

Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 1: Oddziaływanie ciśnienia na obiekty

Andrzej ZBIEĆ¹

Streszczenie

W cyklu artykułów opisujących zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu będą scharakteryzowane oddziaływanie pociągu jadącego z dużą prędkością na sam jadący pociąg, na inne pociągi, na obiekty znajdujące się przy torze oraz na ludzi. Oddziaływanie to może być dwójakiego rodzaju: przez wytwarzane ciśnienie i przez podmuch. Oprócz analizy literatury, uwzględniono badania przeprowadzone przez autora. W pierwszej części cyklu opisano ogólną klasyfikację zjawisk aerodynamicznych, przebieg zmian ciśnienia w otwartej przestrzeni wywołanych przejazdem pociągu oraz oddziaływanie ciśnienia na obiekty znajdujące się obok toru. Przedstawiono wnioski dotyczące budowy szybkiego pojazdu kolejowego oraz wytrzymałości i usytuowania konstrukcji przy liniach dużych prędkości.

Słowa kluczowe: tabor kolejowy, koleje dużych prędkości, zjawiska aerodynamiczne

1. Wstęp

Ruch pociągu powoduje powstawanie różnych zjawisk zarówno w torze, jak i podtorzu, które mogą być następnie emitowane do gruntu oraz powstawanie zjawisk w otaczającym powietrzu. Pierwsze z nich wynikają z kontaktu koła z szyną, drugie z przemieszczania się bryły pojazdu w ośrodku lepko-sprężystym jakim jest powietrze. Przedmiotem niniejszego artykułu jest drugi rodzaj zjawiska, z pominięciem hałasu, który jest zjawiskiem złożonym z obu tych rodzajów oddziaływań, a więc pochodzącym od ruchu kół po szynach oraz ruchu pojazdu względem powietrza, a ponadto od urządzeń mechanicznych (sprężarki, klimatyzatory i inne) pracujących na pojeździe. Ponieważ są to zjawiska związane z ruchem pojazdu, można traktować je jako oddziaływania dynamiczne, a precyzyjniej – ze względu na ośrodek, w którym ruch się odbywa – jako oddziaływania aerodynamiczne. Intuicyjnie daje się przewidzieć, że im większa prędkość pojazdu, tym większe oddziaływania. W odniesieniu do taboru kolejowego jest to stosunkowo nowa dziedzina badań. Na szeroką skalę zaczęto się nią zajmować dopiero po zwiększeniu prędkości pojazdów powyżej 200 km/h, chociaż objęto nią również pojazdy poruszające się z prędkościami powyżej 160 km/h.

Przejeżdżający pociąg wywołuje dwa efekty aerodynamiczne. Jednym z nich są pulsacje ciśnienia w czasie przejazdu – drugim zaś przemieszczanie mas

powietrza wzdłuż pociągu, a także za pociągiem. Kierunek ruchu mas powietrza jest zgodny z kierunkiem jazdy pociągu, chociaż może podlegać pewnym odchyleniom ze względu na wiatr w otoczeniu, wynikający ze zjawisk atmosferycznych. Ponadto, przepływowi powietrza za pociągiem towarzyszą burzliwe zawirowania. Oba wymienione efekty aerodynamiczne mogą oddziaływać w postaci sił aerodynamicznych na ludzi i obiekty. Ze względu na rodzaj oddziaływania, zjawiska aerodynamiczne można podzielić na:

- zmiany / uderzenia ciśnienia,
- podmuch.

Ze względu na obiekt oddziaływania, zjawiska aerodynamiczne można podzielić na:

- oddziaływanie na jadący pociąg,
- oddziaływanie jadącego pociągu na inne pociągi,
- oddziaływanie jadącego pociągu na obiekty przy torze,
- oddziaływanie na ludzi.

Ze względu na miejsce oddziaływania, zjawiska aerodynamiczne można podzielić na:

- oddziaływanie w otwartej przestrzeni,
- oddziaływanie w przestrzeni zawierającej różne obiekty (budynki, ekrany dźwiękochłonne, daszki, murki ochronne, konstrukcje przytorowe itp.),
- oddziaływanie w tunelach, które w znacznym stopniu może zwiększyć oddziaływania zmian ciśnienia i podmuchu (nie analizowane w niniejszym artykule).

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: azbiec@ikolej.pl.

Istnieje literatura dotycząca obliczania oporu aerodynamicznego pociągu, jak np. praca pt. „Aerodynamika pociągu” [3] wydana przez Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych w Poznaniu. Jednak w tej literaturze trudno znaleźć proste do zastosowania wzory, umożliwiające obliczenie ciśnienia lub sił oddziaływania wywołanych przejazdem pociągu. Jednym ze źródeł umożliwiających obliczenie amplitudy fali ciśnienia wywołanej przejazdem pociągu jest karta UIC 779-1 [5].

Bogatym źródłem informacji, dotyczącym opisu zjawisk aerodynamicznych jest praca [6] „Badania rozkładu prędkości strumienia powietrza w podmuchach wywołanych jazdą pociągu i wzajemnego wpływu mijających się pociągów na zmiany ciśnienia statycznego działającego na ściany wagonów i na powierzchnię czołową lokomotywy” [6], wykonana ponad 40 lat temu przez Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa (obecny Instytut Kolejnictwa), na zlecenie ówczesnego Ministerstwa Komunikacji. Zagadnieniem aerodynamicznym poświęcono również raport Departamentu Transportu USA z 1999 roku [1].

Równoległe z powstawaniem przepisów Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności (TSI) oraz przyjmowaniem przez nie zapisów regulujących wymagania kolejowe z kart UIC, powstawały także normy europejskie, mające zastosowanie w kolejnictwie. Takimi normami w odniesieniu do zjawisk aerodynamicznych jest seria norm europejskich EN 14067, w szczególności EN 14067-4 i jej polska wersja PN-EN 14067-4 [8], które w praktyce zastąpiły wymienioną kartę 779-1 [5], chociaż nie została ona wycofana. Część zapisów, określających wymagania dla zagadnień aerodynamicznych, została zawarta w TSI Loc&Pas [10], jednak w wielu punktach ta specyfikacja odwołuje się do normy PN-EN 14067-4, w której znajduje się komplet zapisów dotyczących wymienionych zagadnień.

Dodatkowo, prowadzone są prace mające na celu uwzględnienie działania wiatru bocznego. Zjawisko oddziaływania wiatru bocznego lub wzdłużnego, o kierunku zgodnym lub przeciwnym do kierunku ruchu pociągu, który może mieć istotny wpływ na oddziaływania aerodynamiczne, jest sygnalizowane przez wielu autorów prac. Jednakże w literaturze nie podano metod oszacowania wpływu tego wiatru (brak wzorów obliczeniowych).

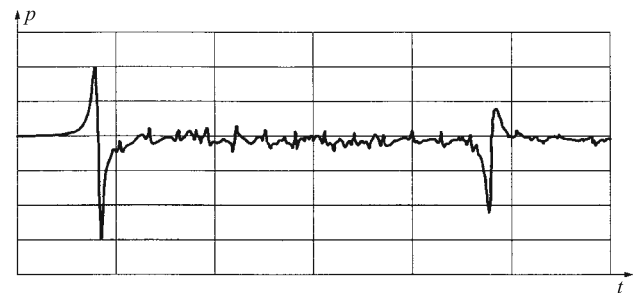
2. Oddziaływanie ciśnienia na obiekty

Jak podano we wstępie, jednym z dwóch podstawowych oddziaływań pociągu jest oddziaływanie ciśnienia. W pracy [1] określono pięć parametrów wpływających na wielkość fali ciśnienia w wyniku przejścia czoła pociągu. Są to: prędkość pociągu, pole przekro-

ju poprzecznego pociągu, odległość od przejeżdżającego pociągu lub przeswit pomiędzy pociągami, wysokość ponad poziomem gruntu i długość nosa.

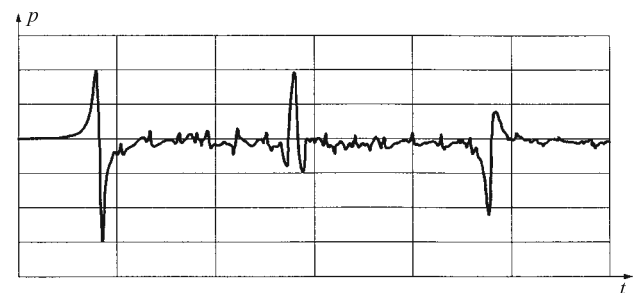
2.1. Fluktuacje ciśnienia w otwartej przestrzeni obok toru

Przejeżdżający pociąg generuje zmiany ciśnienia oddziałujące na obiekty znajdujące się w pobliżu toru. W normie PN-EN 14067-4 [8] podano przykładowy przebieg fali ciśnienia na pionowej ścianie wywołany przejazdem pociągu (rys. 1).



Rys. 1. Przebieg ciśnienia w czasie, na płaskiej pionowej powierzchni [8]

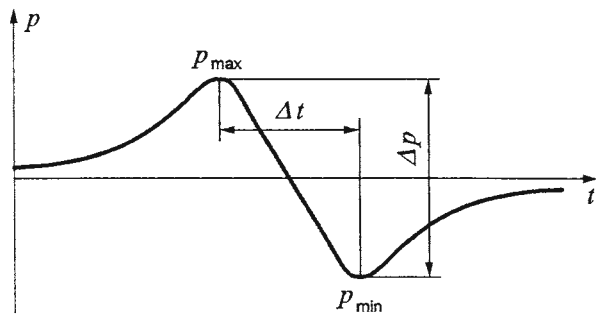
Na czole pojazdu pojawia się dodatni pik ciśnienia, który gwałtownie przechodzi w pik ujemny. Po przejeździe czoła lokomotywy ciśnienie spada prawie do zera i podlega ciągłym fluktuacjom wzdłuż całego składu. Następnie w pobliżu końca pociągu pojawia się pik ujemny, który gwałtownie przechodzi w pik dodatni. Zmiana ciśnienia na końcu pociągu jest mniejsza niż zmiany na czole pociągu. W pociągu sprzęgniętym z dwóch pojazdów (np. dwa połączone ze sobą zespoły trakcyjne) pojawi się dodatkowy pik ciśnienia w miejscu sprzęgnięcia obu zespołów (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg ciśnienia w czasie dla pociągu sprzęgniętego z dwóch pojazdów [8]

Przy braku jakichkolwiek przeszkód lub obiektów, ciśnienie w otwartej przestrzeni zmienia się wzdłuż składu pociągu i dla stacjonarnego punktu położonego obok toru, zmiany ciśnienia w czasie będą odzwierciedlały zmiany ciśnienia wzdłuż składu pociągu i będą wykazywały jakościowo podobne zachowanie, jak na płaskiej pionowej powierzchni.

Największe zmiany ciśnienia występują zwykle na czole pociągu. Zostały one pokazane na rysunku 3. Znaczące zmiany ciśnienia mogą pojawić się również na końcu składu lub w miejscach sprzęgnięcia kolejnych pojazdów i właśnie te zmiany ciśnienia na czole pociągu są uznawane za najbardziej charakterystyczne ze wszystkich miejsc składu (czoło, sprzęgi, koniec pociągu). Najistotniejszym parametrem jest Δp – zmiana ciśnienia w pik (pik do pik). Jest ona odzwierciedleniem kształtu nosa (czoła pociągu) i jest mniejsza dla wydłużonego, bardziej opływowego nosa oraz większa dla czoła płaskiego. Krótki nos powoduje nie tylko większą zmianę ciśnienia w pik, ale jest także powiązany z krótszym czasem trwania tej zmiany powodując, że staje się ona gwałtowniejsza. Połączenie zmiany ciśnienia w pik z czasem jej trwania będzie skutkowało łagodniejszym lub bardziej impulsowym (udarowym) oddziaływaniem na obiekty.



Rys. 3. Zmiana ciśnienia w pik (pik do pik) [8]

Czas Δt pomiędzy pikiem dodatnim i ujemnym jest związany z długością nosa L_n oraz prędkością pociągu i można według [8] przedstawić go wzorem (1):

$$\Delta t \approx L_n : V \quad (1)$$

gdzie:

- Δt – czas pomiędzy pikiem dodatnim i ujemnym,
- L_n – długość nosa,
- V – prędkość pociągu.

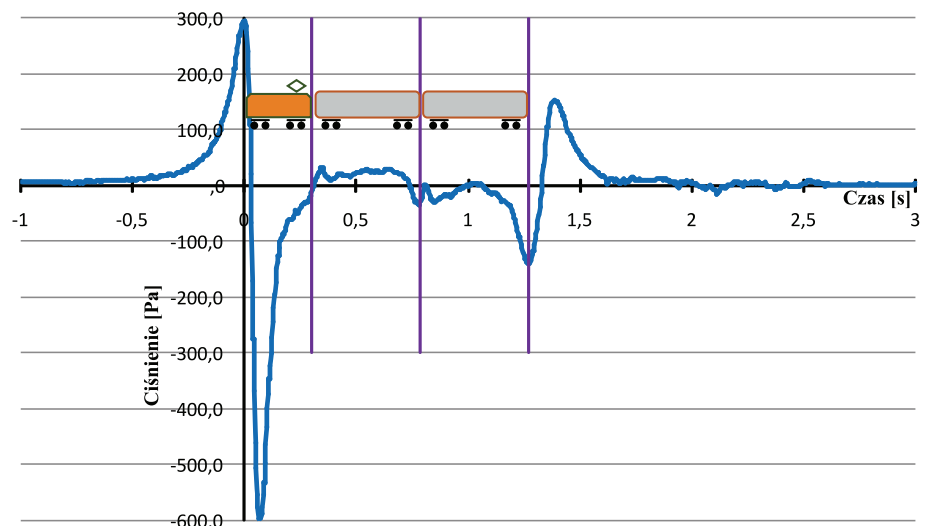
Zgodnie z wymaganiami normy [8], do prawidłowej oceny pojazdu należy przeprowadzić serię co najmniej 10 jazd. Następnie oblicza się wartość średnią Δp_{sr} dla wszystkich Δp_i (ze wszystkich jazd) oraz odchylenie standardowe σ . Jako charakterystyczną wartość liczbową zmiany ciśnienia w pik przyjmuje się wartość średnią powiększoną o 2σ , czyli górną wartość 95% przedziału ufności:

$$\Delta p_{95\%} = \Delta p_{sr} + 2\sigma \quad (2)$$

i dopiero na tej podstawie można stwierdzić, czy pojazd spełnia wymagania normy.

Zmiana ciśnienia jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości. Dla prędkości dopuszczalnej $V > 160$ km/h, dla pojedynczego pojazdu wyposażonego w kabinę maszynisty oraz dla składów stałych i predefiniowanych, maksymalną dopuszczalną zmianę ciśnienia w odległości 2,5 m od osi toru określono na poziomie 800 Pa w przedziale ufności 95% ($\Delta p_{95\%}$), przy czym dla taboru o prędkości maksymalnej pomiędzy 160 km/h i 250 km/h pomiar wykonuje się przy prędkości maksymalnej, natomiast przy prędkości maksymalnej taboru $V \geq 250$ km/h pomiar wykonuje się przy prędkości referencyjnej 250 km/h. Dla prędkości $V \leq 160$ km/h nie określono żadnych wymagań.

Na rysunku 4 pokazano przykładowy rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia dla pociągu zestawionego z lokomotywy i dwóch wagonów pasażerskich Z1, jadącego z prędkością 200 km/h (ze względu na potrzeby prowadzonych wówczas badań ciśnienie było mierzo-



Rys. 4. Rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia przy $V = 200$ km/h [opracowanie własne]

ne w nieco większej odległości i na podstawie uzyskanych wyników jego wartość przeliczono do odległości 2,5 m od osi toru). Oś czasu przesunięto tak, aby szczytowa wartość ciśnienia, odpowiadająca chwili przejścia czoła lokomotywy (pudła) obok czujnika ciśnienia, wypadła w czasie zero. Dodatkowo, pionowymi liniami zaznaczono na rysunku miejsca połączenia (sprzęgnięcia) lokomotywy i wagonów.

Zmiana ciśnienia w pikę (pik do pikę) Δp dla tej lokomotywy w odległości 2,5 m od osi toru wyniosła około 890 Pa, a więc poziom 800 Pa dopuszczony normą został przekroczony o około 90 Pa (~11%). Wynik ten nie jest zaskakujący, ponieważ była to lokomotywa starego typu z płaskim czołem, specjalnie przystosowana do jazdy ze zwiększoną prędkością 200 km/h. Skład pomiarowy pokazano na rysunku 5. Należy zaznaczyć, że jest to wynik przykładowy, uzyskany z jednej jazdy. Natomiast, jak już wcześniej wspomniano, do prawidłowej oceny pojazdu wymagane jest przeprowadzenie serii, co najmniej 10 jazd i dopiero na ich podstawie pojazd można zakwalifikować, jako spełniający lub nie spełniający wymagania normy.



Rys. 5. Skład pomiarowy do badań ciśnienia [fot. A. Zbieć]

Podany przykład pokazuje również, że budowa nowego pojazdu szynowego powinna polegać na kompleksowym zaprojektowaniu jego parametrów z kształtem powierzchni czołowej włącznie. Nie może ona sprowadzać się do wybiórczej zmiany tylko niektórych parametrów, jak np. prędkości maksymalnej z pominięciem innych, powiązanych z nią parametrów. Konstruktorzy szybkich pociągów przykładają dużą wagę do kształtu nosa pociągu, który z jednej strony musi zapewnić jak najłagodniejsze i mieszczące się w dopuszczalnych granicach zmiany ciśnienia, z drugiej strony zaś jego długość jest powiązana z kształtem pudła pojazdu szynowego i koniecznością wpisywania się pojazdu w skrajnię (w tym w łukach toru) oraz wymaganą innymi przepisami [2] maksymalną odległością czoła pociągu do najbliższej osi, która w pociągach kursujących po nowobudowanych liniach dużej prędkości nie może przekroczyć 5,0 m.

W raporcie [1] przytoczono wyniki badań wykonanych w pełnej skali (na obiektach rzeczywistych) wpływu kształtu czoła pociągu na generowane ciśnienie. Porównano ciśnienia pomiędzy lokomotywami o smukłym nosie, mającym proporcje kształtu nosa od 0,8 do 1,25 (stosunek długości nosa do szerokości pudła) z lokomotywami o płaskim nosie, dla których współczynniki kształtu nosa wahały się od 0,1 do 0,5. Badania wykazały, że pociągi ze smukłymi nosami wywoływały skutki ciśnienia o połowę mniejsze niż pociągi o płaskim nosie. Zatem pociąg ze smukłym nosem może poruszać się z prędkością o 40% większą, wywołując taki sam efekt zmian ciśnienia, jak pociąg z płaskim nosem, natomiast testy przeprowadzone na pociągach kontenerowych generowały impulsy ciśnienia, które były nawet o 20% wyższe niż w pociągach z płaskim nosem.

Oprócz wspomnianego wcześniej parametru Δp , według [8] definiuje się ponadto bezwymiarowy współczynnik zmiany ciśnienia ΔC_p wyznaczony ze wzoru (3):

$$\Delta C_p = 2 (p_{max} - p_{min}) : (\rho V^2) = 2\Delta p : (\rho V^2) \quad (3)$$

gdzie:

ΔC_p – bezwymiarowy współczynnik zmiany ciśnienia,

p_{max} – ciśnienie maksymalne (w pikę dodatnim),

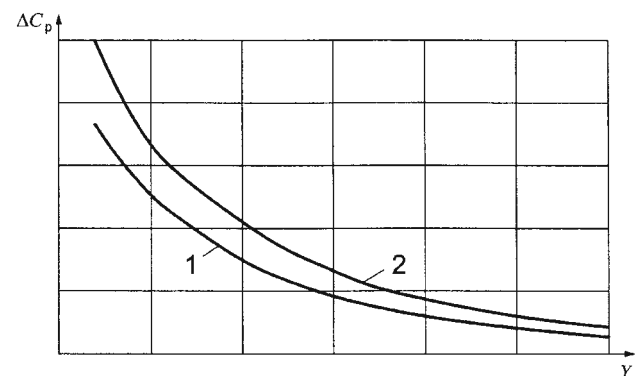
p_{min} – ciśnienie minimalne (w pikę ujemnym),

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ – standardowa gęstość powietrza,

V – prędkość pociągu,

Δp – zmiana ciśnienia w pikę (pik do pikę).

Współczynnik ΔC_p jest podstawową cechą dla konkretnego pojazdu kolejowego. Zależy on od wysokości ponad poziomem gruntu i poprzecznej odległości od osi toru. Im większa odległość, tym mniejsze ΔC_p . Dla wspomnianej lokomotywy uzyskano w tej jeździe współczynnik $\Delta C_p = 0,48$. Przykładowe przebiegi współczynnika ΔC_p pokazano na rysunku 6. Krzywa 1 odpowiada pojazdowi z długim, opływowym nosem, krzywa 2 – pojazdowi z płaskim czołem.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi współczynnika ΔC_p [8]

2.2. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje pionowe

Na rysunkach 1 i 2 podano przykładowy przebieg fali ciśnienia na pionowej ścianie, wywołany przejazdem pociągu, a na rysunku 7 sposób oddziaływania tego ciśnienia na pionową ścianę. Za normą PN-EN 14067-4 [8] podano wzory umożliwiające oszacowanie ciśnienia, gdy wyniki pomiarów, obliczeń lub symulacji są niedostępne. Metoda takiego oszacowania ciśnienia została zawarta już w karcie UIC 779-1 [5], jednakże wraz z rozwojem wiedzy w tej dziedzinie nastąpiła modyfikacja wzorów obliczeniowych.

Do obiektów najbardziej narażonych na oddziaływanie ciśnienia wywołanego przejazdem pociągu należy zaliczyć przede wszystkim płaskie pionowe struktury, takie jak:

- fasady budynków, znajdujących się w pobliżu toru,
- ekrany dźwiękochłonne,
- murki ochronne itp.

Według [8], zmiany ciśnienia można obliczyć wzorami (4) i (5):

$$p_{1k} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot C_{p1} \quad (4)$$

oraz

$$C_{p1} = 2,5 : (Y + 0,25)^2 + 0,02 \quad (5)$$

gdzie:

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ – standardowa gęstość powietrza,

V – prędkość pociągu,

k_1 – współczynnik kształtu dla pociągu:

$k_1 = 1,0$ dla pociągów towarowych,

$k_1 = 0,85$ dla pociągów pasażerskich,

$k_1 = 0,6$ dla pociągów dużych prędkości $V \geq 250 \text{ km/h}$, o dobrym kształcie aerodynamicznym,

C_{p1} – współczynnik aerodynamiczny, zależny od odległości od toru ($Y \geq 2,3 \text{ m}$),

Y – odległość od osi toru.

Dla elementów o wysokości mniejszej od 1 m lub krótszych niż 2,5 m, obliczone ciśnienie powinno być zwiększone współczynnikiem 1,3. Obliczone według przedstawionego wzoru ciśnienie dla kilku wybranych prędkości oraz w różnych odległościach od osi toru dla pociągów dużych prędkości ($k_1 = 0,6$) przedstawiono w tabelicy 1.

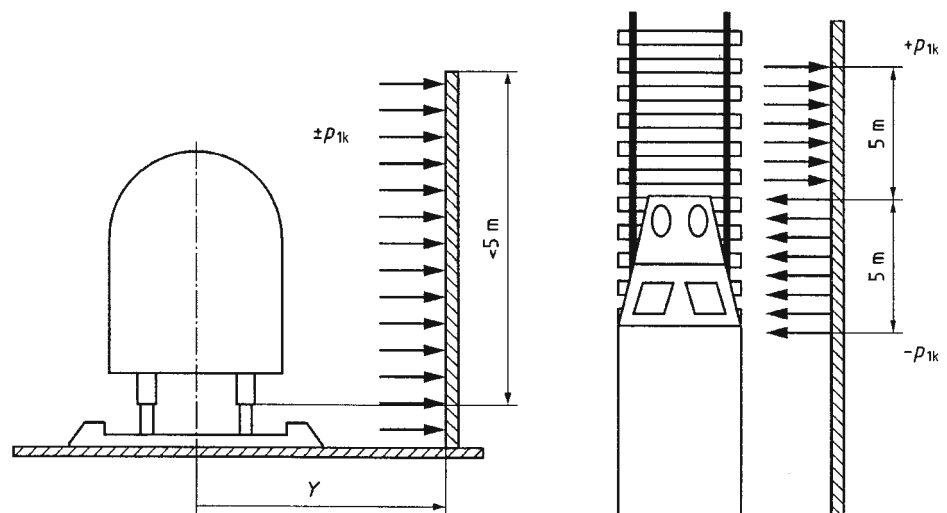
Tablica 1

Ciśnienie dla różnych prędkości w różnej odległości od osi toru

Prędkość [km/h]	Ciśnienie [Pa] przy odległości obiektu od osi toru [m]					
	2,3	3	4	5	6	7
160	293,6	186,3	115,0	80,4	61,0	49,0
180	371,6	235,8	145,5	101,7	77,2	62,1
200	458,8	291,1	179,7	125,6	95,3	76,6
220	555,1	352,3	217,4	151,9	115,3	92,7
240	660,6	419,3	258,7	180,8	137,2	110,4
260	775,3	492,0	303,7	212,2	161,0	129,5
280	899,2	570,7	352,2	246,1	186,7	150,2
300	1032,2	655,1	404,3	282,5	214,4	172,4
320	1174,5	745,3	460,0	321,4	243,9	196,2
340	1325,8	841,4	519,3	362,9	275,4	221,5
350	1405,0	891,6	550,3	384,5	291,8	234,7

[Opracowanie własne].

Obliczone wartości i wykres potwierdzają wyczuwalną intuicyjnie zależność, że im większa jest odległość od osi toru dla danej prędkości jazdy, tym mniejsze ciśnienie oddziałuje na daną powierzchnię. Na przykład dla prędkości 300 km/h w odległości 2,3 m od



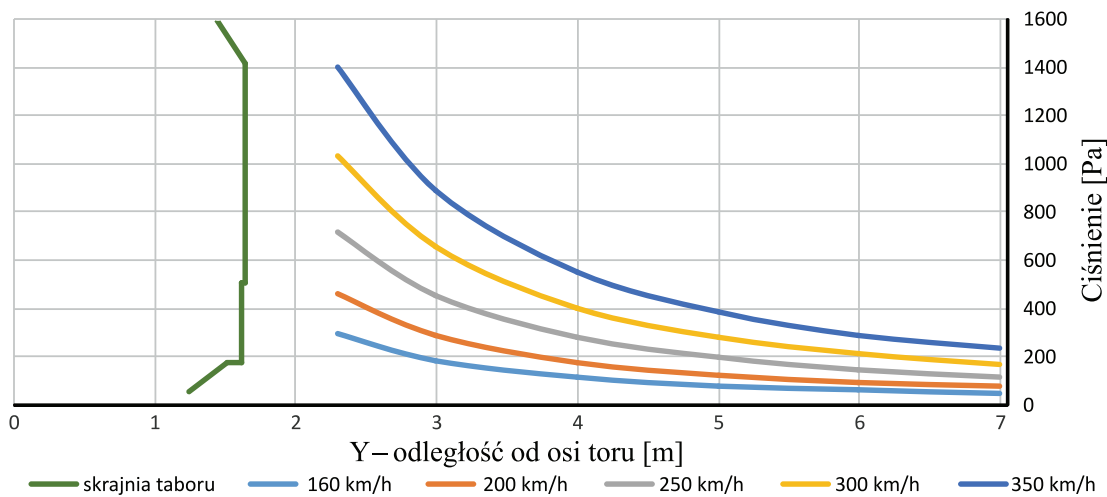
Rys. 7. Oddziaływanie ciśnienia na płaskie pionowe powierzchnie [8]

osi toru (minimalna odległość stosowalności wzoru) ciśnienie wynosi 1032,2 Pa, a w odległości 5 m od osi toru już tylko 282,5 Pa, a więc 3,65 razy mniej. Przebieg krzywych ciśnienia w funkcji odległości od osi toru dla różnych prędkości jest pokazany na rysunku 8. Dla lepszego zobrazowania rozkładu ciśnienia w pobliżu ściany pojazdu kolejowego, a dokładnie kinematycznej skrajni taboru, na tym rysunku pokazano fragment zarysu kinematycznej skrajni taboru według karty UIC 505-1 [4].

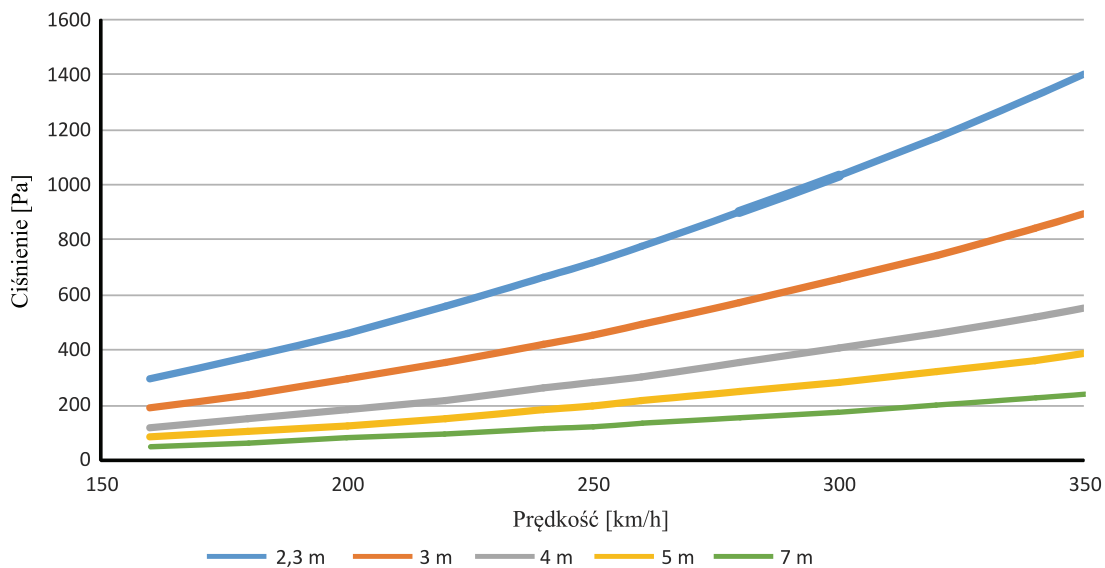
Przy stałej odległości od osi toru, im większa jest prędkość jazdy, tym większe ciśnienie, np. dla odległości 5 m od osi toru i prędkości 160 km/h ciśnienie wynosi 80,4 Pa, przy dwukrotnie większej prędkości 320 km/h ciśnienie wynosi około 321,4 Pa, a więc czterokrotnie więcej. Przy prędkości 350 km/h ciśnienie wynosi już 384,5 Pa, a więc blisko pięciokrotnie

więcej. Przebieg krzywych ciśnienia w funkcji prędkości dla różnych odległości od osi toru pokazano na rysunku 9.

Te wartości ciśnień należy uwzględnić przy projektowaniu obiektów budowlanych znajdujących się w sąsiedztwie toru, np. ekranów akustycznych, szczególnie przy liniach dużych prędkości. Dotychczasowe maksymalne prędkości pociągów rzędu 160 km/h nie stwarzały żadnego zagrożenia w tym zakresie. Obowiązujące do 2008 r. kolejne wydania normy PN-B-02011 [7], zostały zastąpione normą europejską PN-EN 1991-1-4:2008 [9]. Zgodnie z normą PN-B-02011:1977 [7], dla przeważającej części terytorium Polski wartość charakterystycznego ciśnienia prędkości wynosiła 250 Pa (w strefie I – o najmniejszej charakterystycznej prędkości wiatru 20 m/s). Wartości te należało uwzględnić przy projektowaniu wszelkich obiektów budowla-



Rys. 8. Ciśnienie w funkcji odległości od osi toru dla różnych prędkości [opracowanie własne]



Rys. 9. Ciśnienie w funkcji prędkości dla różnych odległości od osi toru [opracowanie własne]

nych i dopiero ciśnienia wywołane przejazdem pociągu, większe niż wynikające z normy budowlanej, musiały być uwzględnione w obiektach budowlanych położonych w bezpośredniej bliskości toru.

Nowa norma PN-EN 1991-1-4 [9] nieco zmienia strefy obciążenia wiatrem. Dotychczasowa strefa I, która obejmowała większą część Polski bez dwóch stref górskich na południu oraz Gór Świętokrzyskich i części nadmorskiej została powiększona o Góry Świętokrzyskie i część pasa nadmorskiego, który stał się „wąszy”. Dotychczasowa strefa II, obejmująca Góry Świętokrzyskie i pas nadmorski, została ograniczona do zawężonego pasa nadmorskiego, a strefa III obejmująca dwie strefy górskie na południu Polski pozostała bez zmian. Jednocześnie zmieniono z 20 m/s na 22 m/s zaleconą do obliczeń wartość prędkości wiatru i odpowiadającą jej wartość charakterystycznego ciśnienia prędkości z 250 na 300 Pa oraz gęstość powietrza $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Norma kolejowa PN-EN 14067-4 [8] zaleca jako standardową wartość gęstości powietrza $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

Dla klasycznego pociągu pasażerskiego (złożonego z lokomotywy i doczepionych wagonów) i prędkości 160 km/h, ciśnienie 300 Pa występuje w odległości 2,78 m od osi toru, tj. nieco ponad 1,1 m od skrajni taboru, a dla pociągów dużych prędkości odległość ta zmniejsza się do 2,27 m (około 0,6 m od skrajni taboru). Zatem, przy prędkości 160 km/h dla prawidłowo

zaprojektowanych i wykonanych budowli znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie toru w odległości około 2,8 m od osi toru, nie ma żadnego niebezpieczeństwa związanego z aerodynamicznym oddziaływaniem pociągu.

Przy prędkościach 250 km/h i większych, ta bezpieczna odległość zdecydowanie wzrasta. Zgodnie z obecnie obowiązującą normą PN-EN 1991-1-4 [9] ciśnienie 300 Pa występuje w odległościach od osi toru podanych w tablicy 2.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że płaskie, pionowe obiekty, położone w mniejszej odległości od osi toru niż odległość wynikająca z tablicy 2, przy określonej prędkości jazdy pociągu powinny być zaprojektowane na oddziaływanie ciśnienia większego, niż wynika to z normy [9].

2.3. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje poziome ponad torem

Analogicznie do oddziaływania na powierzchnie pionowe znajdujące się obok toru, ciśnienie powietrza wywołane przejazdem pociągu oddziałuje na płaskie poziome powierzchnie znajdujące się ponad torem (rys. 10). Do takich obiektów można zaliczyć:

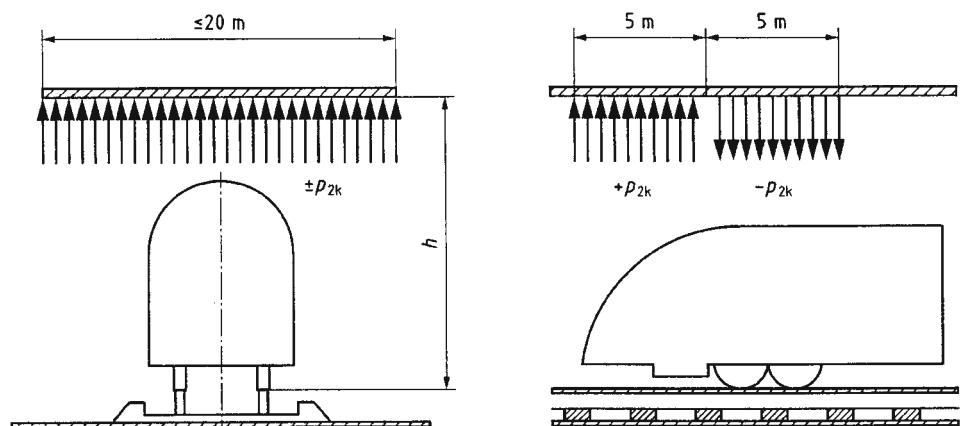
- konstrukcje ochraniające sieć trakcyjną (np. konstrukcje bramowe),
- pomosty i kładki.

Tablica 2

Odległość występowania ciśnienia 300 Pa dla różnych prędkości

V [km/h]	160	180	200	220	240	250	260	280	300	320	340	350
$p = 300 \text{ Pa}$ dla pociągów pasażerskich (klasycznych)												
Y [m]	2,78	3,20	3,62	4,06								
$p = 300 \text{ Pa}$ dla pociągów dużych prędkości												
Y [m]	2,27	2,61	2,95	3,30	3,66	3,84	4,03	4,41	4,81	5,23	5,66	5,89

[Opracowanie własne].



Rys. 10. Oddziaływanie ciśnienia na płaskie poziome powierzchnie ponad torem [8]

Na podstawie [8], zmiany ciśnienia można obliczyć według wzorów (6), (7):

$$p_{2k} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot k_2 \cdot C_{p2} \quad (6)$$

oraz

$$C_{p2} = 2 : (h - 3,1)^2 + 0,015 \quad (7)$$

gdzie:

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ – standardowa gęstość powietrza,
 V – prędkość pociągu,

k_2 – współczynnik kształtu dla pociągu:

$k_2 = 1,0$ dla pociągów towarowych,

$k_2 = 0,85$ dla pociągów pasażerskich,

$k_2 = 0,6$ dla pociągów dużych prędkości
 $V \geq 250 \text{ km/h}$, o dobrym kształcie aerodynamicznym,

C_{p2} – współczynnik, zależny od wysokości ponad torem,

h – wysokość dolnej powierzchni rozpatrywanej struktury ponad główką szyny.

Podobne oddziaływanie wywołane przejazdem pociągu można zaobserwować na płaskich poziomych powierzchniach znajdujących się na pewnej wysokości z boku toru (rys. 11). Sytuacja taka dotyczy zadaszeń peronów o minimalnej wysokości 3,8 m ponad główką szyny, opartych na słupach, bez ścian bocznych (równoległych do peronu) oraz bez ściany utworzonej przez inny pociąg stojący na torze po drugiej stronie peronu.

Ciśnienie dla określonej odległości od osi toru można obliczyć według [8] ze wzorów (8) i (9):

$$p_{3k} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot k_3 \cdot C_{p3} \quad (8)$$

oraz

$$C_{p3} = 1,5 : (Y + 0,25)^2 + 0,015 \quad (9)$$

gdzie:

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ – standardowa gęstość powietrza),

V – prędkość pociągu,

k_3 – współczynnik zależny od wysokości h :

$k_3 = (7,5 - h) : 3,7$ dla $3,8 \text{ m} \leq h < 7,5 \text{ m}$,

$k_3 = 0$ dla $h \geq 7,5 \text{ m}$;

C_{p3} – współczynnik, zależny od wysokości ponad torem,

Y – odległość od osi toru,

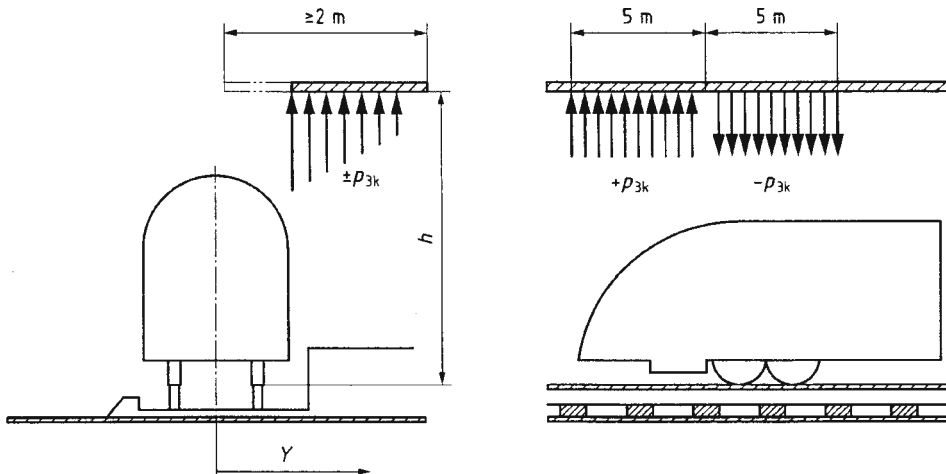
h – wysokość dolnej powierzchni rozpatrywanej struktury ponad główką szyny.

2.4. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje mieszane

W podobny sposób można obliczyć oddziaływanie ciśnienia powietrza, wywołanego przejazdem pociągu, na płaskie powierzchnie mieszane znajdujące się obok toru: pionowe i poziome lub skośne (rys. 12). Do takich obiektów można zaliczyć:

- ekrany dźwiękochłonne, składające się z części pionowej i skośnej lub poziomej,
- zadaszenia peronów zawierające dach oraz ściany boczne równoległe do peronu, które mogą być zarówno konstrukcją wsporczą dachu, jak i ścianką wypełniającą przestrzeń pomiędzy podporami),
- zadaszenia peronów jednocześnie przykrywające poczekalnię lub inną budowlę,
- oparte na słupach zadaszenia peronów pomiędzy dwoma torami w sytuacji, kiedy na torze po drugiej stronie peronu stoi inny pociąg.

Ciśnienie równoważne jest w tym przypadku większe od ciśnienia działającego wyłącznie na pionową lub poziomą powierzchnię. Ciśnienie to można obliczyć według wzorów (10) i (11), jak dla przypadku powierzchni pionowych [8]:



Rys. 11. Oddziaływanie ciśnienia z boku toru na powierzchnie na pewnej wysokości [8]

$$p_{1k} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot C_{p1} \quad (10)$$

oraz

$$C_{p1} = 2,5 : (Y + 0,25)^2 + 0,02 \quad (11)$$

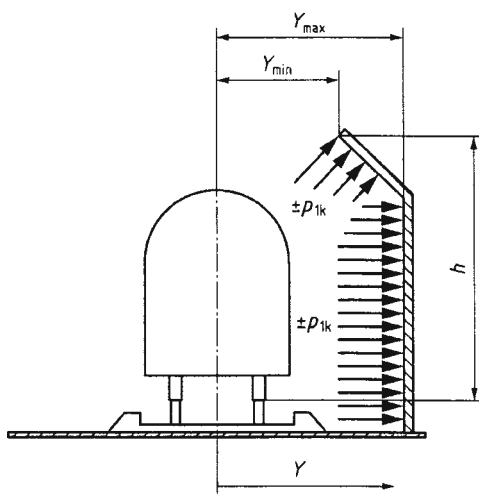
z tym, że $Y = 0,6 \cdot Y_{\min} + 0,4 \cdot Y_{\max}$

gdzie:

Y_{\min} – minimalna odległość rozpatrywanej powierzchni od osi toru,

Y_{\max} – maksymalna odległość rozpatrywanej powierzchni od osi toru,

jeżeli $Y_{\max} > 6$ m, to do obliczeń przyjmuje się $Y_{\max} = 6$ m.



Rys. 12. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje mieszane [8]

2.5. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje zamknięte

Innym rodzajem obiektów są konstrukcje zamknięte, otaczające tory na długości ograniczonej do 20 m (rys. 13), takie jak:

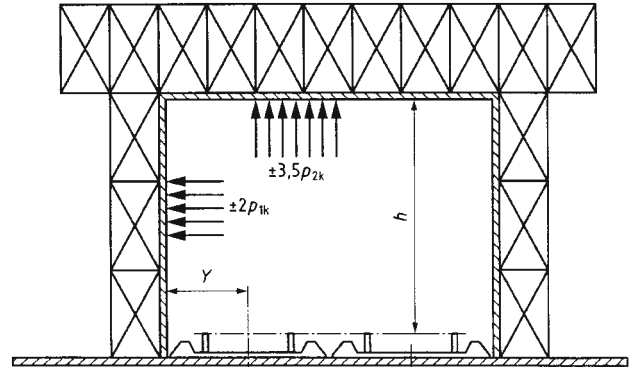
- konstrukcje z powierzchnią poziomą nad torami i przynajmniej jedną pionową powierzchnią,
- szalunki do betonu (np. używane przy budowie mostów),
- konstrukcje tymczasowe (np. przejścia/mostki serwisowe),
- konstrukcje ochraniające sieć trakcyjną (np. konstrukcje bramowe).

Konstrukcje dłuższe od 20 m powodują powstawanie efektów podobnych do oddziaływań w tunelach, lecz o znacznie większych amplitudach ciśnień i nie są objęte podanymi wzorami.

Oddziaływanie ciśnienia powietrza wywołanego przejazdem pociągu na tego typu konstrukcje, można obliczyć według wzorów podanych w normie PN-EN 14067-4 [8]:

- punkt 2.1 – ciśnienie p_{1k} dla powierzchni pionowych, położonych wzdłuż toru,

- punkt 2.2 – ciśnienie p_{2k} dla powierzchni poziomych, położonych ponad torami.



Rys. 13. Oddziaływanie ciśnienia na konstrukcje zamknięte [8]

Wartości tych ciśnień powinny być wielokrotnie następującymi mnożnikami:

- $\times 2$ – dla ciśnień p_{1k} działających na płaskie pionowe powierzchnie wzdłuż toru,
- $\times 2,5$ – dla ciśnień p_{2k} działających na płaskie poziome powierzchnie nad torami, jeżeli konstrukcja obejmuje jeden tor,
- $\times 3,5$ – dla ciśnień p_{2k} działających na płaskie poziome powierzchnie nad torami, jeżeli konstrukcja obejmuje dwa tory (jak na rys. 13).

3. Wnioski

Zwiększenie prędkości pociągów powoduje wyraźne zwiększenie oddziaływań aerodynamicznych, w tym oddziaływań w fali ciśnienia powstającej podczas przejazdu pociągu. Niezależnie od odległości od osi toru, ciśnienie przy prędkości 350 km/h jest blisko 5 razy większe, niż przy prędkości 160 km/h. W związku z tym przy projektowaniu obiektów budowlanych, takich jak:

- ekrany akustyczne,
- pomosty i kładki,
- konstrukcje ochraniające sieć trakcyjną,
- zadaszenia peronów,
- poczekalnie lub inne budowle,
- konstrukcje zamknięte otaczające tory,

mogących znajdować się w bliskim sąsiedztwie toru, po którym będą poruszać się pociągi dużych prędkości, należy uwzględnić wyższe wartości ciśnień oddziałujących na te konstrukcje, niż wynikające bezpośrednio z normy PN-EN 1991-1-4 [9]. W celu uniknięcia budowy konstrukcji o zwiększonej wytrzymałości, należy zapewnić odpowiednio dużą odległość od osi toru.

Podczas projektowania nowego pojazdu szynowego dużych prędkości należy zapewnić mu odpowiedni kształt aerodynamiczny, a w szczególności kształt nosa,

który ma decydujące znaczenie na wielkość, generowanych w otoczeniu, zmian ciśnienia. Krótki nos powoduje większą zmianę ciśnienia w piku i sprawia, że staje się ona gwałtowniejsza. Długi nos zapewnia łagodniejsze i mieszczące się w dopuszczalnych granicach zmiany ciśnienia, tym samym umożliwiając jazdę z większą prędkością. Jednocześnie nie może zostać przekroczona odległość 5,0 m liczona od przodu pojazdu do najbliższej osi, co jest powiązane z kształtem czołowej części pojazdu oraz możliwością wpisywania się pojazdu w skrajnię (w tym w łukach toru) i długością ukresu.

Literatura

1. Assessment of potential aerodynamic effects on personnel and equipment in proximity to high-speed train operations, U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, Final Report, December, 1999.
2. ERA/ERTMS/033281, dokument techniczny, wersja 4.0 z 20.09.2018.
3. Gąsowski W.: *Aerodynamika pociągu*, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych, Poznań, 1998.
4. Karta UIC 505-1: Pojazdy kolejowe. Skrajnia taboru, wydanie 9, listopad, 2003.
5. Karta UIC 779-1 „Efekt podmuchu od przejeżdżających pociągów na struktury sąsiadujące z torem”, wydanie 1, 1.01.1996.
6. Kubski K.: *Badania rozkładu prędkości strumienia powietrza w podmuchach wywołanych jazdą pociągu i wzajemnego wpływu mijających się pociągów na zmiany ciśnienia statycznego działającego na ściany wagonów i na powierzchnię czołową lokomotywy*, praca badawcza, Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa (COBiRTK), Warszawa, styczeń 1974.
7. PN-B-02011:1977: Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.
8. PN-EN 14067-4+A1:2019-03: Kolejnictwo – Aerodynamika – Część 4: Wymagania i procedury badań aerodynamicznych na szlaku.
9. PN-EN 1991-1-4:2008: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
10. TSI Loc&Pas – 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, Dz.U. UE L 356 z dnia 12 grudnia 2014 r., zmienione Rozporządzeniem Wykonawczym Komisji (UE) nr 2018/868 z dn. 13.06.2018 r., Rozporządzeniem Wykonawczym Komisji (UE) nr 2019/776 z dn. 16.05.2019 r. oraz Rozporządzeniem Wykonawczym Komisji (UE) nr 2020/387 z dn. 9.03.2020 r.