

MAREK MACIEJEWSKI*

O ZALEŻNOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA OPORU
AERODYNAMICZNEGO OD PRĘDKOŚCI JAZDYON THE DEPENDENCE OF AERODYNAMIC DRAG
COEFFICIENT ON THE DRIVING SPEED

Streszczenie

Na wielkość sił oporu aerodynamicznego samochodu wpływają oddziaływania o charakterze konwekcyjnym, wynikające z rozkładu ciśnień wokół pojazdu, oraz dyfuzyjnym, związane z tarcieniem (lepkiem) powietrza. Wielkość i wzajemne proporcje obu rodzaju sił zależą od prędkości opływu powietrza wokół pojazdu, a więc w przybliżeniu od prędkości jazdy samochodu. Siły wynikające z oddziaływań konwekcyjnych zależą od kwadratu prędkości ruchu, a te związane z oddziaływaniami dyfuzyjnymi zależą liniowo od prędkości jazdy. Wyznaczając współczynnik oporu w oparciu o siłę oporu otrzymaną z badań tunelowych, popełniamy błąd, standardowo przyjmując kwadratową zależność od prędkości jazdy. W artykule kwestia ta jest badana z wykorzystaniem symulacji komputerowych, a stosowna zależność współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy zostaje zweryfikowana.

Słowa kluczowe: aerodynamika samochodu, współczynnik oporu, symulacje numeryczne

Abstract

On the aerodynamic drag magnitude for a road vehicle affect the convective contributions resulting from the pressure distribution about a vehicle, and the diffusive contributions connected with the surface friction of (viscous) air. The magnitude and mutual relations of the shear and pressure forces are closely dependent on the air flow velocity over a vehicle, and approximately, on the driving speed. Forces resulted from convective contributions depend on the square of the driving speed, and those connected with diffusive contributions depend linearly on the speed. Determining the drag coefficient based on the drag force obtained from a wind-tunnel testing, we make an error routinely assuming the square dependency on the driving speed. In article, this question is considered with help of numerical simulations, and the appropriate dependency of the drag coefficient on the driving speed is verified.

Keywords: road vehicle aerodynamics, drag coefficient, numerical simulations

* Dr inż. Marek Maciejewski, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

O zachowaniu się samochodu na drodze decyduje wiele czynników wpływających na jego własności trakcyjne i dynamiczne. Do czynników tych zalicza się m.in. opory ruchu, na które składają się opory toczenia, opory aerodynamiczne, opory wzniesienia, opory bezwładności oraz opory niestandardowe (związane z hamowaniem, skrętem, przyczepą, ...). Przy większych prędkościach jazdy opory aerodynamiczne mają zwykle charakter dominujący, dlatego bardzo ważne jest ich wiarygodne i poprawne opisanie. Zjawiska aerodynamiczne związane z opływem powietrza wokół poruszającego się pojazdu przejawiają się występowaniem chwilowych rozkładów prędkości i ciśnienia, które decydują o wielkości wynikowych sił aerodynamicznych. Siły te określają opory jazdy oraz docisk pojazdu do jezdni, a wraz z innymi oddziaływaniami dynamicznymi stanowią o zachowaniu się pojazdu w zakresie własności i wskaźników trakcyjnych, statecznościowych, ekonomicznych i środowiskowych. Zjawiska aerodynamiczne wokół samochodu oraz związane z nimi siły aerodynamiczne oporu i docisku określa się w trakcie badań, które mogą mieć charakter eksperymentalny, analityczny lub numeryczny.

Eksperymentalne badania aerodynamiczne można ogólnie podzielić na ruchowe i stowiskowe (tunelowe). Te pierwsze wydają się być bardzo obiecujące z tytułu bezpośredniego związku z rzeczywistymi warunkami ruchu, ale wielkim problemem jest zapewnienie takiej ich technicznej realizacji, która gwarantowałaby pełną wiarygodność rejestrowanych informacji. Ponieważ warunki techniczne prowadzenia ruchowych pomiarów aerodynamicznych są wyjątkowo niekorzystne, jakość rejestrowanych informacji jest niska, a przez to przydatność samych badań okazuje się niewielka. W praktyce tego typu badania dotyczą prawie wyłącznie prostych pomiarów dynamometrycznych w celu wyznaczenia uśrednionego współczynnika oporu aerodynamicznego.

W badaniach stowiskowych, prowadzonych w tunelach aerodynamicznych, o dokładności uzyskiwanych rezultatów decyduje wierność odwzorowania zjawisk aerodynamicznych występujących w ruchu rzeczywistym. W tego rodzaju badaniach realizowane są odwrotne warunki ruchu (nieruchomy pojazd w strumieniu powietrza lub innego medium), a otoczenie jest sztucznie ograniczone. Skutkuje to błędami pomiarowymi, których najważniejszymi źródłami są:

- stacjonarność podłoża tunelu względem badanego pojazdu, skutkująca wystąpieniem ruchu ośrodka (powietrza) względem tunelu i tym samym powstaniem przy podłożu tunelu warstwy przypowierzchniowej (o zmienionych parametrach aerodynamicznych), w której częściowo „zanurzony” jest pojazd,
- blokowanie przepływu w wyniku wstawienia pojazdu do tunelu o ograniczonych rozmiarach poprzecznych, przez co wokół pojazdu występują rozkłady ciśnienia i prędkości nieadekwatne do warunków drogowych,
- ewentualny wpływ skali modelu, wywołujący konieczność modyfikacji warunków przepływu stosownie do liczby Reynoldsa w celu zachowania właściwych form zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi,
- brak wiernego odwzorowania przepływu przez układy chłodzenia i wentylacji (układ napędowy samochodu nie pracuje), brak kontaktu kół z podłożem, brak ruchu obrotowego kół, a przynajmniej tego dostarczanego przez własny układ napędowy.

Błędy pomiarowe wynikające z wymienionych przyczyn można po części skompensować za pośrednictwem różnych dodatkowych rozwiązań technicznych, ale pełne ich usunięcie

nie jest możliwe. W tej sytuacji próbuje się przynajmniej oszacować wielkość popełnianych błędów w celu odpowiedniej modyfikacji wyników. Nie jest to jednak proste zagadnienie, o czym przekonują badania porównawcze przeprowadzane w wielu różnych tunelach na tych samych pojazdach [1].

Zakładając nawet, że wszystkie wymienione źródła błędów badań tunelowych dałoby się wyeliminować, to i tak pomiary mogą okazać się niedokładne z następującego powodu. Mianowicie, samochód (jako obiekt badań) charakteryzuje się sporą masą (bezwładnością), względnie dużą sprężystością nadwozia (pomiędzy miejscami oddziaływań aerodynamicznych a punktami mocowania układu wagowego) oraz wyraźnymi własnościami tłumienia oddziaływań dynamicznych w obrębie nadwozia. Cechy te powodują, że przeniesienie reakcji aerodynamicznych z całego nadwozia do punktów mocowania układu pomiarowego łączy się z ewidentnym wygładzeniem („filtracją”) zmiennych, wynikowych reakcji, i w tej sytuacji nie można wychwycić efektów odrywania się najmniejszych wirów (o wysokiej częstotliwości) za pojazdem. Swój przyczynek dokłada tu również podatność samego układu wagowego i jego pewne własności tłumiące. W tej sytuacji można byłoby zarzucić wszystkim badaniom tunelowym niewiarygodność lub niską dokładność, a jednak tego się nie czyni. Celem badań tunelowych pojazdów nie jest bowiem idealne zebranie i przeniesienie wszystkich oddziaływań aerodynamicznych z nadwozia na dynamometr, lecz umożliwienie korzystnej modyfikacji własności aerodynamicznych w wyniku systematycznego porównywania uzyskiwanych efektów i „iteracyjnego” znajdowania najodpowiedniejszego ukształtowania nadwozia. Następuje to przy jednoczesnej akceptacji faktu, że niektóre szybkozmienne efekty aerodynamiczne są nie do odtworzenia z uwagi na własności pojazdu i układu wagowego. Przebieg badań tunelowych sprowadza się wówczas do rejestrowania zmian (pozytywnych i negatywnych) w formach zjawisk lub w wielkości sił aerodynamicznych, w zależności od modyfikacji rozwiązań konstrukcyjnych dokonywanych w oparciu o doświadczenia z poprzednich testów i zarejestrowanych wizualizacji zjawisk aerodynamicznych.

Drugie z wymienionych podejść badawczych, *analityczne*, wiąże się z koniecznością rozwiązania stosownego układu równań Naviera–Stokesa. Wprawdzie przybliżone rozwiązania analityczne są możliwe, lecz jedynie w odniesieniu do najprostszych układów geometrycznych. Pełne rozwiązanie zagadnienia (kwestia istnienia, przedstawienie rozwiązania w postaci funkcyjnej) nie jest możliwe. Rozwiązanie nie istnieje nawet w odniesieniu do sformułowania słabego. Tym samym podejście to, chociaż mieści się w ogólnym kanonie metod rozwiązywania, jest jak na razie podejściem czysto hipotetycznym.

Trzecim podejściem w zakresie badań aerodynamicznych jest prowadzenie stosownych *symulacji numerycznych* w oparciu o sformułowania aproksymacyjne, polegające na przybliżonym odwzorowaniu zagadnienia opisanego układem równań różniczkowych w innej, prostszej przestrzeni, zwykle algebraicznej. Oznacza to zastąpienie układu równań różniczkowych lub całkowych, rozwiązywanych metodami analizy matematycznej, układami równań algebraicznych, które można efektywnie rozwiązać (zwykle jako sekwencję układów równań liniowych) z wykorzystaniem maszyn cyfrowych. Abstrahując na razie od konkretnych metod, można ogólnie stwierdzić, że bardzo dokładne rozwiązania są możliwe do osiągnięcia, a z kolei błędy tych rozwiązań są możliwe do oszacowania. Skutkiem tego symulacje numeryczne są coraz chętniej wykorzystywane do określania rozkładów prędkości i ciśnienia wokół samochodu, umożliwiając przy tym odtworzenie różnorodnych zjawisk aerodynamicznych, w tym również w obszarach trudno dostępnych dla pomiarów eksperymentalnych, a także przedstawienie wyników oddziaływań w formie sił oporu lub docisku (unoszenia) aerodynamicznego.

2. Współczynnik oporu aerodynamicznego

Prowadzenie porównań własności aerodynamicznych pojazdów przez odnoszenie się do wielkości sił oporu aerodynamicznego jest kłopotliwe, ponieważ różne są zwykle wymiary pojazdów. Chodzi tu przede wszystkim o wielkość rzutu pojazdu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu. W celu umożliwienia prostej i efektywnej oceny własności aerodynamicznych różnych pojazdów w zakresie generowanych oporów ruchu, wprowadzono bezwymiarową wielkość, która określa aerodynamiczną jakość ukształtowania profilu samochodu. Wielkość tę nazywa się (czołowym lub profilowym) współczynnikiem oporu aerodynamicznego C_x i definiuje następująco:

$$c_x = \frac{2F}{\rho A v^2}$$

gdzie:

- F – siła oporu aerodynamicznego,
- ρ – gęstość powietrza,
- A – powierzchnia czołowa pojazdu,
- v – prędkość pojazdu (względem powietrza).

Ponieważ współczynnik oporu c_x zależy głównie od profilu nadwozia, uważa się go powszechnie za dobrą miarę określającą jakość ukształtowania nadwozia w kontekście oporów aerodynamicznych samochodu, a przez to świetnie nadającą się do porównywania własności aerodynamicznych różnych pojazdów. Należy jednak pamiętać, że pewna część zachowań i zjawisk aerodynamicznych nie została w przytoczonej zależności dobrze ujęta, co może rzutować na wielkość współczynnika oporu aerodynamicznego. Mianowicie, po pominięciu efektów cieplnych, zachowanie powietrza można określić jako mieszane – jednocześnie konwekcyjne (inercyjne) i dyfuzyjne (lepkie). Udziały energetyczne poszczególnych oddziaływań można przedstawić w zależności od liczby Reynoldsa. Im jest ona większa, tym udział konwekcji jest bardziej znaczący. W skrajnym przypadku płynu nielepkiego nie występują w ogóle oddziaływania dyfuzyjne.

Siła oporów wynikająca z oddziaływań konwekcyjnych jest w zasadzie wypadkową lokalnych sił związanych z rozkładem ciśnienia wokół samochodu. W najprostszym przypadku można to postrzegać jako pewną strefę nadciśnienia z przodu samochodu oraz strefę podciśnienia z tyłu. Sumaryczne oddziaływanie ciśnienia rozłożonego na całym nadwoziu daje efekt w postaci siły oporu ciśnieniowego (konwekcyjnego). Z kolei siła oporów wynikająca z oddziaływań dyfuzyjnych jest po prostu sumaryczną siłą tarcia pomiędzy powietrzem i nadwoziem. Znając (np. z badań tunelowych) ogólną wartość siły oporu aerodynamicznego, nie jesteśmy zatem w stanie określić, jaka jej część związana jest z oddziaływaniami konwekcyjnymi, a jaka z dyfuzyjnymi.

Kwestia ta rzutuje na poprawność wyznaczania współczynnika oporu aerodynamicznego według powszechnie przyjętej i przytoczonej powyżej zależności. Chodzi mianowicie o to, że oddziaływania konwekcyjne zależą nieliniowo od (kwadratu) prędkości, natomiast oddziaływania dyfuzyjne – liniowo od prędkości. W tej sytuacji należy się zastanowić, czy określanie współczynnika oporu aerodynamicznego według całkowitej siły oporu i uznanie, że jest to opór ciśnieniowy (konwekcyjny), jest dopuszczalne. Z problemem tym mamy do czynienia, gdy do wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego wykorzystujemy siły zebrane

przez układ pomiarowy w trakcie badań tunelowych i nie mamy żadnej możliwości wyodrębnienia przyczynków pochodzących od oddziaływań konwekcyjnych i dyfuzyjnych.

Wyznaczając współczynnik oporu aerodynamicznego według podanej powyżej zależności, przyjmujemy automatycznie, że jest on w całości związany z oporami o charakterze konwekcyjnym, gdyż wyliczamy go w oparciu o kwadrat prędkości jazdy. Rzeczywiste udziały obu rodzajów sił oporu w sumarycznym oporze aerodynamicznym pojazdu są jednak zmienne – zależą od prędkości. Tym samym, im mniejsza jest prędkość jazdy, tym udział oporu dyfuzyjnego jest większy, a więc tym większy błąd jest popełniany przy wyznaczaniu współczynnika oporu aerodynamicznego pojazdu. Dysponując wyłącznie wynikami badań tunelowych, nie sposób oszacować wielkości tego błędu, gdyż znamy jedynie sumaryczną wielkość oporu aerodynamicznego. Szansę na określenie wielkości błędu popełnianego przy wyznaczaniu współczynnika oporu aerodynamicznego dają jedynie komputerowe symulacje aerodynamiczne, w których można oddzielnie określić wielkość sił oporu pochodzących od poszczególnych oddziaływań.

3. Cel badań

Przeprowadzane badania mają oszacować wielkość błędu popełnianego z tytułu wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego w oparciu o całkowitą wielkość oporu przepływu. Realizacja tego zadania jest możliwa jedynie w przypadku symulacji numerycznych, gdyż istnieje tu pełna możliwość rozdzielenia wynikowego oporu aerodynamicznego na część związaną z konwekcją i część związaną z dyfuzją.

W oparciu o stosowne badania symulacyjne zamierza się dokładnie określić, jaki wpływ na poziom współczynnika oporu ma prędkość ruchu, oraz dodatkowo, czy i jaki wpływ na to może mieć konfiguracja nadwozia. W badaniach zostanie rozważony zakres prędkości jazdy (od 1 m/s do 100 m/s). Należy przy tym podkreślić, że wszystkie rozważania dotyczą ruchu pojazdów w przestrzeni otwartej, tj. nieograniczonej sztucznie definiowanymi brzegami tunelu aerodynamicznego.

W ramach prowadzonych symulacji zaplanowano zbadanie następujących kwestii:

1. Kształtowanie się współczynnika oporu aerodynamicznego w zależności od charakteru oddziaływań aerodynamicznych.
2. Kształtowanie się współczynnika oporu aerodynamicznego w zależności od prędkości ruchu.
3. Znaczenie konfiguracji nadwozia przy wyznaczaniu, zależnych od charakteru oddziaływań i prędkości ruchu, współczynników oporu aerodynamicznego.
4. Oszacowanie popełnianych błędów z tytułu określania współczynnika oporu aerodynamicznego na podstawie standardowych zależności przy różnych prędkościach jazdy.

4. Charakterystyka metody obliczeniowej

Numeryczna symulacja zjawisk przepływowych została przeprowadzona na podstawie równań Naviera–Stokesa dla ośrodka nieściśliwego i metodą sztucznej ścisłości, polegającą na wprowadzeniu do równania ciągłości dodatkowego członu zawierającego pochodną ciśnienia po czasie, czyli wprowadzeniu sztucznej ścisłości, co zapewnia wystarczające sprzężenie równania ciągłości z równaniami pędu. Cechą charakterystyczną zastosowanej wersji metody była rezygnacja z osiągania limitów ścisłości (w procedurze podwójnego

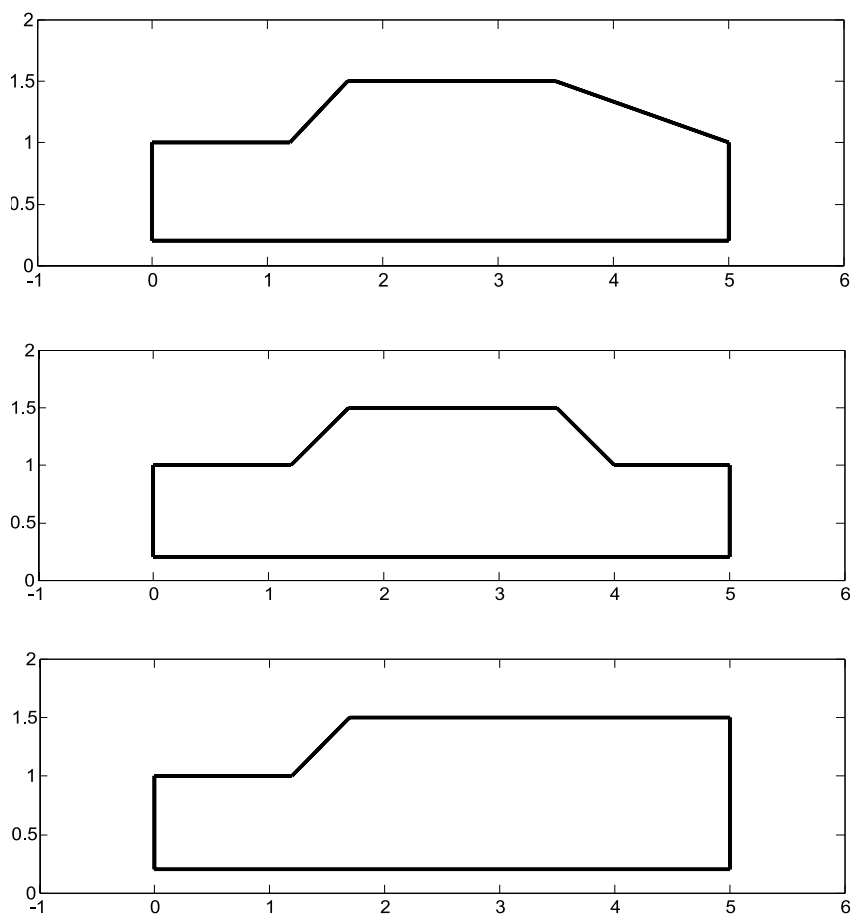
całkowania względem czasu) charakterystycznych dla przepływu nieściśliwego, na rzecz wielkości typowych dla przyjętych warunków przepływu powietrza.

Rozwiązanie dla przyjętych form obszaru przepływu i warunków brzegowych zostało zrealizowane z zastosowaniem aproksymacji przestrzennej, zdefiniowanej zgodnie z wymaganiami metody objętości skończonych. W metodzie tej poszukiwanie rozwiązania dla całego rozpatrywanego obszaru jest przeprowadzane oddzielnie w poszczególnych komórkach siatki obliczeniowej (objętościach skończonych), przy czym w każdej z komórek wszystkie zmienne przyjmują stałe, uśrednione wartości, a ich zmiana wynika wyłącznie z warunków równowagi na ściankach komórek, tj. z równowagi strumieni, wyznaczonej z wykorzystaniem rozwiązania problemu Riemanna dla zrekonstruowanych zmiennych prostych. Przy rozwiązywaniu powyższego problemu wykorzystano schemat numeryczny typu *upwind*, nawiązujący do znaków lokalnych wartości własnych. Wyznaczenie strumieni (konwekcyjnych i lepkich) przez ścianki dyskretyzacji stworzyło podstawę do przeprowadzenia całkowania po czasie i obliczenia wartości zmiennych w poszczególnych komórkach. Przy całkowaniu korzystano z jawnej metody Rungego–Kutty czwartego rzędu, a długość kroku czasowego była dobierana automatycznie.

Ze względu na istotny wpływ gęstości i formy siatki obliczeniowej na dokładność uzyskiwanych rezultatów, a zarazem niemożność przewidzenia z góry właściwej początkowej aranżacji siatki, w celu zapewnienia odpowiedniej dokładności analiz symulacyjnych użyto programu obliczeniowego w wersji adaptacyjnej. Program w pierwszej kolejności umożliwiał stosowne, standardowe obliczenia na siatce wyjściowej. Następnie, na bazie analizy błędów rozwiązania, wyznaczał podobszary siatki, gdzie rozwiązanie nie było wystarczająco dokładne i stosownie zagęszczał dyskretyzację w tych miejscach. Procedura cyklicznego, sukcesywnego uszlachetniania siatki trwała tak długo i w takim stopniu, aż założone na wstępie obliczeń kryterium dokładnościowe zostało spełnione. Program adaptacyjny zawierał, w odróżnieniu od standardowego, dwa nowe elementy: procedurę estymacji błędu rozwiązania w poszczególnych komórkach oraz procedurę uszlachetniania siatki obliczeniowej, polegającą na zmianie gęstości siatki w wyniku sukcesywnej bisekcji najdłuższych krawędzi wybranych komórek dyskretyzacji.

5. Warunki prowadzenia badań i konfiguracje obliczeniowe

W badaniach symulacyjnych odwzorowano typowe warunki ruchu drogowego, tj. każdy pojazd umieszczono w przestrzeni otwartej, nieograniczonej żadnymi fizycznymi brzegami limitującymi wielkość obszaru obliczeniowego, a więc inaczej niż ma to zwykle miejsce w rzeczywistych testach tunelowych (z ograniczoną przestrzenią roboczą). We wszystkich przeprowadzonych symulacjach zastosowano identyczną wielkość obszaru obliczeniowego i zbliżoną (o równej wysokości i długości) formę geometryczną wszystkich badanych profili pojazdów. Wprawdzie badania przeprowadzono dla większej liczby profili [2], jednak w niniejszej prezentacji ograniczono się do trzech najbardziej charakterystycznych, o przesadnie wyidealizowanych (i przez to dość topornych) kształtach (rys. 1), co miało za zadanie sprzyjać większemu zróżnicowaniu rezultatów, a było bez znaczenia z punktu widzenia formalnej poprawności symulacji. Efektem ubocznym takiego ukształtowania profili było pewne zwiększenie wyznaczonych współczynników oporu aerodynamicznego, głównie z tytułu większego wpływu oddziaływań konwekcyjnych. Warunki fizyczne (gęstość i lepkość) ośrodka odpowiadały danym charakterystycznym dla powietrza, a zakres rozważanych prędkości jazdy wynosił od 1 m/s (3,6 km/h) do 100 m/s (360 km/h).



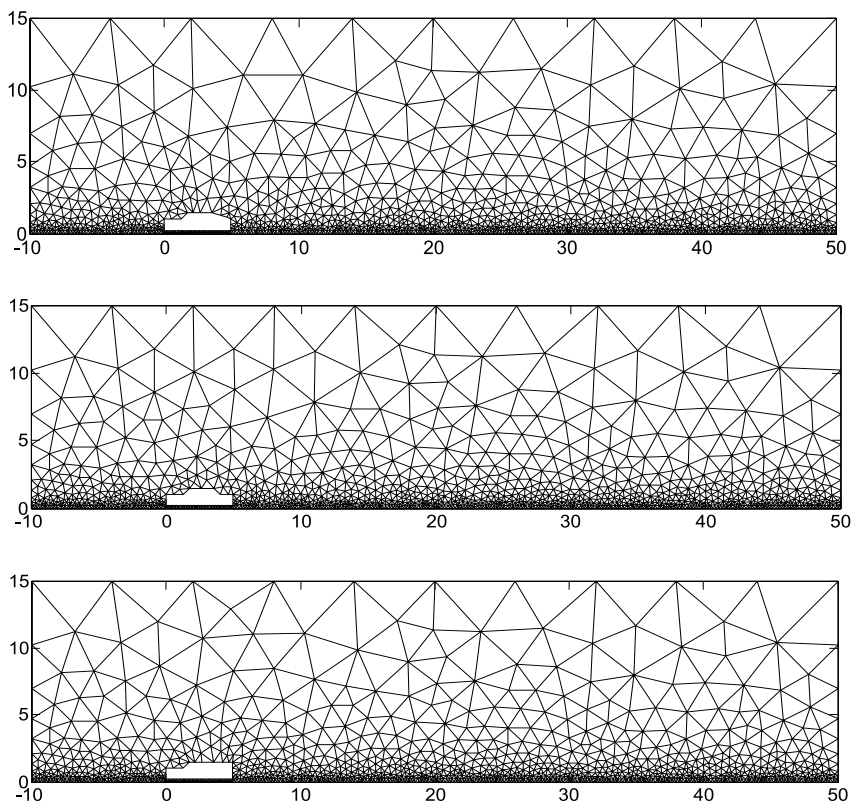
Rys. 1. Profile rozważanych pojazdów (wymiary w metrach)

Fig. 1. Car forms under consideration (sizes in meters)

Wprawdzie symulacja aerodynamiczna przepływu wokół pojazdów wymaga zazwyczaj prowadzenia analizy w przestrzeni trójwymiarowej, to jednak z uwagi na to, że poszukujemy zależności pomiędzy poziomem współczynnika oporu aerodynamicznego a kształtem dwuwymiarowego profilu pojazdu, uzasadnione było prowadzenie symulacji dwuwymiarowych, tym bardziej że czas przygotowania modeli i czas obliczeń są tu zdecydowanie krótsze, a same symulacje są tym samym o wiele efektywniejsze.

Umieszczenie wygenerowanych modeli pojazdów w obszarze „wirtualnego tunelu aerodynamicznego” pozwoliło zdefiniować konfiguracje obszarów obliczeniowych. Zewnętrzne wymiary obszarów obliczeniowych przyjęto stałe, o wysokości 15 metrów i długości 60 metrów, a pojazdy umieszczano zawsze w jednym i tym samym miejscu. Przyjęcie dużych zewnętrznych rozmiarów obszaru obliczeniowego miało na celu uniknięcie blokowania (dławienia) przepływu i korekcy osiągniętych rezultatów. W oparciu o zewnętrzne i wewnętrzne

granice przyjętych konfiguracji obliczeniowych wygenerowano wyjściowe (początkowe) siatki obliczeniowe (rys. 2).



Rys. 2. Początkowe siatki obliczeniowe (wymiary w metrach)

Fig. 2. Initial computational meshes (sizes in meters)

Warunki brzegowe dla każdego obszaru obliczeniowego zostały zdefiniowane zgodnie z poniższym opisem:

- na profilach pojazdów: warunki typu „ściana”,
- na brzegu lewym i prawym: odpowiednio warunki typu „wlot” i „wylot”,
- na górnym brzegu: warunki typu „symetria”,
- na dolnym brzegu: warunki typu „ruchoma ściana”.

Dla opisu rozważanych modeli konfiguracji obszaru obliczeniowego wraz z odpowiadającymi im warunkami brzegowymi wprowadzono jednolitą notację w myśl poniższego szablonu:

ABCDE

gdzie poszczególne symbole (A, B, C, D i E) oznaczają:

A symbol profilu nadwozia pojazdu, konkretnie:

- h *hatchback*,
- n *notchback*,
- s *squareback*,

- B liczba setek m/s prędkości ruchu,
- C liczba dziesiątek m/s prędkości ruchu,
- D liczba jednostek m/s prędkości ruchu,
- E symbol rozważanych oddziaływań fizycznych:
 - n wszystkie (równania Naviera–Stokesa),
 - e konwekcyjne (równania Eulera),
 - d dyfuzyjne (równania Stokesa).

Przyjęcie do symulacji trzech profili nadwozia, a następnie prowadzenie symulacji z wyodrębnieniem efektów pochodzących od poszczególnych rodzajów oddziaływań fizycznych dla sześciu prędkości jazdy (faktycznie prędkości nawiewu): 1, 4, 10, 20, 40 i 100 m/s, skutkowało ogólną liczbą 54 zestawów rezultatów symulacji.

6. Wyniki symulacji

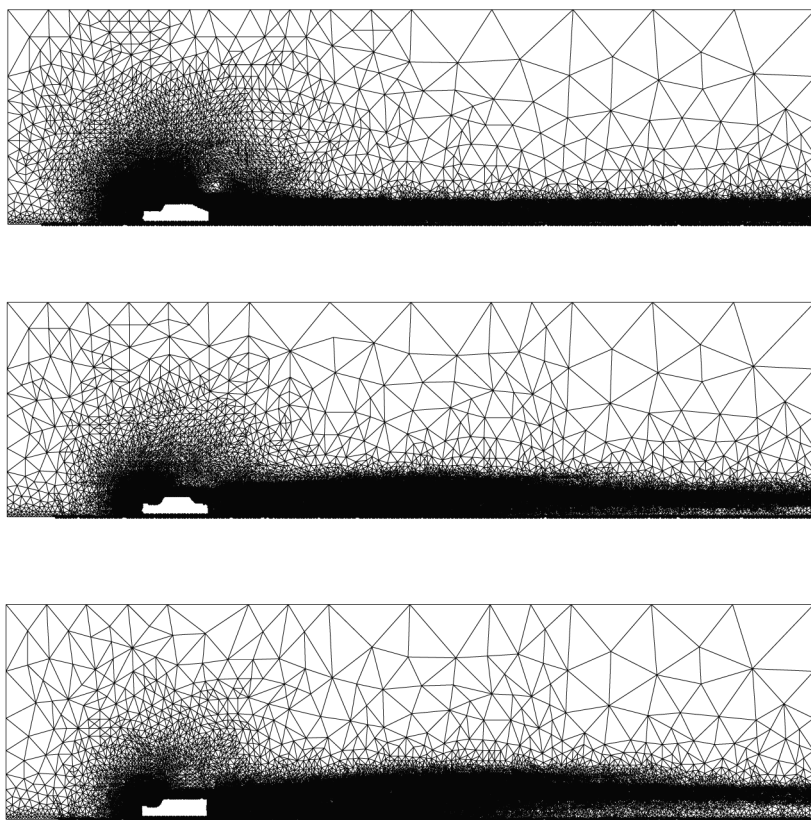
Wyniki symulacji aerodynamicznych pojazdów przedstawia się zwyczajowo w dwóch podstawowych formach:

- jako bezpośrednie rezultaty symulacji, tj. rozkłady zmiennych prostych (ciśnienia i składowych prędkości) w obszarze przepływu,
- jako pośrednie (zagregowane) rezultaty symulacji, tj. zależności wielkości sił (lub współczynników) aerodynamicznych w funkcji czasu lub konkretnych parametrów symulacji.

Prezentacja bezpośrednich rezultatów wymaga zawsze kolorowych wizualizacji, przez co nie zawsze jest akceptowana. Ponadto tego rodzaju wizualizacje służą głównie analizie szczegółowych zjawisk lub interakcji aerodynamicznych i jeśli takich dociekań się nie prowadzi, są one w zasadzie niepotrzebne. Wadą takich wizualizacji jest też to, że odnoszą się tylko do pojedynczej chwili symulacji przepływu nieustalonego. Często dobrym substytutem kolorowych wizualizacji rozkładu poszczególnych zmiennych fizycznych okazuje się prezentacja końcowych form siatek obliczeniowych dla symulacji prowadzonych adaptacyjnie, gdyż lokalny stopień zagęszczania siatki jest zwykle świadectwem dużej zmienności zjawisk aerodynamicznych zachodzących w danym podobzdarze. Przykładowe, końcowe („poadaptacyjne”) formy siatek obliczeniowych przedstawiono na rys. 3.

Do prowadzenia całościowych ocen zachowań aerodynamicznych bardziej nadają się jednak pośrednie rezultaty symulacji i związane z nimi zagregowane mierniki jakości aerodynamicznej, do jakich zalicza się m.in. współczynnik oporu dynamicznego. Zaletą takiej charakterystyki aerodynamicznej jest możliwość jednoczesnego odniesienia się do kilku badanych konfiguracji obliczeniowych, przez co o wiele łatwiejsze jest prowadzenie porównań zarówno w funkcji przebiegu współczynnika oporu aerodynamicznego w czasie, jak i w funkcji poszczególnych parametrów symulacji. Pozwoliło to w rozważanym przypadku wyprowadzać bezpośrednie wnioski odnośnie do konsekwencji wpływu wybranych czynników (parametrów):

- rodzaju oddziaływań fizycznych,
 - prędkości ruchu pojazdu,
 - rodzaju nadwozia,
- na wielkość oporu lub współczynnika oporu aerodynamicznego.



Rys. 3. Przykładowe końcowe formy siatek kolejno dla modeli: h100n, n100n i s100n

Fig. 3. Exemplary final mesh forms for models: h100n, n100n and s100n, respectively

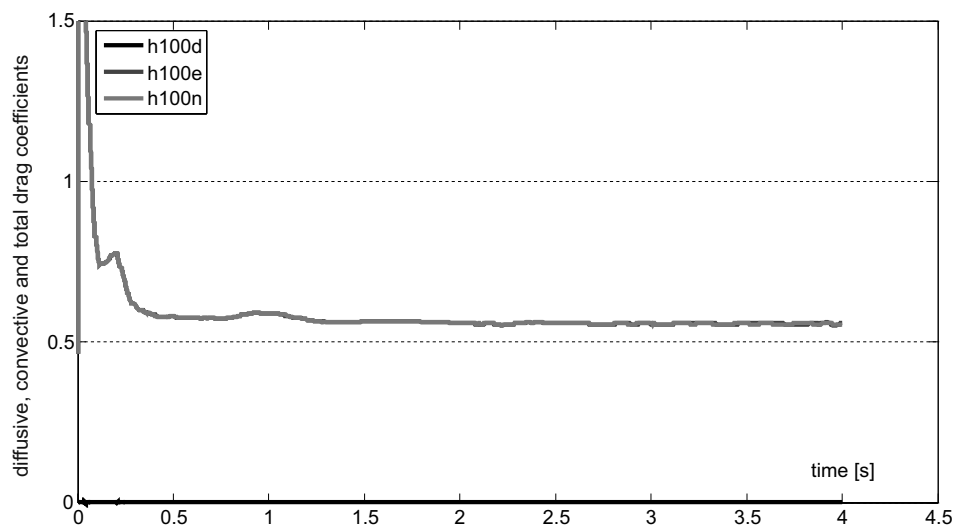
Na potrzeby przeprowadzenia efektywnej i jednoznacznej analizy wpływu wymienionych czynników na kształtowanie się oporu aerodynamicznego konieczne okazało się sporządzenie szerokiego wachlarza graficznych zestawień porównawczych, obejmującego w podstawowej wersji wykresy przebiegu współczynników oporu aerodynamicznego:

- dla poszczególnych rodzajów oddziaływań (konwekcyjnego, dyfuzyjnego i sumarycznego) w funkcji czasu, oddzielnie dla każdego rodzaju nadwozia i każdej prędkości jazdy,
- dla poszczególnych rodzajów nadwozia (*hatchback*, *notchback* i *squareback*) w funkcji czasu, oddzielnie dla każdego rodzaju oddziaływań i każdej prędkości jazdy,
- dla poszczególnych prędkości jazdy (1, 4, 10, 20, 40 i 100 m/s) w funkcji czasu, oddzielnie dla każdego rodzaju nadwozia i każdego rodzaju oddziaływań.

Wymienione powyżej wyjściowe zestawienia wykresów porównawczych uzupełniono dodatkowymi charakterystykami przedstawiającymi przebiegi zmodyfikowanych współczynników oporu lepkiego w liniowej (a nie kwadratowej) zależności od prędkości jazdy. Ponadto dokonano uśrednień zmiennych w czasie wielkości współczynników oporu aerodynamicznego, opierając się zawsze na ostatnich 33% kroków czasowych poszczególnych symulacji. Otrzymane uśrednione wielkości posłużyły do wykreślenia zależności współczyn-

ników oporu aerodynamicznego w funkcji prędkości jazdy, dla poszczególnych rodzajów nadwozia i rodzajów oddziaływań. Wybrane, poglądowe zestawienia graficzne zależności współczynników oporu aerodynamicznego zamieszczono na poniższych wykresach:

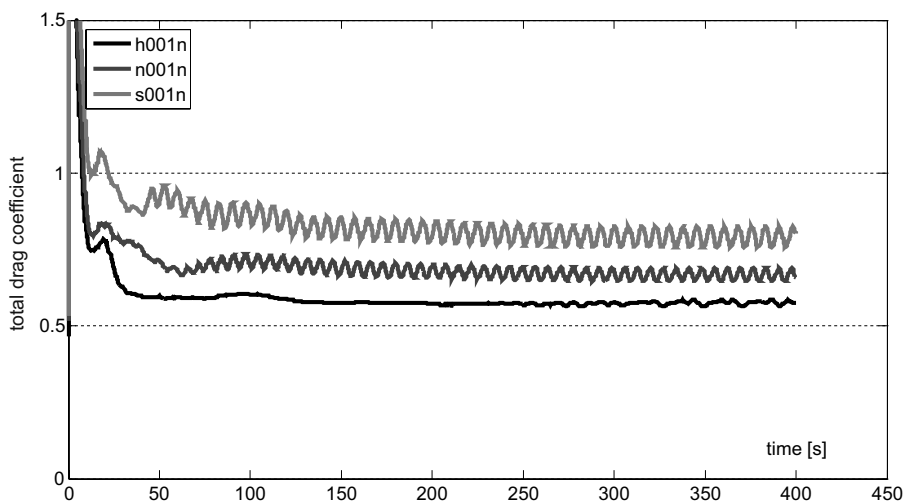
- zależność współczynnika oporu aerodynamicznego wynikającego z różnych oddziaływań fizycznych (kolejno: dyfuzyjnych, konwekcyjnych i sumarycznych) od czasu, w warunkach: nadwozie *hatchback*, prędkość 100 m/s (rys. 4),
- zależność współczynnika oporu aerodynamicznego różnych nadwozi (*hatchback*, *notch-back* i *squareback*) od czasu, w warunkach: prędkość 1 m/s, oddziaływanie pełne, tj. konwekcyjne i dyfuzyjne (rys. 5),
- zależność uśrednionego (w czasie) współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy, przy uwzględnieniu obu rodzajów oddziaływań fizycznych (rys. 6),
- zależność uśrednionego (w czasie) współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy, przy uwzględnieniu jedynie oddziaływań dyfuzyjnych (rys. 7).



Rys. 4. Zależność współczynników oporu aerodynamicznego zdefiniowanych przez oddziaływania dyfuzyjne, konwekcyjne i sumaryczne, od czasu dla nadwozia *hatchback* i prędkości 100 m/s

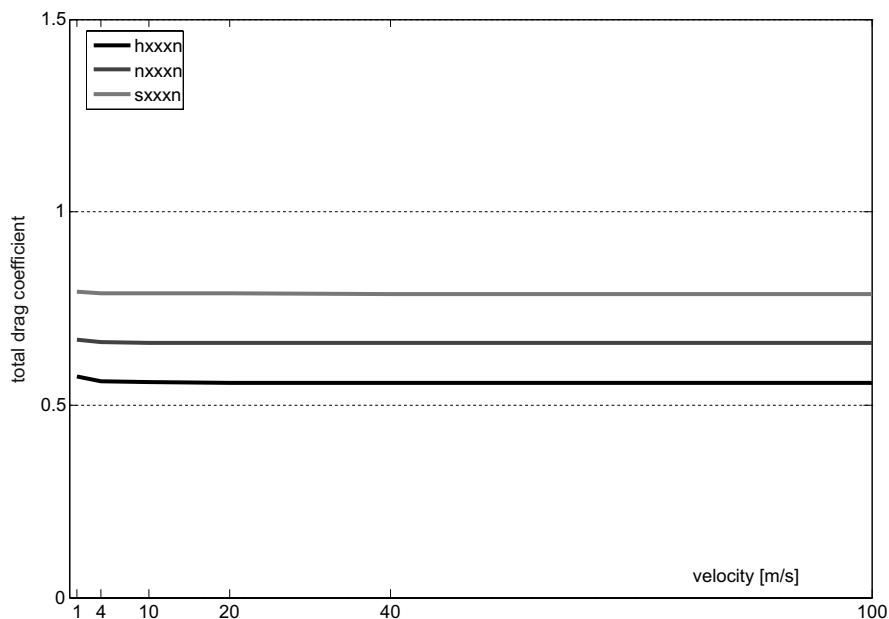
Fig. 4. Dependence of drag coefficients defined by diffusive, convective and total effects, on time for the hatchback car form and at 100 m/s

Na rysunkach przedstawiających przebiegi współczynników oporu aerodynamicznego w czasie (rys. 4 i 5) można zauważyć duże fluktuacje w początkowych stadiach symulacji. Wynikają one z przyjęcia dla całego obszaru przepływu fikcyjnych warunków początkowych, odpowiadających warunkom brzegowym dla prędkości na wlocie i ciśnienia na wylocie, jednak w miarę szybko przepływ osiągał już właściwą postać.



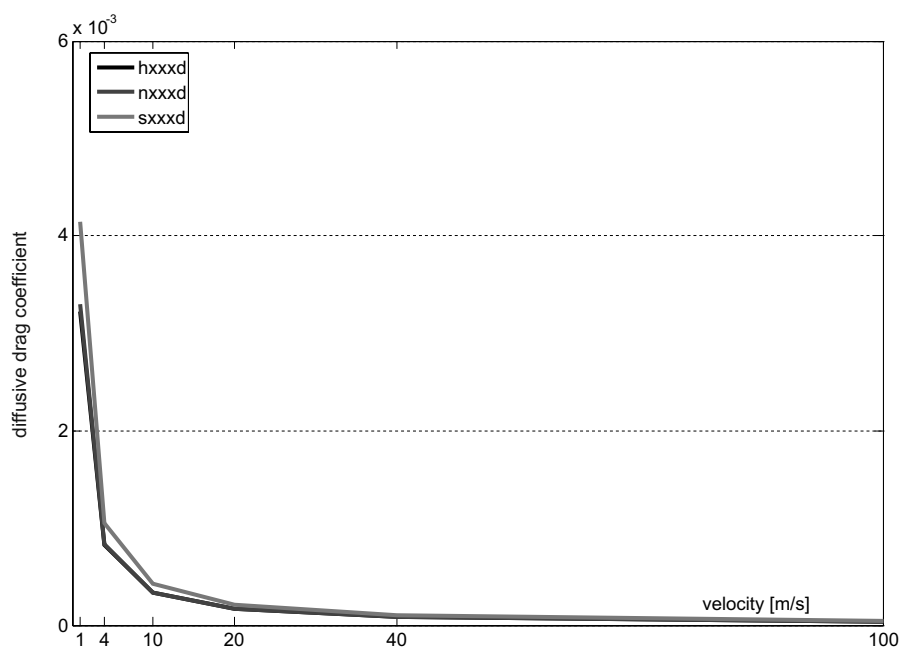
Rys. 5. Zależność współczynników oporu aerodynamicznego nadwozi *hatchback*, *notchback* i *squareback*, od czasu dla pełnego zestawu oddziaływań fizycznych i prędkości 1 m/s

Fig. 5. Dependence of drag coefficients for the hatchback, notchback and squareback forms, on time for all, convective and diffusive, effects and at 1 m/s



Rys. 6. Zależność współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości (pełny zestaw oddziaływań fizycznych)

Fig. 6. Dependence of drag coefficient on the driving speed (full combination of physical effects)



Rys. 7. Zależność współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości przy jedynie oddziaływaniach dyfuzyjnych

Fig. 7. Dependence of drag coefficient on the driving speed, for the diffusive effects only

7. Podsumowanie

Zasadniczym celem symulacji przeprowadzonych w pracy było oszacowanie zależności współczynnika oporu aerodynamicznego pojazdów samochodowych od prędkości jazdy. Wiązało się to w pierwszej kolejności z identyfikacją tego, jaka część oporu aerodynamicznego wynika z oddziaływań konwekcyjnych (inercyjnych), a jaka jego część jest związana z oddziaływaniami dyfuzyjnymi (lepkimi). Zależność, na podstawie której powszechnie wyznacza się współczynnik oporu, zakłada, że całość oporu aerodynamicznego ma charakter konwekcyjny. Jest to słuszne jedynie w odniesieniu do ośrodka nielepkiego, ale nie dla przypadku powietrza. Im prędkość ruchu jest mniejsza, tym większy jest udział oddziaływań dyfuzyjnych w oporze powietrza i tym samym większy jest błąd popełniany podczas wyznaczania współczynnika oporu aerodynamicznego.

W artykule rozważono kształtowanie się współczynnika oporu dla kilku różnych konfiguracji geometrycznych nadwozia i kilku prędkości jazdy. Profile pojazdów zostały celowo uproszczone, aby przy zachowaniu ogólnego charakteru linii nadwozia pomijać wpływ detali konstrukcyjnych na wyniki symulacji. W tej sytuacji ostre („kanciaste”) kształty nadwozia powodowały dodatkowy wzrost oddziaływań konwekcyjnych. Pewne dodatkowe uwypuklenie oddziaływań konwekcyjnych było również konsekwencją prowadzenia symulacji dwuwymiarowych. W badaniach przeanalizowano łącznie 54 różne konfiguracje obliczeniowe,

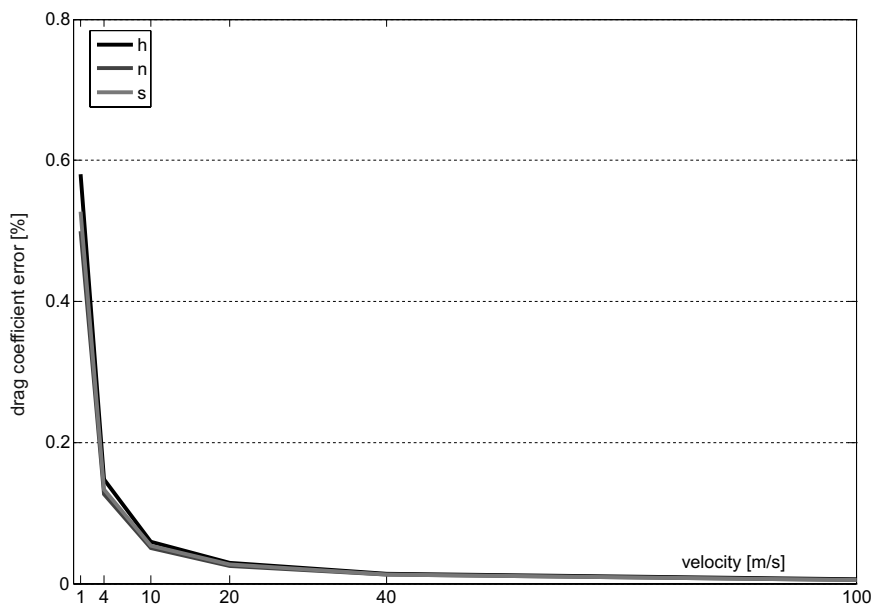
tj. 18 niezależnych konfiguracji dla 3 rodzajów oddziaływań fizycznych: dyfuzji (równania Stokesa), konwekcji (równania Eulera) i konwekcji–dyfuzji (równania Naviera–Stokesa).

Analizy aerodynamiczne oraz graficzne wizualizacje przebiegu współczynników oporu aerodynamicznego pomogły dokonać licznych spostrzeżeń oraz wyprowadzić ogólne wnioski charakteryzujące wpływ czynników fizycznych, geometrycznych i ruchowych na kształtowanie współczynnika oporów aerodynamicznych pojazdów:

1. Wielkości konwekcyjnych i „sumarycznych” (standardowych) współczynników oporu aerodynamicznego są bardzo zbliżone, a wpływ rodzaju nadwozia na ich wielkość można scharakteryzować następująco: *squareback* > *notchback* > *hatchback*.
2. Dyfuzyjny współczynnik oporu jest największy w przypadku modelu *squareback*, przy czym zasada ta obowiązuje bez względu na prędkość ruchu pojazdu.
3. Dyfuzyjne współczynniki oporu maleją hiperbolicznie wraz ze wzrostem prędkości ruchu, bez względu na profil pojazdu.
4. Konwekcyjne współczynniki oporu nie zależą od prędkości ruchu pojazdu.
5. Całkowite współczynniki oporu w niewielkim stopniu zależą od prędkości ruchu i są najwyższe przy małych prędkościach.

Na podstawie oceny błędów wyznaczania współczynnika oporu aerodynamicznego (rys. 8) można przyjąć następującą konkluzję:

błędy wyznaczania współczynnika oporu aerodynamicznego nie przekraczają 1% i maleją wraz ze zwiększeniem prędkości ruchu samochodu.



Rys. 8. Błędy wyznaczenia współczynnika oporu w zależności od prędkości ruchu

Fig. 8. Errors of the drag coefficient determination depending on driving speed

Literatura

- [1] Barnard R.H., *Road vehicle aerodynamic design*, Longman, Harlow 1996.
- [2] Maciejewski M., *O zależności współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy*, Raport PB-51-168/2008, Politechnika Poznańska, Poznań 2008, 1-77.