від геометричних параметрів носової частини на корпус високошвидкісного транспортного засобу діє негативна підйомна сила, яка притискає корпус до шляхової структури, та позитивний момент тангажу. Збільшення довжини та ширини носової частини, а також висоти її встановлення над колійною структурою призводить до зменшення модуля притисковної сили, а також моменту тангажу. Розроблена методика та результати розрахунків можуть бути застосовані при дослідженні зв'язаних задач динаміки та аеродинаміки, оптимізації аеродинамічної форми, а також для вибору конструктивних параметрів високошвидкісного транспортного засобу на надпровідних магнітах, системи підвіски та шляхової структури.

Ключові слова: високошвидкісний транспортний засіб, аеродинаміка, рівняння Нав'є – Стокса, метод контрольного об'єму, аеродинамічні коефіцієнти.

M.S. ARSENIUK

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

D.O. REDCHYTS

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Dniprovsky State Technical University

NUMERICAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF NOSE PART SHAPE OF A HIGH-SPEED VEHICLE ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

Three-dimensional unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are used to study the influence of the nose shape on the aerodynamic characteristics of a high-speed vehicle. The SST turbulence model was used to simulate turbulence. The software and methodology for numerical modelling and determination of the main parameters of the unsteady flow of a high-speed vehicle was developed. The numerical solution of the system of initial equations is performed by the method of control volumes. The block-matrix system of linear algebraic equations of the implicit scheme was solved by the Generalized minimal residual method (GMRES) with an incomplete LU decomposition ($ILU(k)$) of the total matrix of the system as a preconditioner. The results of three-dimensional flow visualisation are presented. The distribution of the gas-dynamic characteristics of the flow around the body of a high-speed vehicle near the road structure is determined. The distribution of the gas-dynamic characteristics of the high-speed vehicle body flow near the road structure is determined. The influence of the length, width, and height of the nose section on the aerodynamic characteristics of a high-speed vehicle is analysed and determined. An increase in length and height reduces drag, and an increase in the width of the nose of the high-speed vehicle leads to an increase in the coefficient of drag. Regardless of the geometric parameters of the nose section, the body of the high-speed vehicle is subject to

a negative lift force that presses the body against the road structure and a positive pitching moment. An increase in the length and width of the nose section, as well as the height of its installation above the track structure, leads to a decrease in the modulus of the downward force and the pitching moment. The developed methodology and calculation results can be applied to the study of coupled problems of dynamics and aerodynamics, optimisation of aerodynamic shape, as well as to the selection of design parameters of a high-speed vehicle on superconducting magnets, suspension system and track structure.

Key words: high-speed vehicle, aerodynamics, Navier-Stokes equation, control volume method, aerodynamic coefficients.

Постановка проблеми

У сучасному світі є багато різних засобів пересування, як-от літак, автомобіль, корабель, потяг. Для міжміських поїздок на середні дистанції простіше та вигідніше користуватися залізничним транспортом завдяки його доступності та відносній дешевизні. Крім того, серед описаних вище способів пересування потяг є найбезпечнішим. З огляду на прискорення темпів сучасного життя, дедалі більш актуальним завданням стає прискорення поїздок. У цьому плані розвиток сучасних технологій дає змогу вводити в експлуатацію високошвидкісні потяги, які можуть поєднувати зручність і доступність автомобільного або класичного залізничного транспорту та швидкості, порівнянні з авіаційними.

Зі збільшенням швидкості потягів аеродинаміка стає одним із ключових складників загального опору руху. Відповідно, дослідження та поліпшення аеродинаміки дасть змогу підвищити економічність, екологічність, безпеку та швидкість перевезень. Сучасні високошвидкісні потяги, як правило, мають обтічну форму для мінімізації аеродинамічного опору. Проте подолання аеродинамічного опору все ще споживає близько 40–50 % від енергії, що подається на тягові двигуни [1] для типового високошвидкісного потяга.

Аеродинаміці високошвидкісних потягів стали приділяти значну увагу понад три десятиліття тому. Дослідники усього світу здійснювали спроби поліпшити аеродинаміку потягів, щоб зменшити аеродинамічний опір та збільшити стійкість руху потяга на великих швидкостях і при бічних вітрових навантаженнях. Як інструменти дослідження використовували різні методи, починаючи з натурних експериментів, експериментального моделювання в аеродинамічних трубах на масштабних моделях, чисельного моделювання на основі рівнянь Нав'є – Стокса.

Альтернативою системі підвісу потяга «колесо-рейка» може слугувати магнітний підвіс, який отримав практичне застосування в останні кілька десятиліть. При використанні магнітного підвісу немає фізичного контакту потяга зі шляховою структурою і, відповідно, не створюється додатковий опір руху, а підвищені вимоги до точності виконання підвісу та сам принцип роботи забезпечують мінімальні вібрації під час руху.

Для дослідження аеродинаміки транспортних засобів застосовують кілька методів: експериментальні (натурний експеримент та моделювання в аеродинамічній трубі на зменшених моделях), аналітичні (використання аналітичних й інженерних методик, виведених завдяки натурним експериментам) та чисельні (чисельне моделювання на основі рівнянь Нав'є – Стокса). Через свою складність та дорожнечу натурні експерименти не є популярними. Недоліком моделювання на масштабних моделях в аеродинамічній трубі є складність відтворення природних умов у трубі (рухома шляхова структура, відкритий простір навколо потяга), а також необхідність обґрунтування правильності обраних критеріїв подібності. Аналітичні методи є значно дешевшими, проте набагато менш точними. Чисельне моделювання на основі рівнянь Нав'є – Стокса, на відміну від аналітичних методів, дає змогу підвищити точність результатів, проте вимагає великих обчислювальних ресурсів, але, на відміну від масштабованих експериментів, дає змогу поставити завдання максимально наближене до природного. Як порівняти з натурними експериментами, чисельне моделювання дає змогу максимально повно дослідити картину течії у всіх її аспектах, однак для верифікації результатів такого моделювання

за інтегральними характеристиками, бажано використовувати результати натурних та трубних експериментів.

Якщо в середині та кінці XX століття чисельне моделювання лише починало розвиватися, то завдяки бурхливому розвитку комп'ютерної техніки наприкінці XX та на початку XXI століття, значне зростання обчислювальних можливостей дав змогу перейти до чисельного моделювання як до основного методу досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість сучасних робіт із чисельного моделювання аеродинаміки транспортних засобів застосовують спрощені підходи до моделювання турбулентності з метою зменшення обчислювальних витрат. Трьома основними підходами є моделювання на основі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є – Стокса (RANS) [2], моделювання великими вихорами (LES) [3] і метод відокремлених вихорів (DES) [4]. Дуже перспективним, але витратним у застосуванні є метод прямого чисельного моделювання (DNS).

Є низка повномасштабних досліджень (експериментальних, чисельних, аналітичних) з аеродинаміки потягів, що розглядають аеродинамічний опір потягів, бічний вітер, супутню течію і перепади тиску.

Бейкер [5] провів дослідження з обтікання потяга, використовуючи повномасштабні експерименти. Дані представлені у вигляді осереднених безрозмірних швидкостей ковзання вздовж довжини потяга для низки типів потягів. Це дослідження проводили для підготовки експериментальної бази даних для TSI (Technical Specifications for Interoperability).

У роботі Гер [6] виконано RANS-моделювання обтікання спрощеної моделі провідного вагона German Railway (Deutsche Bahn, DB) InterRegio з кутами ризику від 0° до 90° . Для замикання системи рівнянь RANS використовували k - ϵ модель турбулентності, а чисельний розв'язок отримано методом контрольних об'ємів. Основна мета роботи – дослідити можливості моделювання на основі RANS в аеродинаміці транспортного засобу та проаналізувати великі течії навколо потягів.

Для моделювання обтікання потяга узагальненого вигляду (паралелепіпед з гострими та округленими кінцями) Фавр [7] використав метод URANS (розв'язання нестационарних, осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є – Стокса) разом зі стандартною k - ϵ та k - ω SST моделлю турбулентності. Число Рейнольдса, засноване на ширині моделі, було $1,83 \times 10^8$, кут ризику становив 20° .

Крайнович [8] виконав LES-моделювання спрощеної моделі потяга під кутом ризику 90° для $Re = 3 \times 10^5$ (на основі висоти потяга) та на двох різних сітках з 8 та 11,5 мільйонами комірок відповідно. Чисельне розв'язання нестационарних рівнянь Нав'є – Стокса, замкнених за допомогою стандартної моделі турбулентності Смагоринського з підсітковими функціями, отримано на основі методу контрольних об'ємів із центрально-різницевою схемою другого порядку для простору та схемою Кранка – Ніколсона другого порядку для кроку за часом.

У подальшому Геміда та Крайнович [9] провели моделювання обтікання спрощеної моделі потяга, використовуючи метод LES, для дослідження впливу форми носа потяга на розвиток структури течії. Геміда та Крайнович використовували ту ж постановку завдання, що й Крайнович [8], за винятком демпфувальної функції ван Дрїста, яку вони додатково застосували в пристінковій ділянці.

Мета дослідження

Мета роботи – дослідити вплив форми носової частини високошвидкісного транспортного засобу на його аеродинамічні характеристики на прикладі одновагонного потяга на магнітному підвісі.

Постановка завдання

Для чисельного моделювання обтікання високошвидкісного наземного транспортного засобу (далі – ВШНТ) поблизу шляхової структури застосовували тривимірні нестационарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав’є – Стокса у векторно-інтегральній формі. Для замикання вихідної системи рівнянь використовували модель турбулентності $k-\omega$ SST [10]. Система рівнянь записана в дивергентній формі й при заміні дискретним аналогом має властивості збереження маси, імпульсу та енергії з відповідною точністю в кожній розрахунковій точці.

Як початкові умови задавали параметри незбуреного потоку. На нескінченності задавали параметри потоку, що набігає. На поверхні транспортного засобу та на шляховій структурі задавали умови прилипання.

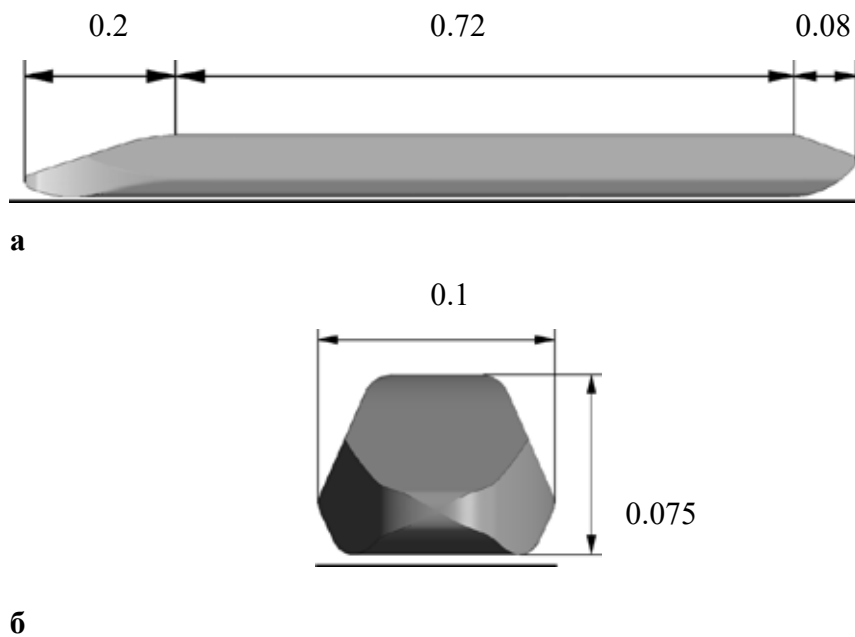


Рис. 1. Зовнішній вид геометрії корпусу ВШНТ: а – вид зліва; б – вид спереду

Чисельний алгоритм

Чисельне розв’язання системи вихідних рівнянь отримано методом контрольних об’ємів. Розрахунки виконано для корпусу ВШНТ із загальними геометричними розмірами, зазначеними на рис. 1. Для проведення чисельного моделювання побудовано гексадральну багатоблочну сітку, що містить 3 млн вузлів. Усі геометричні параметри були знерозмірені за довжиною корпусу. Мінімальний крок сітки становив 5×10^{-7} . Середня товщина в’язкого підшару по корпусу становила $y^+ = 1,5$. Довжина розрахункової ділянки становила 5,5; ширина – 1,85; висота – 0,9. Розрахунки виконані при числі Рейнольдса, що дорівнює $Re = 2 \times 10^8$.

Результати розрахунків

Нижче представлено результати трьох серій обчислювальних експериментів щодо визначення впливу довжини, ширини та висоти носової частини на аеродинамічні характеристики ВШНТ. У першій серії розрахунків довжина носового звуження l змінювалася в межах від 0.04 до 0.2 L (рис. 2 а, б), де L – довжина корпусу ВШНТ. У другій серії ширина носового звуження w змінювалася в межах від 0.2 до 1 W (рис. 2 в, г), де W – ширина корпусу ВШНТ. У третій серії обчислювальних експериментів висота h носової частини над колійною структурою варіювалася в межах від 0.01 до 0.3 H , де H – висота корпусу ВШНТ (рис. 2 д, е).

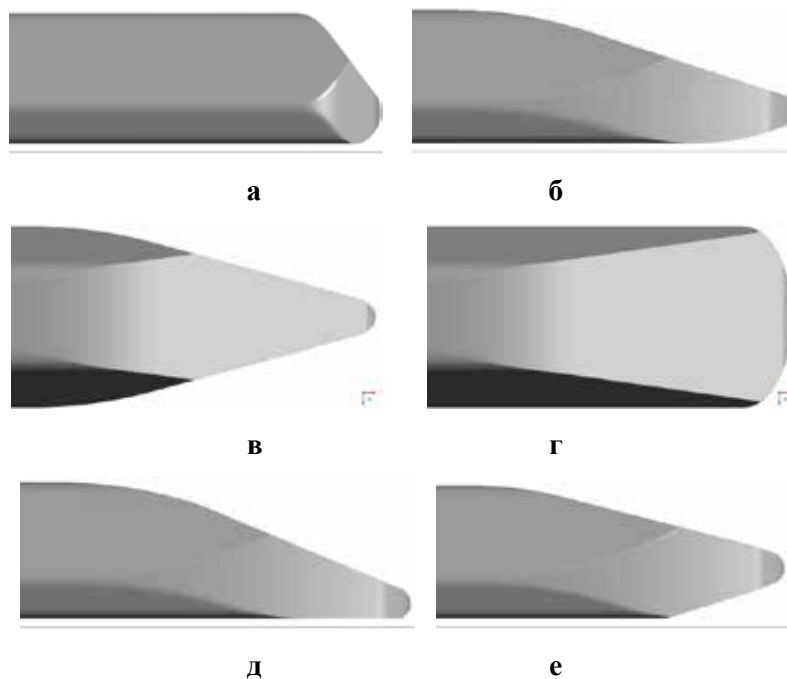


Рис. 2. Геометрія носової частини: а, б – перша серія експериментів, $l=0.04 L$ та $l=0.2 L$, вид справа; в, г – друга серія експериментів, $w=0.2 W$ та $w=1 W$, вид зверху; д, е – третя серія експериментів, $h=0.01 H$ та $h=0.3 H$, вид справа

Вплив довжини носової частини

Візуалізація результатів першої серії розрахунків представлена на рис. 3–6. Результати візуалізації поверхні постійного значення інваріанта швидкості Q , який дорівнює $10 c^2$, наведено на рис. 3 (а, б), миттєвих граничних ліній течії на поверхні корпусу ВШНТ – на рис. 3 (в, г).

Розподіл модуля швидкості в поздовжньому серединному перерізі при $l=0.04 L$ та $l=0.2 L$ представлено відповідно на рис. 4а та 4б. Розподіл тиску в поздовжньому серединному перерізі для крайніх варіантів подовження носової частини наведено на рис. 4в та 4г. Розподіл модуля швидкості в поперечному серединному перерізі при $l=0.04 L$ та $l=0.2 L$ представлено відповідно на рис. 4д та 4е.

Для всіх досліджених довжин носової частини характерна наявність системи поздовжніх вихорів навколо та за корпусом ВШНТ (рис. 3а, 3б). За кормовою частиною під самою крайньою кромкою утворюються два поперечні приєднані вихори із зоною зворотної течії (рис. 3а, 3б, 4а–г). Одразу за поперечними вихорами формується система з двох великих поздовжніх протилежно обертових вихорів, які простягаються далеко вслід за ВШНТ, а також двох менших поздовжніх протилежно обертових вихорів, розташованих між великими поздовжніми вихорами та ближче до путньої структури.

Зі зменшенням довжини носової частини великі поздовжні вихори збільшують свою інтенсивність, зберігаючи масштаби. Два малі поздовжні вихори досить швидко втрачають інтенсивність і масштаб, і чим більша довжина носової частини тим менша довжина малих поздовжніх вихорів (рис. 3).

Над дахом ВШНТ формуються два протилежно обертові вихори, які сходять з верхніх країв носа ВШНТ (рис. 3в, 3г, 4д, 4е). При меншій довжині носової частини верхні поздовжні вихори розходяться трохи в сторони та вище корпусу ВШНТ, і рухаються до задньої частини корпусу, де вони притискаються ближче один до одного, опускаються вниз за корму, при цьому частково затягуються між великих поздовжніх вихорів і відносяться вниз за потоком

паралельно шляховій структурі. При збільшенні довжини носової частини інтенсивність верхніх поздовжніх вихорів також зростає, і вони намагаються притиснутися ближче один до одного над дахом корпусу ВШНТ.

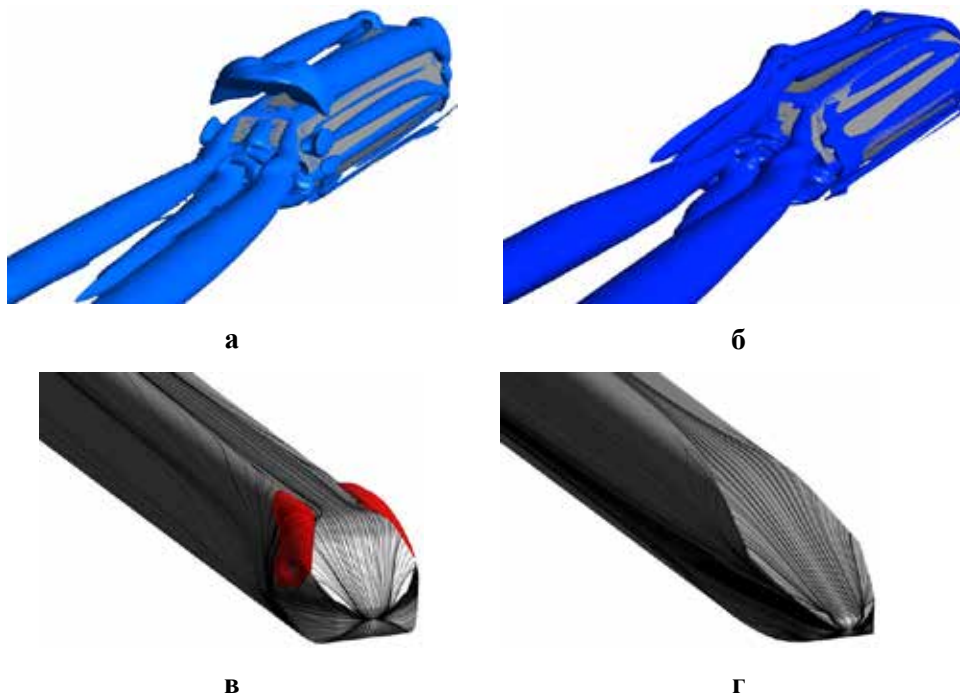


Рис. 3. Візуалізація просторової картини течії поблизу ВШНТ: а, б – ізоповерхня інваріанта швидкості Q для $l=0.04 L$ та $l=0.2 L$ відповідно; в, г – граничні лінії течії на корпусі ВШНТ та ділянка зворотної течії (позначена червоним)

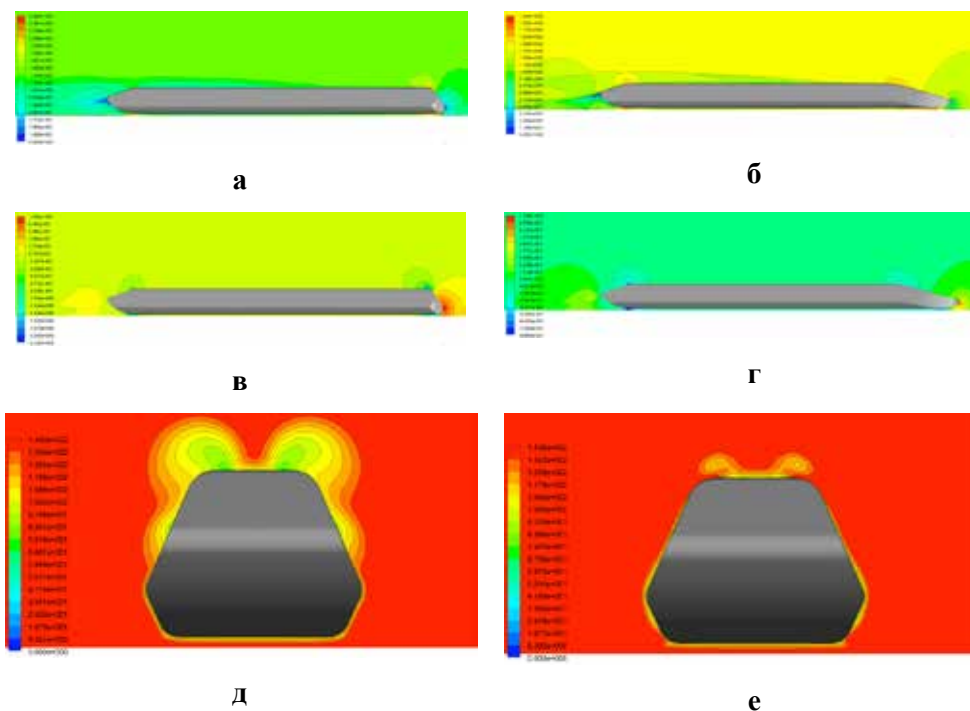


Рис. 4. Ізолінії на січній поверхнях ділянки: а, б – розподіл модуля швидкості в поздовжньому перетині для $l=0.04 L$ та $l=0.2 L$ відповідно; в, г – розподіл тиску в поздовжньому перетині для крайніх значень довжини носової частини; д, е – розподіл модуля швидкості в поперечному перетині

При малих довжинах носової частини ВШНТ за верхніми передніми кромками формується відрив потоку з точкою приєднання потоку, розташованою неподалік від точки відриву (рис. 3в, 3г). Розподіл коефіцієнта тиску в поздовжньому перетині $z = 0$ по корпусу ВШНТ наведено на рис. 5 відповідно для мінімальної (а) та максимальної (б) довжини носової частини. Розподіл коефіцієнта тертя по корпусу ВШНТ представлено на рис. 6. Максимальне значення коефіцієнта тиску на корпусі ВШНТ спостерігається в носовій частині (рис. 5). Два мінімуми значення коефіцієнта тиску спостерігаються на дні під носовою та кормовою частинами ВШНТ. Зменшення довжини носової частини суттєво збільшує модуль коефіцієнта тиску в зоні розрідження під носовою частиною ВШНТ.

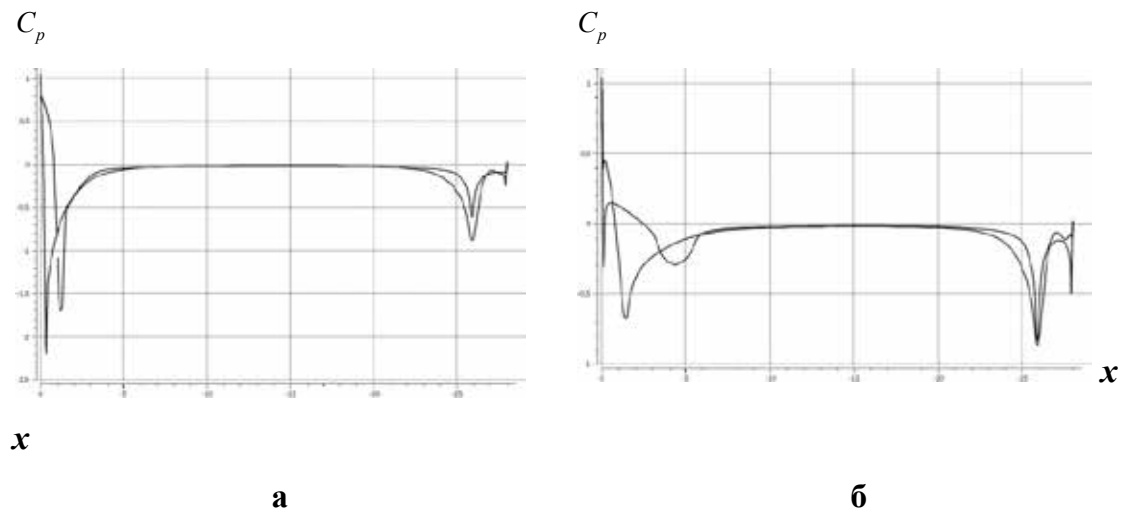


Рис. 5. Розподіл коефіцієнта тиску вздовж корпусу ВШНТ при довжині носової частини: а – $l=0.04 L$; б – $l=0.2 L$

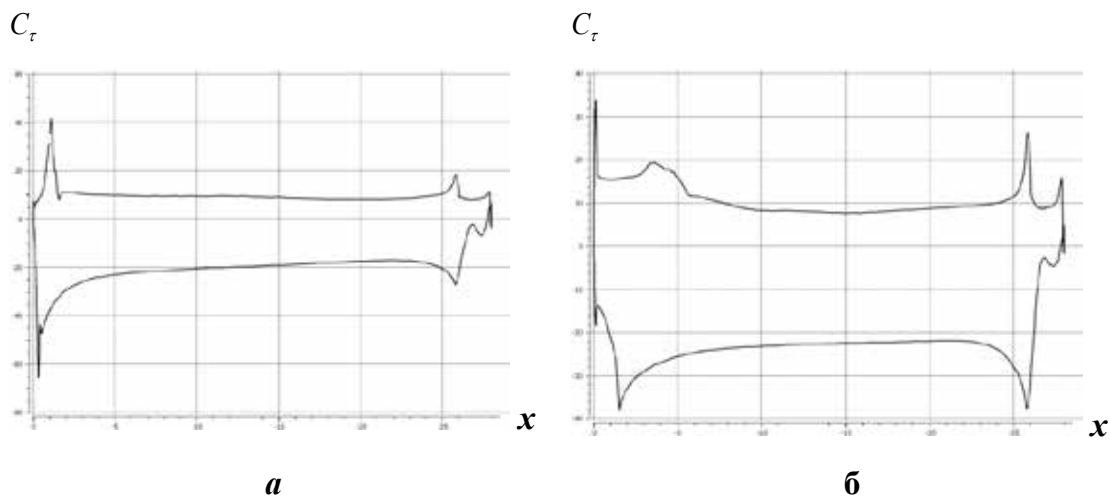


Рис. 6. Розподіл коефіцієнта тертя вздовж корпусу ВШНТ при довжині носової частини: а – $l=0.04 L$; б – $l=0.2 L$

Максимальні за модулем значення коефіцієнта тертя спостерігаються поблизу носової та кормової частин ВШНТ (рис. 6). Зменшення довжини носової частини збільшує модулі значень коефіцієнта тертя поблизу носової частини та зменшує модулі поблизу кормової частини.

Вплив ширини носової частини

Візуалізація результатів другої серії розрахунків представлена на рис. 7, 8. Результати візуалізації миттєвих просторових ліній течії наведені на рис. 7 (а, б), поверхні постійного значення інваріанта швидкості, що дорівнює 10 c^{-2} – на рис. 7 (в, г) миттєвих граничних ліній течії на поверхні корпусу ВШНТ – на рис. 7 (д, е).

Розподіл вертикальної компоненти швидкості w в поперечному серединному перерізі при $w=0.5 \text{ W}$ і $w=3 \text{ W}$ наведено відповідно на рис. 8а і 8б. Розподіл модуля швидкості в поперечному серединному перерізі для крайніх варіантів ширини носової частини представлено на рис. 8в і 8г.

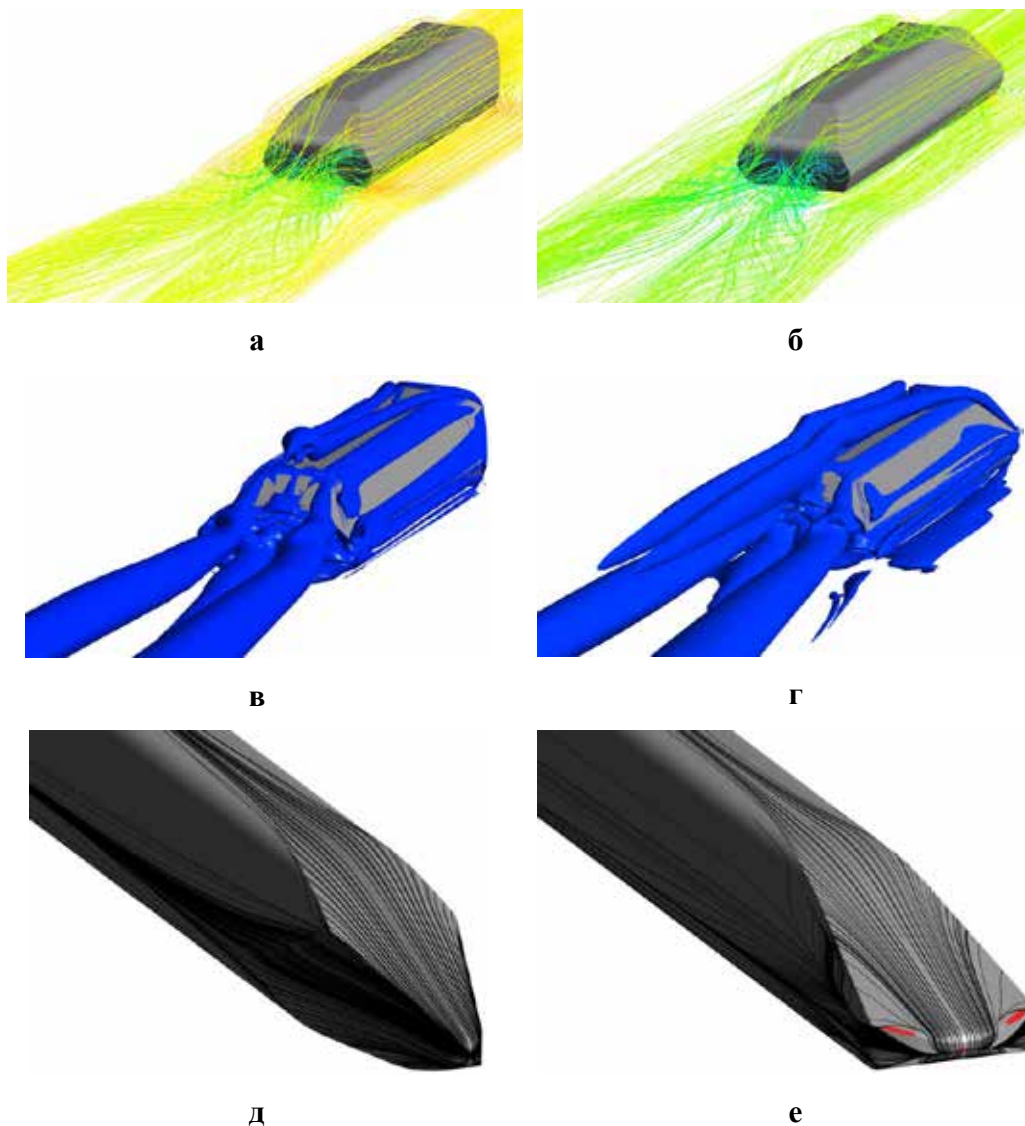


Рис. 7. Візуалізація просторової картини течії поблизу ВШНТ: а, б – миттєві лінії течії для $w=0.2 \text{ W}$ та $w=1 \text{ W}$ відповідно; в, г – ізоповерхня інваріанта швидкості Q ; д, е – граничні лінії течії на корпусі ВШНТ і ділянка зворотної течії (позначена червоним)

Зміна ширини носової частини майже не впливає на масштаб і розташування над дахом верхніх поздовжніх вихорів: зароджуючись на бічних краях носа, до середини корпусу вони притискаються один до одного й рухаються до задньої частини корпусу, ідучи назад за корму, де трохи опускаються й продовжують рухатися паралельно шляховій структурі. При зменшенні ширини носової частини інтенсивність верхніх поздовжніх вихорів також зменшується (рис. 7а,

7в, 8), що призводить до їх швидшого затухання відразу за кормою ВШНТ, тоді як за більшої ширини вони затухають в сліді на відстані порядку однієї довжини корпусу ВШНТ (рис. 7б, 7г).

Більша ширина носової частини змушує потік повітря, який набігає, різко огинати носову частину з боків, що призводить до більшого гальмування потоку поблизу нижніх бокових країв корпусу, а також до віддалення малих нижніх поздовжніх вихорів від корпусу й формування більш широкого турбулентного сліду (рис. 7а–г). Також при більшій ширині різке огинання носа потоком призводить до більшого прискорення й розрідження безпосередньо під носовою частиною ВШНТ (рис. 9). При малій ширині потік, що набігає, плавно обтікає носову частину й більш щільним потоком входить під днище з невеликим прискоренням.

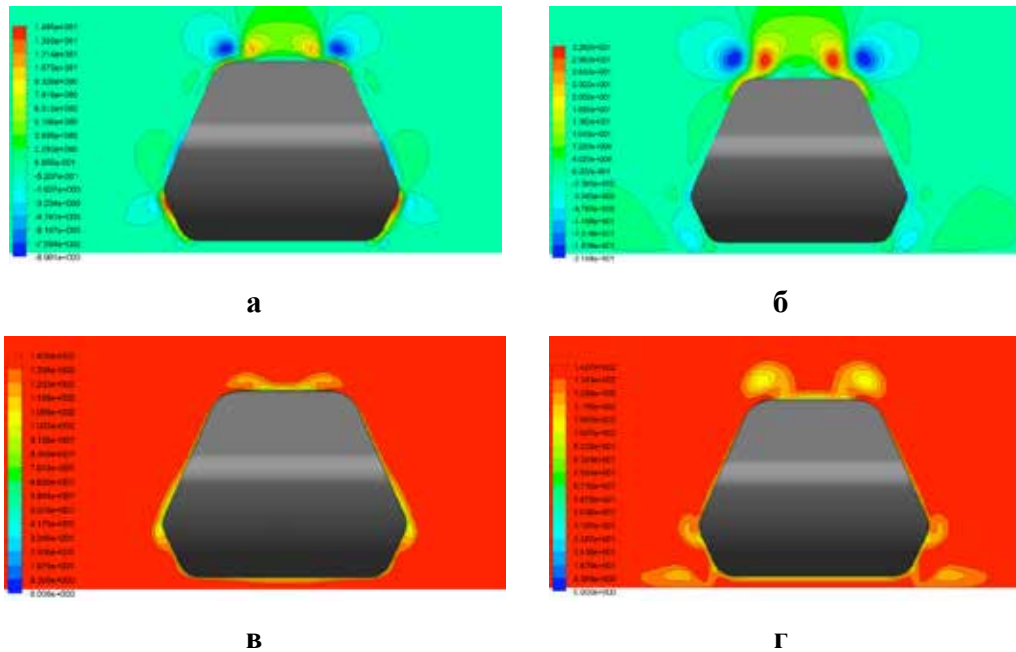


Рис. 8. Ізолінії на поперечному перетині ділянки: а, б – розподіл вертикальної компоненти швидкості для $w=0.2 W$ та $w=1 W$ відповідно; в, г – розподіл модуля швидкості для $w=0.2 W$ та $w=1 W$ відповідно

Зменшення ширини носової частини різко знижує розрідження під носовою частиною. Розподіл коефіцієнта тиску в поздовжньому перерізі $z = 0$ по корпусу ВШНТ наведено на рис. 9 відповідно для мінімальної (а) та максимальної (б) ширини носової частини.

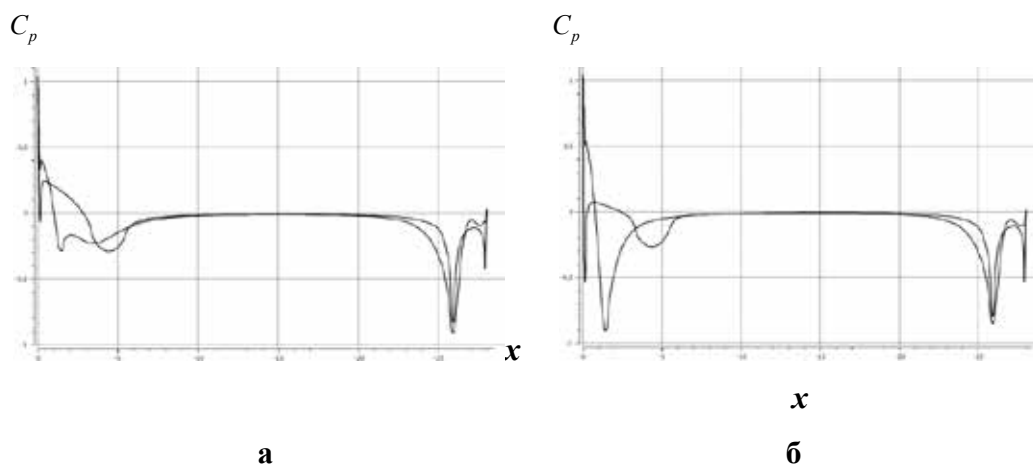


Рис. 9. Розподіл коефіцієнта тиску вздовж корпусу: а – $w=0.2 W$; б – $w=1 W$

Максимальне значення коефіцієнта тиску на корпусі ВШНТ спостерігається в носовій частині (рис. 9). Два мінімуми значення коефіцієнта тиску спостерігаються на днищі під носовою та кормовою частинами ВШНТ. При цьому зменшення ширини носової частини різко зменшує розрідження під носовою частиною.

Вплив висоти носової частини

Візуалізацію результатів третьої серії розрахунків представлено на рис. 10 у вигляді миттєвих просторових ліній струму, миттєвих граничних ліній струму на шляховій структурі під днищем ВШНТ, поверхні постійного значення інваріанта швидкості Q , що дорівнює 10 c^{-2} . Розподіл турбулентної в'язкості в поздовжньому середньому перерізі для крайніх варіантів висоти носової частини представлено на рис. 11а та 11б.

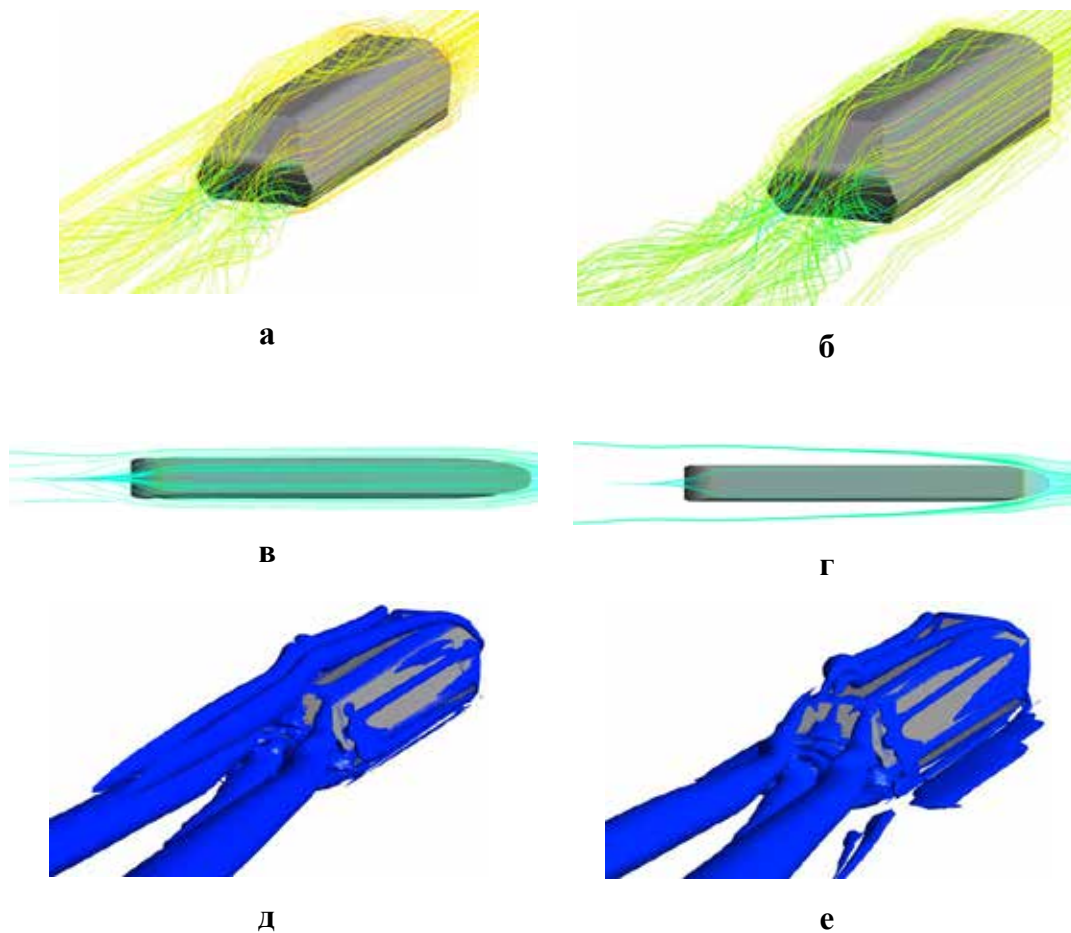


Рис. 10. Візуалізація просторової картини течії поблизу ВШНТ: а, б – миттєві лінії струму навколо корпусу ВШНТ для $h=0.01 H$ та $h=0.3 H$ відповідно; в, г – граничні лінії струму на поверхні шляхової структури під ВШНТ; д, е – ізоповерхня інваріанта швидкості Q

Зміна висоти носової частини майже не впливає на масштаб і розташування над дахом верхніх поздовжніх вихорів. Збільшення висоти носової частини призводить до зменшення інтенсивності верхніх поздовжніх вихорів, що призводить до їх більш швидкого затухання відразу за кормою ВШНТ (рис. 10б, 10г, 10е), тоді як при меншій висоті вони затухають у сліді на відстані порядку однієї довжини корпусу ВШНТ (рис. 10а, 10в, 10д). Зменшення висоти розташування носової частини призводить до збільшення турбулізації верхніх поздовжніх вихорів і вихрового сліду за корпусом ВШНТ (рис. 11). Збільшення висоти носової частини змушує значну частину потоку, що набігає, обтікати знизу й різко огинати її з боків, затікаючи

під днище, що призводить до сильнішого гальмування потоку біля нижніх бокових кромek корпусу та його подальшого розширення в сторони від корпусу, формуючи більш широкий турбулентний слід (рис. 10а–г).

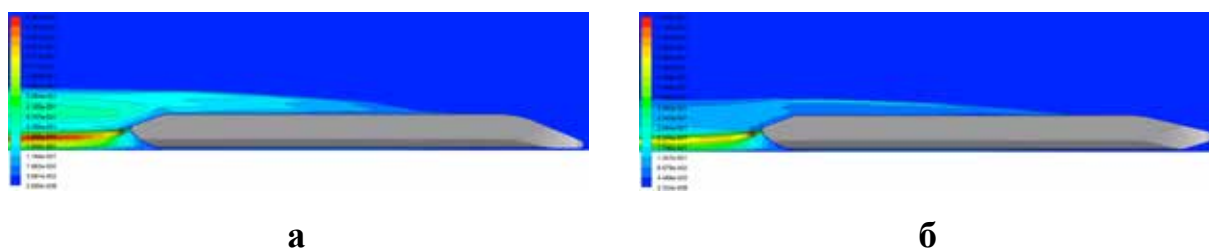


Рис. 11. Розподіл кінетичної енергії турбулентності в поздовжньому перерізі ділянки: а – $h=0.01 H$; б – $h=0.3 H$

При малій висоті носової частини потік повітря більш плавно обтікає носову частину зверху (рис. 10а, 10б). Розподіл коефіцієнта тиску в поздовжньому перерізі $z = 0$ по корпусу ВШНТ наведено на рис. 12 відповідно для мінімальної (а) та максимальної (б) висоти носової частини.

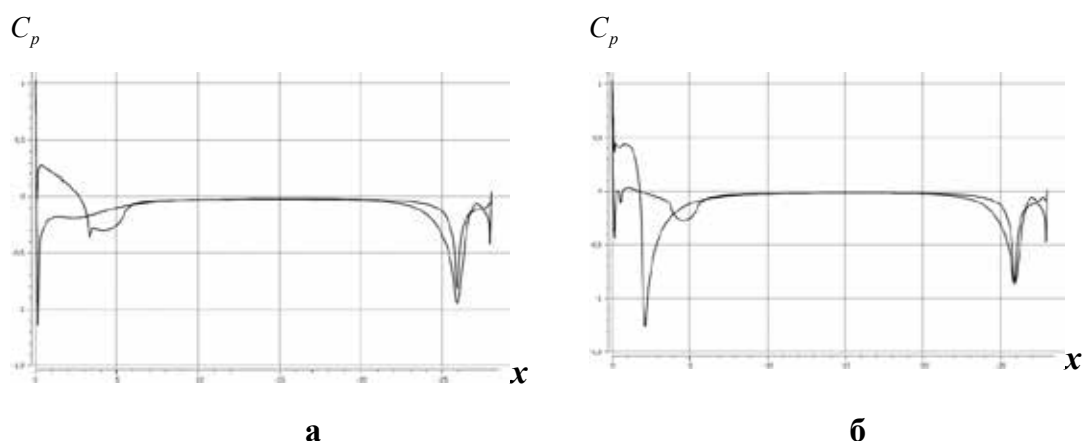


Рис. 12. Розподіл коефіцієнта тиску вздовж корпусу ВШНТ: а – $h=0.01 H$; б – $h=0.3 H$

При збільшенні висоти носової частини ділянка розрідження на вході під днищем відсувається далі по корпусу від носа (рис. 12б), що впливає на коефіцієнт моменту тангажу m_z . Максимальне значення коефіцієнта тиску на корпусі ВШНТ спостерігається в носовій частині (рис. 12). Три мінімуми значення коефіцієнта тиску спостерігаються на днищі під носовою та кормовою частинами ВШНТ, а також на задній верхній кромці корпусу. Залежності аеродинамічних коефіцієнтів C_x (а), C_y (б), m_z (в) від довжини, ширини та висоти носової частини ВШНТ представлені відповідно на рис. 13, 14, 15.

При збільшенні довжини носової частини коефіцієнт лобового опору C_x падає від значення 0.433 до 0.32 (рис. 13а). Зменшення довжини носової частини призводить до збільшення зони підвищеного тиску перед корпусом ВШНТ, а також збільшує площу з максимальним коефіцієнтом тиску на носі ВШНТ, що призводить до збільшення лобового опору. Поява відриву потоку за верхніми кромками носа ВШНТ також збільшує лобовий опір.

Коефіцієнт підйомної сили C_y приймає негативні значення на всьому досліджуваному проміжку довжин носової частини (рис. 13б). При збільшенні довжини носової частини модуль коефіцієнта підйомної сили зменшується від 0.545 до 0.319. Зменшення довжини носової

частини суттєво збільшує модуль коефіцієнта тиску в зоні розрідження під носовою частиною ВШНТ, що призводить до збільшення сили, що притискає.

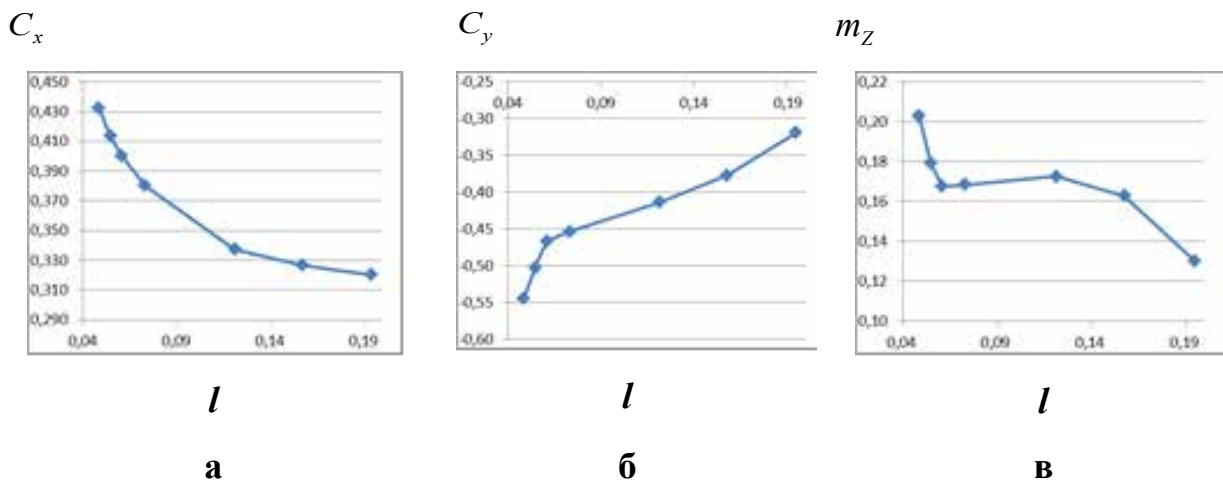


Рис. 13. Залежність аеродинамічних характеристик від довжини носової частини: а – коефіцієнт лобового опору C_x ; б – коефіцієнт підйомної сили C_y ; в – коефіцієнт моменту тангажу m_z

На проміжку довжин носової частини від 0.04 до 0.08 L коефіцієнт моменту тангажу m_z зменшується від 0.2 до 0.168 (рис. 13в). На проміжку до 0.12 L коефіцієнт m_z майже не змінюється, а далі, до довжини 0.2 L, зменшується до 0.13.

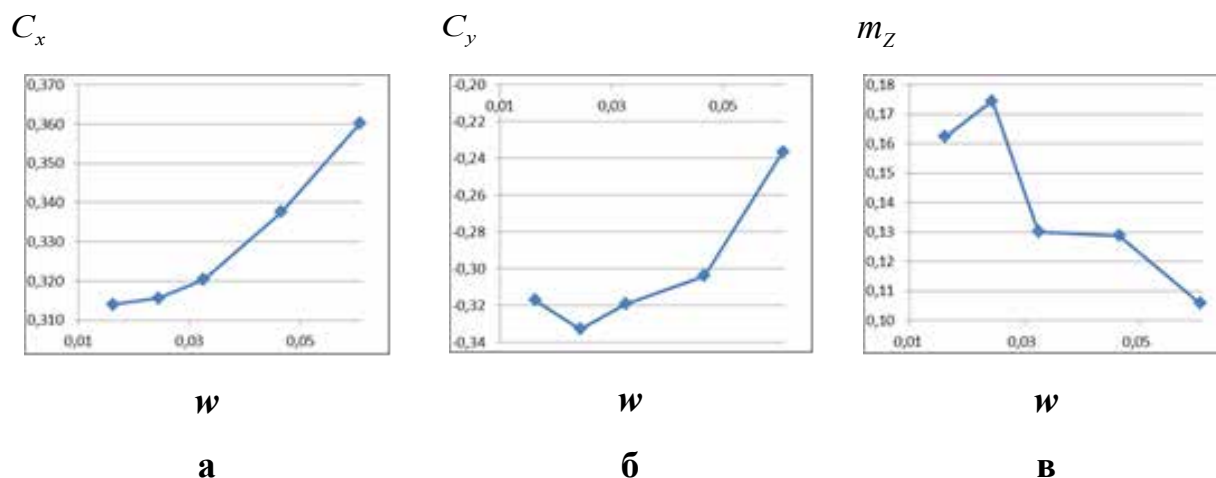


Рис. 14. Залежність аеродинамічних характеристик від ширини носової частини: а – коефіцієнт лобового опору C_x ; б – коефіцієнт підйомної сили C_y ; в – коефіцієнт моменту тангажу m_z

При збільшенні ширини носової частини коефіцієнт лобового опору C_x зростає від 0.314 до 0.36 (рис. 14а). Збільшення ширини носової частини призводить до збільшення площі з максимальним коефіцієнтом тиску на носі ВШНТ, а також до збільшення абсолютних значень коефіцієнта тертя по корпусу, що призводить до збільшення лобового опору.

Коефіцієнт підйомної сили C_y приймає негативні значення на всьому досліджуваному проміжку довжин носової частини. При збільшенні ширини носової частини модуль коефіцієнта підйомної сили зменшується від 0.33 до 0.24 (рис. 14б).

При збільшенні ширини носової частини коефіцієнт моменту тангажу m_z зменшується від 0.17 до 0.11 (рис. 14в).

Зменшення ширини носової частини суттєво знижує ефект прискорення потоку, що входить під днище ВШНТ, зменшуючи розрідження під носовою частиною ВШНТ. Водночас при більшій ширині посилюється вплив розрідження над носовою частиною відразу за носовим затупленням. Збільшення розрідження над носовою частиною та збільшення площі носа має більш сильний вплив, ніж збільшення розрідження під носовою частиною, що при збільшенні ширини носової частини призводить до зменшення сили, що притискає. Водночас зміна ширини носа майже не впливає на розподіл тиску й структуру безпосередньо прилеглих вихорів біля корми ВШНТ. Унаслідок цього дисбалансу впливу на носову й кормову частини, коефіцієнт m_z зменшується при збільшенні ширини носової частини ВШНТ.

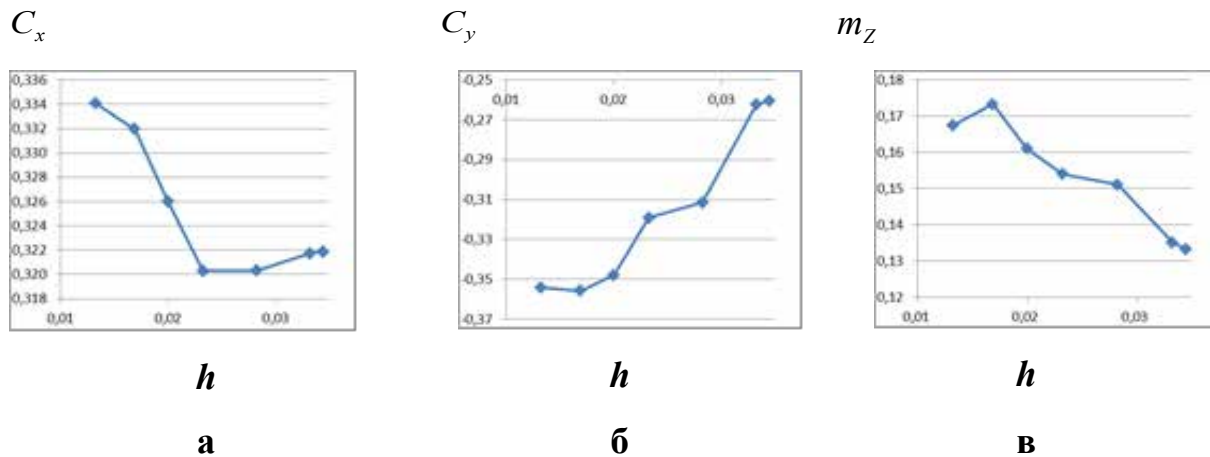


Рис. 15. Залежність аеродинамічних характеристик від висоти носової частини: а – коефіцієнт лобового опору C_x ; б – коефіцієнт підйомної сили C_y ; в – коефіцієнт моменту тангажу m_z

При збільшенні висоти носової частини коефіцієнт лобового опору C_x зменшується від значення 0.33 до 0.32 з незначним збільшенням при максимальній висоті (рис. 15а). Максимальне значення коефіцієнта C_x приймає при мінімальній висоті носової частини як наслідок ускладненого затікання повітря під днище ВШНТ.

Коефіцієнт підйомної сили C_y приймає негативні значення в усьому досліджуваному діапазоні висот носової частини. При збільшенні висоти модуль коефіцієнта підйомної сили зменшується від 0.35 до 0.26 (рис. 15б). Завдяки більш повному обтіканню носової частини як з верхньої, так і з нижньої сторони, підйом носової частини зменшує силу, що притискає.

При збільшенні висоти носової частини коефіцієнт моменту тангажу m_z зменшується від 0.17 до 0.14 (рис. 15в) завдяки зміні картини тиску біля носової частини: на нижній поверхні до днища виявляється більше тиску, а розрідження при прискоренні потоку на вході під днище зсувається трохи далі до корми вздовж осі X.

Висновки

Для розрахунку аеродинамічних характеристик високошвидкісного транспортного засобу застосовували осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса. Для моделювання турбулентності використовували модель турбулентності SST. Розроблено програмно-методичне забезпечення для чисельного моделювання та визначення основних параметрів нестационарного обтікання високошвидкісного транспортного засобу. Чисельне розв'язання системи вихідних рівнянь виконано методом контрольних об'ємів. Блочно-матрична система лінійних алгебраїчних рівнянь неявної схеми розв'язувалася методом мінімізації узагальненої нев'язки (GMRES) з неповним LU-розкладанням (ILU(k)) загальної матриці системи як передумовлювання. Наведено результати візуалізації тривимірної течії. Установлено розподіл

газодинамічних характеристик обтікання корпусу високошвидкісного транспортного засобу поблизу шляхової структури. Визначено вплив довжини, ширини та висоти носової частини на аеродинамічні коефіцієнти ВШНТ. Збільшення довжини та висоти зменшує лобовий опір, а збільшення ширини носової частини ВШНТ призводить до збільшення коефіцієнта лобового опору. Незалежно від геометричних параметрів носової частини на корпус ВШНТ діє негативна підйомна сила, яка притискає корпус до шляхової структури, та позитивний момент тангажу m_z . Розроблена методика та результати розрахунків можуть бути застосовані при дослідженні зв'язаних завдань динаміки та аеродинаміки, оптимізації аеродинамічної форми, а також для вибору конструктивних параметрів високошвидкісного транспортного засобу на надпровідних магнітах, системи підвіски та шляхової структури.

Список використаної літератури

1. Orellano A., Sperling S. Aerodynamic Improvements and Associated Energy Demand Reduction of Trains. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*. 2009. V. 41. P. 219–231. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_19.
2. Guilmineau E. Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. V. 96. P. 1207–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.041>.
3. Hemida H., Baker C. Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind. *Computers & Fluids*. 2010. V. 39(10). P. 1944–1956. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.06.026>.
4. Favre T., Diedrichs B., Efraimsson G. Detached-Eddy simulations applied to unsteady crosswind aerodynamics of ground vehicles. Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2010. V. 111. P. 167–177. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14168-3_14.
5. Baker C.J., Gilbert T., Jordan S. The validation of the use of moving model experiments for the measurement of train aerodynamic parameters in the open air. *Proceedings of the World Congress on Rail Research*. 2013.
6. Khier W., Breuer M., Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study. *Computer & Fluids*. 2000. V. 29. P. 179–195. [https://doi.org/10.1016/s0045-7930\(99\)00008-0](https://doi.org/10.1016/s0045-7930(99)00008-0).
7. Favre T., Efraimsson G., Diedrichs B. Numerical investigation of unsteady crosswind vehicle aerodynamics using time-dependent inflow conditions. Seventh World MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference. 2008. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-11322>.
8. Krajnovic S., Hemida H., Diedrichs B. Time-dependent simulations for the directional stability of high speed trains under the influence of cross winds or cruising inside tunnels. Fluid dynamics applications in ground transportation: Simulation, a primary development tool in the automotive industry. 2005. 9 pp.
9. Hemida H.N., Krajnovic S. Exploring the flow around a generic high-speed train under the influence of side winds using LES. *Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Yokohama. 2006. P. 589–592.
10. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. V. 32(8). P. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.

References

1. Orellano, A., & Sperling, S. (2008). Aerodynamic improvements and associated energy demand reduction of trains. In *Lecture notes in applied and computational mechanics* (pp. 219–231). https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_19 [in English].

2. Guilmineau, E. (2007). Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6–7), 1207–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.041> [in English].
3. Hemida, H., & Baker, C. (2010). Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind. *Computers & Fluids*, 39(10), 1944–1956. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.06.026> [in English].
4. Favre, T., Diedrichs, B., & Efraimsson, G. (2010). Detached-Eddy simulations applied to unsteady crosswind aerodynamics of ground vehicles. In *Notes on numerical fluid mechanics and multidisciplinary design* (pp. 167–177). https://doi.org/10.1007/978-3-642-14168-3_14 [in English].
5. Baker, C. J., Gilbert, T., & Jordan, S. (2013). The validation of the use of moving model experiments for the measurement of train aerodynamic parameters in the open air. In *Proceedings of the World Congress of Railway Research (WCRR)* [in English].
6. Khier, W., Breuer, M., & Durst, F. (2000). Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study. *Computers & Fluids*, 29(2), 179–195. [https://doi.org/10.1016/s0045-7930\(99\)00008-0](https://doi.org/10.1016/s0045-7930(99)00008-0) [in English].
7. Favre, T., Efraimsson, G., & Diedrichs, B. (2008). Numerical Investigation of Unsteady Crosswind Vehicle Aerodynamics using Time-Dependent Inflow Conditions. *Seventh World MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference*. Presented at the 7th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference, Coventry, 22-23 October, 2008. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-11322> [in English].
8. Krajnovic, S., Hemida, H., & Diedrichs, B. (2005). Time-Dependent Simulations for the Directional Stability of High Speed Trains Under the Influence of Cross Winds or Cruising Inside Tunnels. *Fluid Dynamics Applications in Ground Transportation: Simulation, a Primary Development Tool in the Automotive Industry*, 1–9. Retrieved from: http://www.tfd.chalmers.se/~lada/postscript_files/krajnovic_lyon_2005.pdf [in English].
9. Hemida, H., & Krajnovic, S. (2006). Exploring the flow around a generic high-speed train under the influence of side winds using LES. *JWE= Japan Society of Wind Engineering: journal of wind engineering, JAWE: wind engineers, JAWE/ Edited by the Editorial and Public Relations Committee of the Japan Society for Wind Engineering*, 31(3), 589–592 [in English].
10. Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149> [in English].

Арсенюк Михайло Сергійович – провідний інженер відділу нових та нетрадиційних видів транспорту Інституту транспортних систем і технологій НАН України. E-mail: ars_mix@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7805-1372.

Редчиць Дмитро Олександрович – д.ф.-м.н., старший науковий співробітник, заступник директора з науково-організаційної роботи Інституту транспортних систем і технологій НАН України; професор кафедри математичного моделювання та системного аналізу Дніпровського державного технічного університету. E-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.

Arseniuk Mykhailo Serhiiovych – Leading Engineer at the Department of Dynamics And Strength of New Kinds of Transport of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: ars_mix@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7805-1372.

Redchyts Dmytro Oleksandrovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher, Deputy Director for Scientific and Organizational Work of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; Professor at the Department of Mathematical Modelling and System Analysis of the Dniprovsky State Technical University. E-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.