

Współczynniki aerodynamiczne pojazdów kolejowych w zagadnieniu oddziaływania wiatru bocznego – wprowadzenie i badania wstępne

Aerodynamic coefficients of railway vehicles in cross-wind – introduction and preliminary research



Piotr Lalewicz

Mgr inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Mostów i Kolei

piotr.lalewicz@pwr.edu.pl



Danuta Bryja

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Mostów i Kolei

danuta.bryja@pwr.edu.pl

Streszczenie: W ostatnich latach, w Europie i na świecie obserwuje się dynamiczny rozwój kolei dużych prędkości. Przy rosnących prędkościach, aerodynamika pojazdów kolejowych staje się coraz bardziej istotnym zagadnieniem. W artykule odniesiono się do problemu stateczności pojazdów przy wietrze bocznym i omówiono wpływ prędkości pojazdu na to zjawisko. Do określania sił aerodynamicznych występujących w tym zagadnieniu wykorzystuje się sześć współczynników aerodynamicznych. Opisano metody służące do ich wyznaczenia – badania modelowe w tunelach wiatrowych i badania numeryczne z użyciem symulacji CFD (*Computational Fluid Dynamics*), w odniesieniu do normy PN-EN 14067-6:2018-10 i wymagań TSI. Przedstawiono wyniki wstępnych badań własnych, których celem było rozpoznanie możliwości obliczeniowych analiz CFD jako narzędzia do numerycznego wyznaczenia współczynników aerodynamicznych na potrzeby dalszych badań prowadzących do opracowania metody analizy drgań układu pociąg – most, poddanego działaniu wiatru bocznego.

Słowa kluczowe: Pojazdy kolejowe, Stateczność przy wietrze bocznym, Współczynniki aerodynamiczne, Analizy numeryczne CFD

Abstract: In recent years, dynamic development of high-speed railways is observed in Europe and in the world. Due to the train speeds increase, aerodynamics of railway vehicles becomes more and more important issue. In the paper, the cross-wind stability problem of a railway vehicle and the influence of the train speed on this phenomenon is discussed. As a derailment risk analysis requires to determine in total six cross-wind aerodynamic forces and moments acting on a given vehicle, a knowledge of six associated with them aerodynamic coefficients is a groundwork for train stability analysis. Two most common methods of analysis of air flow around trains are pointed out – wind tunnel testing and CFD method (*Computational Fluid Dynamics method*). Both methods are described in the paper, in reference to PN-EN 14067-6:2018-10 and TSI requirements, and later a CFD method is applied to examine a basic train model. The main aim of this preliminary research was to recognize CFD method as a tool for a further research on cross-wind-induced vibrations of a train - bridge system.

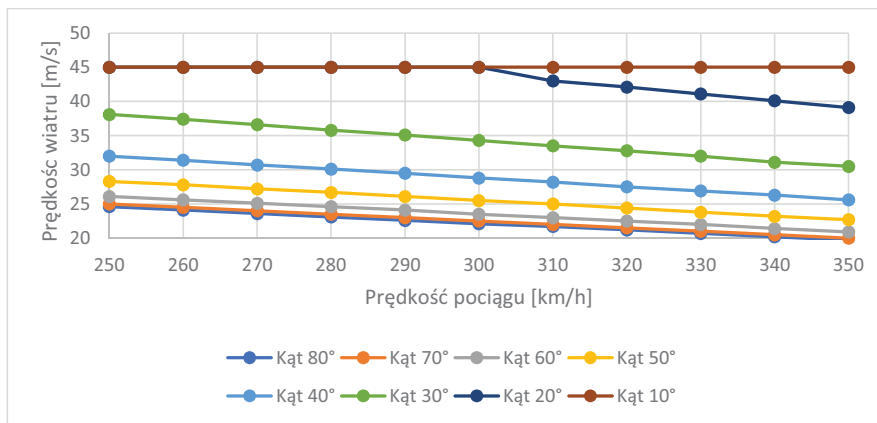
Keywords: Railway vehicles; Cross-wind stability; Aerodynamic coefficients; CFD analyses

W ostatnich latach, w Europie i na świecie obserwuje się dynamiczny rozwój kolei dużych prędkości. Przy rosnących prędkościach jazdy, aerodynamika pojazdów kolejowych staje się coraz bardziej istotnym zagadnieniem, ponieważ zjawiska spowodowane opływem powietrza wokół poruszającego się pociągu mają dominujący wpływ na jego właściwości trakcyjne. Podstawowym problemem rozważanym szeroko w literaturze już od ponad 80 lat są aerodynamiczne opory ruchu [2] – aby osiągać większe prędkości stosuje się opływowe kształty dziobu i redukuje masę pociągów. Znaczny wzrost prędkości pojazdów kolejowych i związane z tym efekty aerodynamiczne mają także wpływ na otoczenie. Pociąg przejeżdżają-

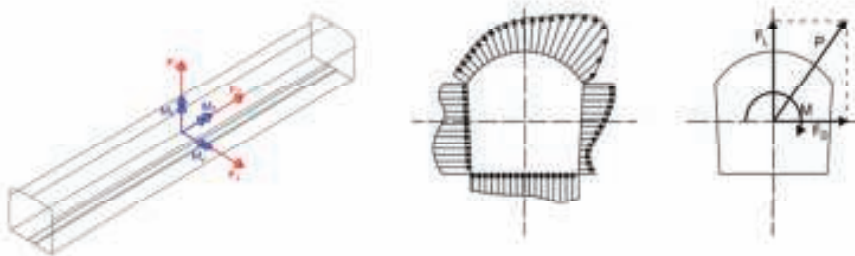
cy z dużą prędkością wywołuje duże zmiany ciśnienia powietrza na poboczu toru, które zagrażają ludziom na peronie i pracownikom torowym [13]. Dodatkowo, wysokie ciśnienia chwilowe mogą powodować awarie zmęczeniowe infrastruktury przytorowej [2]. Wysokie, uderzeniowe fale ciśnienia powstają także podczas mijania się dwóch pociągów, stanowiąc zagrożenie dla bezpieczeństwa ich ruchu ze względu na duże siły dynamiczne działające na czoło obu pociągów. Podobne zjawisko występuje podczas przejazdu pociągu przez tunel – szczególnie w chwili wjazdu lub wyjazdu z tunelu. W wielu krajach wprowadzono ograniczenia prędkości w wąskich tunelach [2] ze względu na znaczne ciśnienia występujące przy dużych

prędkościach pociągów. Innym niekorzystnym zjawiskiem powiązaniem z wpływami aerodynamicznymi jest podrywanie podsypki, które prowadzi do uszkodzeń taboru i torowiska [13].

W aspekcie bezpieczeństwa jazdy zasadnicze znaczenie ma jednak zapewnienie stateczności poprzecznej każdego pojazdu wchodzącego w skład pociągu, przy obciążeniu wiatrem bocznym (np. [5], [3]). W historii, również tej współczesnej można odnotować niejedną katastrofę kolejową spowodowaną poprzecznym oddziaływaniem wiatru. Przykładem jest wykolejenie pasażerskiego pociągu ekspresowego Inaho w grudniu 2005 roku w Japonii [18] lub spowodowane silnym bocznym wiatrem uderzenie pojazdu w peron stacyjny w miejsco-



1. Krzywe CRWC w zależności od kąta natarcia wiatru bocznego, przy konfiguracji terenu w postaci nasypu o wysokości 6 m, [13]



2. Siły aerodynamiczne działające na pojazd i uproszczenie do sił działających w przekroju

wości Moston w Anglii, w 2015 roku [17], i wiele innych. Z tego względu, w literaturze pojawia się coraz więcej prac, w których badany jest wpływ bocznego wiatru na pociągi poruszające się z dużymi prędkościami.

Przez aerodynamiczną utratę stateczności poprzecznej pojazdu kolejowego rozumiane jest oderwanie się kół pojazdu od szyny spowodowane destabilizującymi siłami oddziaływania wiatru [13], zależnymi też od prędkości jazdy. Zgodnie z wytycznymi [13], [12] redukcja nacisku koła na szynę nie powinna przekraczać 90% normalnego nacisku pochodzącego od masy pojazdu. Na tej podstawie wyznacza się graniczne (dopuszczalne) wartości prędkości wiatru w zależności od prędkości pojazdu i określa jego charakterystyczne krzywe wiatrowe (CWC) [13], [12]. Porównuje się je z charakterystycznymi referencyjnymi krzywymi wiatrowymi (CRWC), przy czym krzywe CWC projektowanego taboru powinny znajdować się ponad krzywymi CRWC. Przykładowe krzywe referencyjne pokazano na rysunku 1, w zależności od kąta natarcia wiatru bocznego odmierzanego od osi toru.

Siły i współczynniki aerodynamiczne

Aby określić redukcję nacisku koła na szynę należy wyznaczyć siły destabilizujące, tj. siły aerodynamiczne oddziaływujące na pojazd. W ogólnym przypadku na pojazd działa sześć sił (obciążeń) aerodynamicznych: trzy składowe siły ogólnej i trzy składowe momentu ogólnego, które są wynikiem sprowadzenia ciśnienia wiatru rozłożonego na powierzchniach pojazdu do jego środka ciężkości, jak na rysunku 2. W praktyce obliczeniowej uwzględnia się fakt, że dominujący wpływ na stateczność pojazdu kolejowego mają siły działające w przekroju prostopadłym do kierunku jazdy i zagadnienie upraszcza się biorąc pod uwagę tylko trzy składowe obciążenia aerodynamicznych: siłę boczną F_D , siłę unoszącą F_L i moment odchyłający M (inaczej moment obracający) [5], [16], [11], [9], [19], [7], [20]. Są one opisane następującymi wzorami z literatury (np. [16], [21], [10])

$$F_D = \frac{\rho U^2}{2} A_{ref} C_D \quad (1)$$

$$F_L = \frac{\rho U^2}{2} A_{ref} C_L \quad (2)$$

$$M = \frac{\rho U^2}{2} A_{ref} b_{ref} C_M \quad (3)$$

gdzie U jest prędkością wiatru, ρ gęstością powietrza. A_{ref} jest powierzchnią odniesienia, którą w przypadku pojazdów kolejowych przyjmuje się najczęściej jako powierzchnię boczną od strony nawietrznej dla wszystkich trzech sił, natomiast b_{ref} jest długością odniesienia określaną zazwyczaj jako wysokość pojazdu (np. [5], [16], [11], [7], [20]). Wyjątkowo Yongle Li w swoich pracach [9], [19] proponuje, aby jako powierzchnię odniesienia przy obliczaniu siły unoszącej i momentu odchyłającego stosować powierzchnię dolną zamiast bocznej, analogicznie jak przyjmuje się w konstrukcjach mostowych.

Do wyznaczenia obciążeń aerodynamicznych (1)–(3) konieczne jest określenie parametrów C_D , C_L , C_M nazywanych bezwymiarowymi współczynnikami aerodynamicznymi, które opisują opływ powietrza wokół analizowanego ciała (pojazdu). Współczynniki te są specyficzne dla pojazdu o danej geometrii, wyznacza się je na podstawie badań, zazwyczaj badań modelowych w tunelu wiatrowym. Badania te przeprowadza się przy różnych konfiguracjach terenu, ustalając w każdym eksperymencie, poprzez pomiar, wartości sił aerodynamicznych F_i i momentów M_i , przy czym $i = x, y, z$ w ogólnym przypadku sześciu składowych aerodynamicznych (por. z rysunkiem 2). Na tej podstawie są obliczane współczynniki aerodynamiczne, według wzorów

$$C_i = \frac{F_i}{0,5\rho U^2 A_{ref}} \quad (4)$$

$$C_{m,i} = \frac{M_i}{0,5\rho U^2 A_{ref} b_i} \quad (5)$$

bezpośrednio powiązanych z definicjami obciążeń aerodynamicznych (1)–(3), co umożliwia wyznaczanie obciążeń danego pojazdu w wielu scenariuszach obliczeniowych.

Obecnie, dzięki rozwojowi metod numerycznych, badania w tunelach wiatrowych są coraz częściej zastępowane lub uzupełniane badaniami numerycznymi z użyciem metod CFD (Computational Fluid Dynamics).

Wtedy siły i momenty aerodynamiczne potrzebne do obliczenia współczynników aerodynamicznych (4) i (5) wyznacza się nie przez pomiar, lecz poprzez całkowanie numeryczne symulowanego rozkładu ciśnienia powietrza na powierzchni ciała. Oba podejścia będą dalej omówione bardziej szczegółowo.

Badania modelowe w tunelach aerodynamicznych

Tunele aerodynamiczne umożliwiają badanie opływu ciała przez powietrze o zadanych parametrach, a ich główną zaletą jest rzeczywiste odwzorowanie przepływającego medium (powietrza). Tunel stanowi zamkniętą przestrzeń, w której generuje się ciągły ruch powietrza. Umieszcza się w nim modele badanych obiektów, obserwując przepływ i mierząc siły działające na model. Badania w tunelach wiatrowych dają bardzo duże możliwości i zgodnie z zaleceniami TSI [13] przyjmuje się, że są one jedynym dostatecznie wiarygodnym źródłem określania aerodynamicznych właściwości pociągu. Jednak dobre przygotowanie badań niesie ze sobą wiele problemów a wyniki zależą od dużej liczby parametrów. Przy skalowaniu modelu, oprócz założenia kryteriów podobieństwa (Buckingham, 1914) [21], [10], [6] i doboru odpowiednich charakterystyk wiatru należy również uwzględnić współczynnik blokady określający jaką część swobodnego przepływu w tunelu blokuje umieszczony w nim model [3]. Testy przeważnie przeprowadza się dla przepływu o niskiej turbulencji, jednak często istotnym elementem jest chropowatość warstwy przyściennej zaburzającej przepływ. W badaniach aerodynamiki pojazdów kolejowych szczególne znaczenie ma warstwa przyziemna [5], [4], którą uzyskuje się dwiema metodami – bierną i czynną. Metoda bierna polega na stosowaniu dywanów lub klocków nadających odpowiednią chropowatość warstwie podłoża, zaś metoda czynna opiera się na wykorzystywaniu dodatkowych źródeł wiatru, np. wentylatorów ustawionych prostopadle do kierunku przepływu [6].

Istotnym parametrem każdej analizy przepływu jest liczba Reynoldsa reprezentująca stosunek sił bezwładności do sił lepkości w przepływie. W wielu pracach wykazano [21], [10], [15], że współczynniki aerodynamiczne zależą od tego parametru osiągając duże wartości w zakresie przepływu laminarnego, wartości minimalne w zakresie krytycznym a następnie, w zakresie nadkrytycznym, wartości rosnące nieznacznie wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa.

Do badania współczynników aerodynamicznych pojazdów kolejowych, w tunelach wiatrowych, przyjmuje się wartości liczby Reynoldsa z zakresu nadkrytycznego, takie aby ich wzrost nie miał wpływu na uzyskiwane siły i momenty [13], [16]. Najczęściej przyjmuje się wartości z zakresu $2 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ [3]. W badaniach rozpatruje się różne konfiguracje terenu. Norma [12] i TSI [13] podają trzy podstawowe konfiguracje: teren płaski, jednotorowy nasyp o wysokości 1 m i nasyp dwutorowy o wysokości 6 m z możliwością ustawienia pojazdu po stronie nawietrznej i zawietrznej. Specjalne konfiguracje, takie jak estakady i długie mosty wymagają indywidualnych analiz [11], [9], [19], [7], [20].

Po doboru parametrów badań, norma [12] zaleca przeprowadzenie badań porównawczych. Wykorzystuje się do tego jeden z trzech modeli: model pociągu ETR 500, TGV Duplex lub ICE 3, dla których mnogość badań pozwoliła na precyzyjne określenie parametrów aerodynamicznych. Przykładowe wyniki dla pojazdu ICE 3

pokazano na rysunku 3. Należy zwrócić uwagę, że podane na rysunku wartości współczynników aerodynamicznych wahają się w granicach od -10 do $+10$. W literaturze (np. [5], [19]) współczynniki przyjmują wartości z zakresu od $-2,5$ do $+2,5$. Powodem tej rozbieżności jest zastosowanie w normie [12] znormalizowanej powierzchni odniesienia, która niezależnie od typu pojazdu wynosi 10 m^2 . Po przeskalowaniu na rzeczywistą powierzchnię odniesienia uzyskuje się wartości współczynników zbliżone z literaturą.

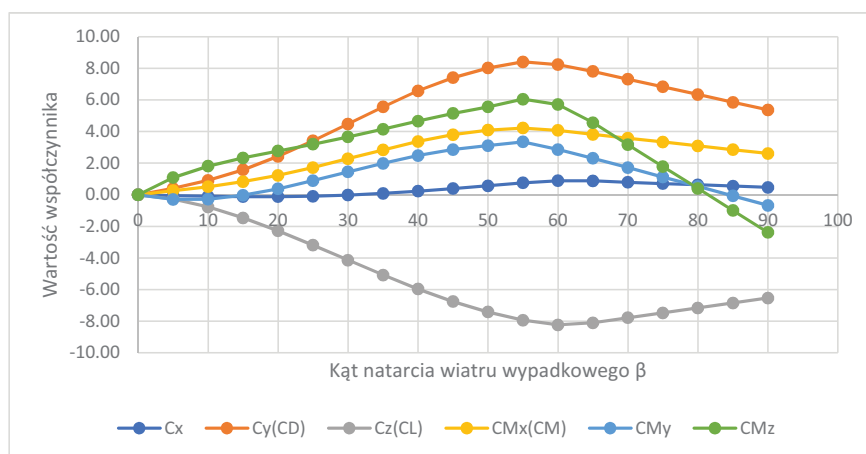
Współczynniki aerodynamiczne na rysunku 3 zależą od kąta natarcia tzw. wiatru wypadkowego, którego prędkość jest wynikiem złożenia wektorów prędkości wiatru boczno i prędkości przepływu powietrza spowodowanego jazdą pociągu, co pokazano na rysunku 4. Prędkość wypadkowa względem poruszającego się pojazdu jest wyrażona wzorem

$$U = \sqrt{(V + W \sin(\gamma))^2 + (W \cos(\gamma))^2}$$

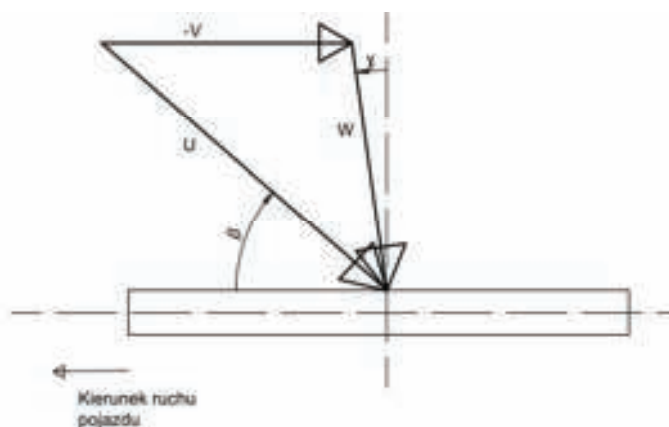
$$= \sqrt{V^2 + 2VW \sin(\gamma) + W^2} \quad (6)$$

gdzie γ jest naturalnym kątem padania wiatru, W i V przedstawiają odpowiednio naturalną prędkość wiatru i prędkość pojazdu.

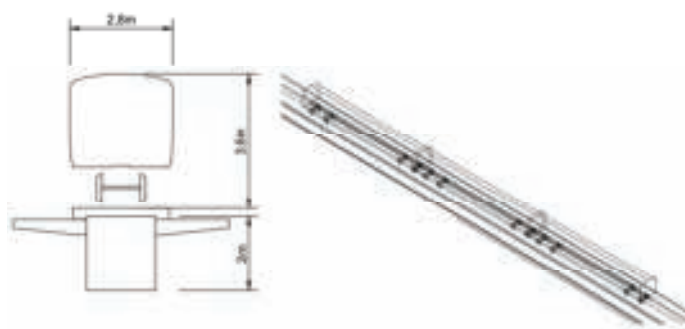
W badaniach modelowych prowadzonych w tunelach wiatrowych uwzględnia się ruch pojazdu kolejowego na dwa sposoby: badania są prowadzone na modelu stałym, ustawionym pod odpowiednim kątem względem przepływu powietrza ge-



3. Współczynniki aerodynamiczne pojazdu ICE 3 uzyskane w tunelu wiatrowym dla modelu w skali 1:15 i ustawienia na nasypie od strony nawietrznej [12]



4. Składanie wektorów prędkości wiatru



5. Model przyjęty do badań własnych

nerowanego z prędkością wypadkową, lub (bardzo rzadko) prowadzi się badania na modelu ruchomym [5], [3], [1]. Baker i in. w pracy [1] przedstawili przykładowe porównanie wyników z obu badań, na przykładzie modelu pociągu Pendolino 390, wykonanego w skali 1:25. Badanie stacjonarne (na modelu stałym) zostało przeprowadzone zgodnie z współcześnie przyjętym podejściem, tj. model pojazdu został ustawiony pod kątem odwzorowującym kąt natarcia wiatru wypadkowego. Natomiast badania na modelu ruchomym wykonano w 150-metrowym tunelu, w którym na przejeżdżający pojazd oddziaływał wiatr boczny. Podobne badania przeprowadził Bocciolone ze współpracownikami [5], poszerzając ich zakres – oprócz wpływu ruchu pojazdu analizowano również wpływ turbulencji i różnych konfiguracji terenu. W obu przytoczonych pracach stwierdzono, że sposób uwzględnienia ruchu pojazdu w tunelu wiatrowym ma znikomy wpływ na wyniki badań, ponieważ współczynniki aerodynamiczne uzyskane dla modelu stacjonarnego i ruchomego są bardzo zbliżone. Problem ten wymaga jednak dalszych badań, ponieważ w obu przypadkach zastosowano do badań porównawczych tylko konfigurację terenu płaskiego.

Badania numeryczne CFD

Badania w tunelach aerodynamicznych są kosztowne i czasochłonne – wymagają m. in. przygotowania oraz skonstruowania modelu pojazdu i odpowiedniej konfiguracji terenu. Z tego

względu, na wstępnym etapie analizy stosowane są obecnie metody numeryczne, bazujące na analizach CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Analizy CFD polegają na numerycznej symulacji przepływu, przeprowadzanej przy założeniu modelu płynu newtonowskiego, który stosunkowo dobrze odwzorowuje zachowanie wielu płynów i gazów, między innymi wody i powietrza [10]. Podstawą tych metod są równania Naviera-Stokesa opisujące przepływ płynu. Ich analityczne rozwiązanie możliwe jest jedynie w najprostszych przypadkach, stąd w analizach CFD dyskretyzuje się przestrzeń przepływu i opływane ciało z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) i metody objętości skończonych (MOS). Przy przepływie turbulentnym pojawia się potrzeba odwzorowania najmniejszych wirów, przez co zagęszczenie siatki elementów skończonych jest rzędu $R_e^{9/4}$ [3]. Jeżeli więc uwzględnić fakt, że liczba Reynoldsa R_e waha się w granicach od 10^6 dla tuneli wiatrowych do 10^7 dla symulacji rzeczywistych, uzyskujemy zadanie niemożliwe do rozwiązania [3], [10]. Z tego względu, w inżynierii wiatrowej stosuje się metody uśredniające równania Naviera-Stokesa, wśród których można wyróżnić metody uśredniające po czasie – RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) lub uśredniające pole przepływu w przestrzeni – LES (*Large Eddy Simulation*).

W inżynierii najczęściej stosowane są metody RANS, ze względu na to, że mają najniższe zapotrzebowanie obliczeniowe. W ich wyniku uzyskujemy przepływ uśredniony w czasie, co czę-

sto jest wystarczające. Jednak kiedy pojawiają się oderwania wirów, metoda RANS znacznie traci na dokładności wyników. Jak pokazano w wielu pracach, między innymi w [3], [10], [8], podstawowy model RANS (model k- ϵ) błędnie odwzorowuje turbulencje na górnej krawędzi nawietrznej. Jednak inne modele RANS, takie jak k- ω lub RSM (*Reynolds Stress Model*) pozwalają uzyskać dobre wyniki niskim kosztem obliczeniowym.

W przypadku, gdy wykorzystanie modeli RANS nie pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących wyników, wykorzystuje się model LES, który daje dużo dokładniejsze wyniki, ale jego stosowanie prowadzi do bardzo dużych nakładów obliczeniowych. W metodzie tej są symulowane wiry o rozmiarach oczka siatki, natomiast wiry mniejsze są reprezentowane za pomocą dodatkowej, nieistniejącej w rzeczywistości siły lepkości. Jednak całkowanie bezpośrednie w przestrzeni równań Naviera-Stokesa, nawet uśrednionych, oraz wymóg znacznie gęstszej siatki niż w przypadku metod RANS sprawia, że czas obliczeń znacząco rośnie [13].

Podobnie jak w badaniach w tunelu wiatrowym, również analizy CFD wymagają rozważenia i przygotowania wielu istotnych parametrów, nie tylko wyboru metody. Jak wspomniano wcześniej, kluczowe jest przyjęcie odpowiednio zagęszczonej siatki MES. Dodatkowo należy przyjąć właściwy rozmiar przestrzeni przepływu, tak aby ograniczające go płaszczyzny nie wpływały na opływ ciała. Fakt, że przestrzeń opływu można zdefiniować

jako dowolnie dużą jest jedną z przewag analiz CFD nad tunelami wiatrowymi. Norma [12] zaleca, aby również w przypadku badań CFD przeprowadzić analizy porównawcze na jednym z modeli referencyjnych. Zakłada się, że parametry analizy są poprawne, jeżeli uzyskane wyniki różnią się nie więcej niż o 3% od wyników zawartych w tym dokumencie. Norma ta podaje również wytyczne w sprawie przyjmowania podstawowych parametrów analizy.

Pomimo iż obecne przepisy nie dopuszczają przeprowadzenia pełnego dowodu stateczności aerodynamicznej pojazdu kolejowego wyłącznie z wykorzystaniem CFD [13], [12], metody numeryczne wraz z rozwojem mocy obliczeniowej współczesnych komputerów pozwalają na uzyskiwanie wyników co raz dokładniejszych. Jak pokazali Sima i inni w pracy [14] stanowiącej część projektu AEROTRAIN, wyniki uzyskiwane metodami numerycznymi już dziś mogą dorównać wynikom badań w tunelach wiatrowych. Z tego względu, współcześnie przy prowadzeniu skomplikowanych analiz (np. sprzężonych drgań układów most – pociąg – wiatr) coraz częściej wykorzystuje się metody CFD do uzyskiwania współczynników aerodynamicznych.

Badania własne

Celem badań autorów niniejszej pracy było rozpoznanie metody CFD jako narzędzia do wyznaczania współczynników aerodynamicznych pojazdu kolejowego. W dalszych badaniach planowane jest opracowanie metody analizy dynamicznej układu pociąg – most, poddanego działaniu wiatru bocznego, łącznie z analizą stateczności aerodynamicznej pociągu poruszającego się po moście.

W przeprowadzonych badaniach wstępnych analizowano, podobnie jak w pracy [16], uproszczoną, prostopadłościenną bryłę pojazdu pokazaną na rysunku 5. Jako konfigurację terenu przyjęto jednotorowy most belkowy o wysokości dźwigara 2 m. Do badań przyjęto, że pociąg składa się z trzech identycznych pojazdów (wagonów),

każdy o długości 19,5 m. Wyznaczono współczynniki aerodynamiczne dla pojazdu środkowego, obecność sąsiednich miała zapewnić właściwą reprezentację przepływu. W obliczeniach zastosowano metodę RSM (*Reynolds Stress Model*) z grupy RANS. Metoda ta opiera się na domknięciu układu równań Naviera-Stokesa za pomocą bezpośredniego transportu poszczególnych składowych tensora naprężeń Reynoldsa [10]. Jako wartość pola odniesienia przyjęto zrzutowaną powierzchnię boczną ściany nawietrznej wagonu.

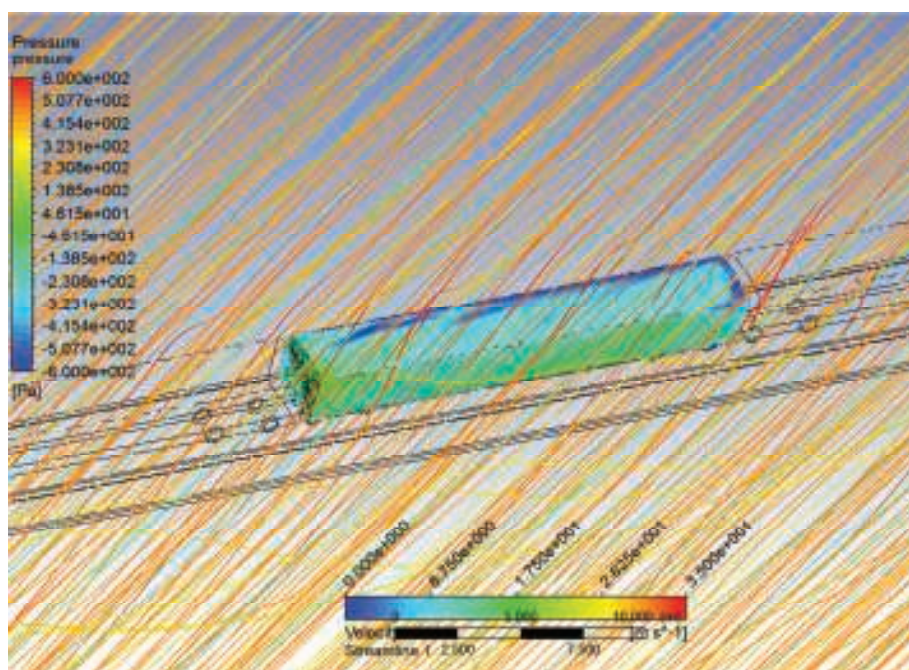
Obliczenia wykonano w środowisku programistycznym CFD ANSYS. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania sprawdzające dla prędkości wiatru 20 m/s i 30 m/s, wykazując zmienność wartości współczynników aerodynamicznych, charakterystyczną dla liczby Reynoldsa z zakresu nadkrytycznego. Rozmiar przestrzeni opływu przyjęto zgodnie z wytycznymi normy [12]. Przykładowe wyniki obliczeń pokazano na rysunku 6. Następnie rozważono cztery kąty natarcia wiatru wypadkowego na pojazd i uzyskano wartości współczynników aerodynamicznych przedstawione na rysunku 7. Wyniki te zostały odczytane po osiągnięciu zbieżności przy kilkuset iteracjach, niemniej jednak mogą one być obciążone błędem ze względu na przyjęty rozmiar elementu skończo-

nego ok. 0,2 m.

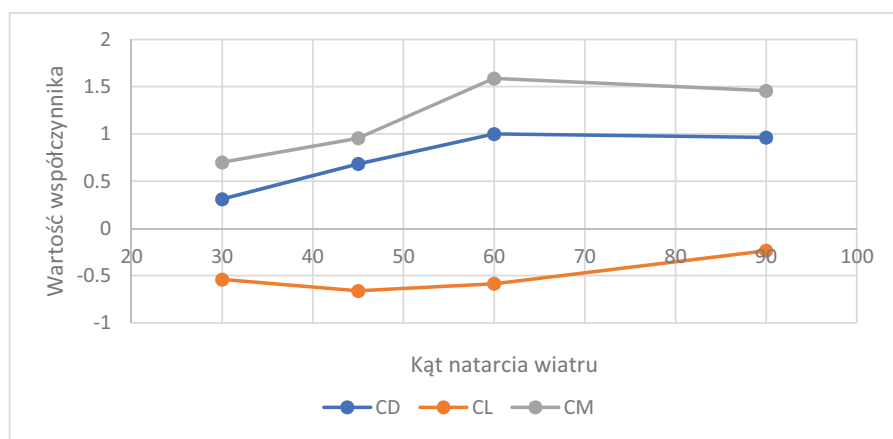
Pokazany schematycznie na rysunku 7, przybliżony kształt zależności współczynników aerodynamicznych od kąta natarcia wiatru wypadkowego jest zbliżony do kształtu krzywych znanych z literatury i tych przedstawionych na rysunku 3. Ponadto, uzyskane wartości współczynników mieszczą się w zakresie znanym z wielu badań, np. przedstawionych w [16] lub [5], co oznacza, że pierwsze wyniki zastosowania autorskiej procedury obliczeniowej metodą CFD są obiecujące, chociaż nakład obliczeniowy okazał się stosunkowo duży – czas jednej serii obliczeń był rzędu czterech godzin. Aby opracowaną procedurę uznać za wiarygodną, należy w kolejnym etapie prac wykonać analizy porównawcze na jednym z modeli referencyjnych, według normy [12].

Podsumowanie

Współcześnie normy dopuszczają wyznaczanie współczynników aerodynamicznych pojazdów kolejowych jedynie w tunelach wiatrowych, jako że nadal jest to metoda najdokładniejsza. Wymaga ona jednak dostępu do tunelu wiatrowego, dużego nakładu pracy, odpowiedniego sprzętu i wielu badań w celu uzyskania wiarygodnych wyników, w szczególności gdy rozważane są różne konfiguracje terenu. Alternaty-



6. Przykładowe wyniki badań CFD dla kąta natarcia 30° – linie prędkości wiatru i rozkład ciśnienia na powierzchni ciała



7. Współczynniki aerodynamiczne w zależności od kąta natarcia wiatru wypadkowego

tywą są metody numeryczne, które wraz z dynamicznym wzrostem mocy obliczeniowych współczesnych komputerów dają co raz większe możliwości i coraz lepsze wyniki. W pracy opisano obie grupy metod wyznaczania współczynników aerodynamicznych – bazujące na badaniach modelowych w tunelach wiatrowych i badaniach numerycznych z użyciem symulacji CFD, w odniesieniu do pojazdów kolejowych, normy PN-EN 14067-6:2018-10 i wymagań TSI.

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań własnych przeprowadzonych numerycznie za pomocą autorskiej procedury obliczeniowej zrealizowanej w module CFD środowiska programistycznego ANSYS. Wyznaczone wartości współczynników aerodynamicznych przykładowego hipotetycznego pojazdu kolejowego pozwalają wstępnie ocenić procedurę jako poprawną. W kolejnym etapie badań, w celu potwierdzenia wiarygodności opracowanej procedury obliczeniowej zostaną wykonane analizy porównawcze na jednym z modeli referencyjnych, według normy [12]. Opracowana procedura będzie w przyszłości wykorzystana do wyznaczenia współczynników aerodynamicznych układu pociąg – most, na potrzeby analiz dynamicznych takiego układu poddanego działaniu wiatru bocznego, łącznie z analizą stateczności aerodynamicznej pociągu poruszającego się po moście. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Baker C. J. i inni, Evaluation of crosswind effects on rail vehicles through moving model experiments, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications BBA7, 2.09.2012, 1480-1489.
- [2] Baker C., A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals, The Aeronautical Journal, 2014, 118(1201), 201-228.
- [3] Baker C., Cheli F. i inni, Cross-wind effects on road and rail vehicles, Vehicle System Dynamics, 2009, 47, 983-1022.
- [4] Baker C.J., Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 24, 227-251.
- [5] Boccione M., Cheli F. i inni, Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96, 584-610.
- [6] Flaga A., Inżynieria wiatrowa, Arkady, 2008.
- [7] He X., Gai Y., Wu T., Simulation of train-bridge interaction under wind loads: a rigid-flexible coupling approach, International Journal of Rail Transportation, 2018, 6, 163-182.
- [8] Jorg F. i inni, Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST Office, University of Hamburg, 2007.
- [9] Li Y. L. i inni, Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93, 483-507.

- [10] Lipecki T., Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostokątnych, Politechnika Lubelska, 2015.
- [11] Olmos J. M., Astiz M. A., Non-linear vehicle-bridge-wind interaction model for running safety assessment of high-speed trains over a high-pier viaduct, Journal of Sound and Vibration, 2018, 419, 63-68.
- [12] PN-EN 14067-6:2018-10, Kolejnictwo - Aerodynamika - Część 6: Wymagania i procedury badań oddziaływania wiatru bocznego.
- [13] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor — lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [14] Sima M. i inni, Computational fluid dynamics simulation of rail vehicles in crosswind: Application in norms and standards, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229, 635-643.
- [15] Simu E., Scanlan R.H., Wind Effects on Structures, Fundamentals and Applications to Design, John Wiley & Sons INC, 1996.
- [16] Suzuki M., Tanemoto K., Maeda T., Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91, 209-218.
- [17] [www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_rail_accidents_\(2000-2009\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_rail_accidents_(2000-2009)), 31.03.2019.
- [18] www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_wind-related_railway_accidents, 31.03.2019.
- [19] Xu X. Y., Li Y. L., Dynamic analysis of wind-vehicle-bridge system based on rigid-flexible coupling method, Advances in Civil, Environmental, and Materials Research ACEM16, 28.08.2016.
- [20] Xu Y. L. i inni, Vibration of coupled train and cable-stayed bridge systems in cross winds, Engineering Structures, 2004, 26, 1389-1406.
- [21] Żurański J.A., Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, Wydawnictwo Arkady, 1978.