

# Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 5 – Oddziaływanie podmuchu na ludzi

Andrzej ZBIEC<sup>1</sup>

## Streszczenie

W cyklu artykułów opisujących zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu scharakteryzowano 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 piątej części cyklu opisano oddziaływanie podmuchu na ludzi.

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

## 1. Wstęp

W pierwszej części [1] opisano ogólną klasyfikację zjawisk aerodynamicznych, które ze względu na rodzaj oddziaływania zostały podzielone na zmiany ciśnienia oraz podmuch. Zaprezentowano przebieg zmian ciśnienia w otwartej przestrzeni, wywołanych przejazdem pociągu oraz oddziaływanie ciśnienia na różnego rodzaju obiekty znajdujące się obok toru. Wskazano podstawowe dokumenty normatywne dotyczące zagadnień aerodynamicznych. Przedstawiono wnioski dotyczące budowy szybkiego pojazdu kolejowego oraz wytrzymałości i usytuowania konstrukcji przy liniach dużych prędkości.

Część druga [2], będąca kontynuacją zagadnień związanych ze zmianami ciśnienia, dotyczyła wzajemnego oddziaływania poruszających się pociągów na ich powierzchnie czołowe i boczne. Stwierdzono w niej, że to pociąg poruszający się z dużymi prędkościami oddziałuje na pociąg poruszający się wolniej i na inne obiekty, a nie odwrotnie. Konsekwencją tego jest znaczny – nawet ponad sześciokrotny wzrost ciśnienia na szybie czołowej pociągu starszego typu o prędkości maksymalnej 120 km/h, mijającego się z pociągiem jadącym 350 km/h, co może wiązać się z niebezpieczeństwem uszkodzenia szyby czołowej taboru o mniejszej prędkości maksymalnej.

W części trzeciej [3] opisano zjawisko podmuchu, który jest drugim oprócz ciśnienia, podstawowym rodzajem oddziaływań aerodynamicznych, wywoływanych przez pociąg przejeżdżający z dużą prędkością. Opisano charakterystyczne cechy podmuchu oraz jego oddziaływanie na otoczenie (w postaci sił działających na obiekty) oraz

na infrastrukturę kolejową. Zaprezentowano porównanie podmuchu wywołanego przez pociąg klasyczny (złożony z lokomotywy i wagonów) i zespół trakcyjny dużych prędkości, z którego wynika, że pociągi zespolone wywołują znacznie mniejszy podmuch i ze względu na ten rodzaj oddziaływania mogą jeździć z większymi prędkościami. Omówiono i zilustrowano zdjęciami także oddziaływanie aerodynamiczne mieszane (tzn. połączone, jednoczesne oddziaływanie ciśnienia i podmuchu) mogące powodować podrywanie tłucznia przez „ssące” działanie ciśnienia oraz porywanie tłucznia przez falę podmuchu.

Część czwartą [4] poświęcono zagadnieniu oddziaływania ciśnienia na ludzi – zarówno na pracowników kolejowych, jak i na pasażerów oczekujących na peronach i stojących w otwartych oknach lub siedzących tuż przy oknie w mijających pociągach.

Niniejsza część cyklu artykułów dotyczy oddziaływania podmuchu na ludzi, który – analogicznie jak w przypadku oddziaływania na otaczające obiekty – jest drugim oprócz ciśnienia, rodzajem oddziaływań aerodynamicznych, wywoływanych przejazdem pociągu z dużą prędkością.

## 2. Oddziaływanie podmuchu na pasażerów lub pracowników kolejowych

Jak zasygnalizowano we wstępie, podmuch jest drugim oprócz ciśnienia rodzajem oddziaływania na pasażerów lub pracowników kolejowych, znajdujących się

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

w pobliżu toru, po którym przejeżdża pociąg z dużą prędkością. Norma PN-EN 14067-4 [5] w p. 6.2 stwierdza, że jest to dominujący rodzaj oddziaływania na ludzi. Na prędkość podmuchu, oprócz geometrii samego pociągu, duży wpływ ma także układ geometryczny toru i jego otoczenie. Indukowany przejazdem pociągu podmuch powoduje powstawanie sił oddziałujących zarówno na obiekty, jak i na ludzi. Prędkość i kierunek powstałego podmuchu zmienia się gwałtownie podczas przejazdu pociągu. W przypadku osób istnieje niebezpieczeństwo chwilowego zachwiania równowagi, które w sytuacjach granicznych może nawet doprowadzić do przewrócenia się.

Na problematykę bezpieczeństwa związaną z występowaniem podmuchu zwrócono uwagę również w raporcie [6]: „W konsekwencji, gdy pociągi jadące z dużymi prędkościami przejeżdżają przez niektóre stacje bez zatrzymywania się, podmuch powietrza od przejeżdżającego pociągu może wpływać na bezpieczeństwo osób oczekujących na peronie. Podobno w Venturze w Kalifornii wydarzył się incydent, wywołany przypuszczalnie podmuchem powietrza od przejeżdżającego pociągu, w którym pusty wózek dziecięcy na peronie dworca kolejowego został popchnięty w kierunku toru i zgnieciony pod kołami pociągu (Freedenberg 2003 [7]). Wiele incydentów wydarzyło się na peronach stacji w Wielkiej Brytanii, spowodowanych podmuchem powietrza wywołanym przez pociąg, w tym: wprawione w ruch wózki dziecięce i wózek bagażowy uderzyły w pociąg, a ludzie prawie stracili równowagę podczas przejazdu pociągu (Gawthorpe 1994 [8]; Johnson, Dalley i Temple 2002 [9]). Przejeżdżające pociągi towarowe były przyczyną większości incydentów w Wielkiej Brytanii (Temple i Johnson 2003 [10]). Oprócz peronów dworcowych, w Stanach Zjednoczonych podniesiono kwestie bezpieczeństwa związane z efektami aerodynamicznymi

od przejeżdżających pociągów przez osoby korzystające ze szlaków przy torach, gdzie ścieżki do wspólnego użytku (ścieżki dla pieszych i rowerzystów) są budowane i lokalizowane w sąsiedztwie czynnych linii kolejowych.”

Do oceny oddziaływania podmuchu na pasażerów lub pracowników obowiązują te same wartości, które są stosowane przy ocenie pojazdu, a zostały opisane w p. 2 części trzeciej [3] cyklu. W celu przypomnienia, w odległości 3 m od osi toru, po którym jedzie pociąg, podmuch nie może przekraczać:

- 15,5 m/s na wysokości 1,4 m powyżej główki szyny,
- 20 lub 22 m/s na wysokości 0,2 m powyżej główki szyny, w zależności od prędkości maksymalnej pociągu.

Aby lepiej uświadomić sobie, jak duże są to wartości, możemy je odnieść do opisu siły wiatru w skali Beauforta (w stopniach Beauforta). W tablicy 1 zamieszczono, odpowiadające poszczególnym dopuszczalnym wartościom podmuchu, stopnie w skali Beauforta i przyporządkowane do nich prędkości wiatru oraz opisy.

Na długo przed powstaniem normy PN-EN 14067-4 [5] autor pracy [13], wykonanej przez Instytut Kolejnictwa (wówczas Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa), badając zjawiska aerodynamiczne sugerował: „Przy sile wiatru 7° w skali Beauforta (17 m/s) na peronach stacji, przez którą przejeżdża pociąg z dużą szybkością nie powinni przebywać ludzie”. To samo zalecenie powtórzył we wnioskach końcowych. Jako maksymalną dopuszczalną dla człowieka prędkość strumienia powietrza w podmuchu zaproponował 12 m/s (środkowa 6 w skali Beauforta) i na tej podstawie wyznaczył granicę strefy niebezpiecznej w funkcji prędkości pociągu.

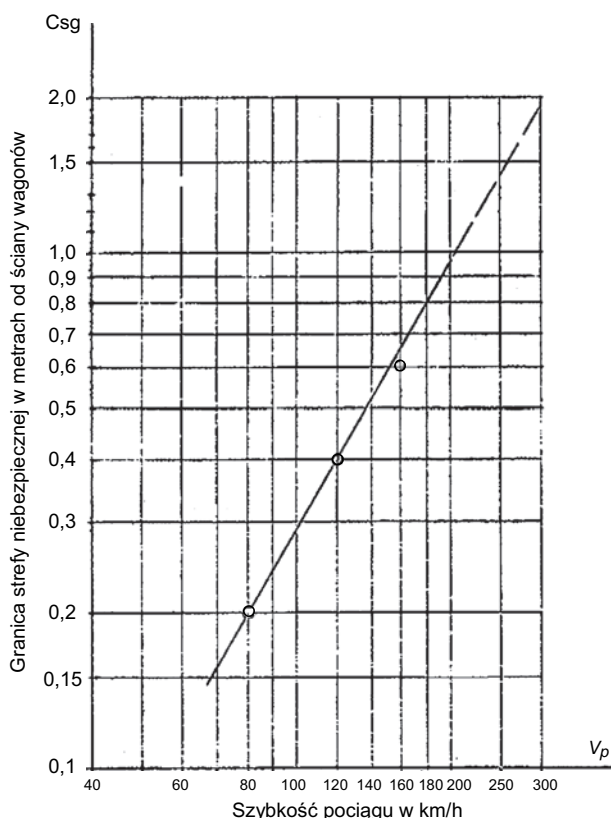
Tablica 1

Zestawienie podmuchu i siły wiatru w skali Beauforta (B)

Dopuszczalny podmuch według normy [m/s]	B	Prędkość wiatru [m/s]	Opis	Zjawiska na lądzie
–	4	5,5÷7,9	umiarkowany wiatr	unoszą się kurz i luźne kawałki papieru, zaczynają poruszać się gałęzie
–	5	8,0÷10,7	dość silny wiatr	kołyszą się małe drzewa
–	6	10,8÷13,8	silny wiatr	poruszają się duże gałęzie, słychać gwizd wiatru na drutach elektrycznych lub telefonicznych, utrudnione używanie parasoli
15,5	7	13,9÷17,1	bardzo silny wiatr	poruszają się całe drzewa, z wysiłkiem idzie się pod wiatr
20,0	8	17,2÷20,7	wichura	gałązki odłamują się od drzew, chodzenie staje się bardzo utrudnione
22,0	9	20,8÷24,4	silna wichura	lekkie konstrukcje ulegają uszkodzeniu

[Opracowanie własne na podstawie 11, 12].

Pokazano to na rysunku 1 (badania prowadzono do prędkości 200 km/h i ekstrapolowano je do prędkości 300 km/h).



Rys. 1. Granica strefy niebezpiecznej dla człowieka według K. Kubskiego [13]

Z opisów przedstawionych w tabelicy 1 widać, że określone w normie PN-EN 14067-4 [5] dopuszczalne wartości poddmuchu są niebezpieczne zarówno dla pasażerów na peronie, jak i dla pracowników kolejowych wykonujących prace w torach. Tym samym odległość 3 m od osi toru – odpowiadająca odległości ponad 1,3 m od skrajni taboru i zarazem od krawędzi peronu (dla przypomnienia – na wysokości tułowia pomiędzy nimi jest zaledwie 30 mm różnicy) i około 1,5 m od ściany pociągu – jest odległością zbyt małą. Pasażerowie znajdujący się na standardowym peronie o wysokości 0,76 m (według TSI INF [14]) będą narażeni na podmuch o sile 7 stopni w skali Beauforta na wysokości tułowia i ewentualnie silniejszy – nawet do 9 stopni w skali Beauforta na wysokości nóg, przy czym oddziaływanie o danej sile na wysokości nóg stwarza mniejsze niebezpieczeństwo, niż na wysokości tułowia. Natomiast ze względu na ukształtowanie terenu, pracownicy kolejowi mogą być narażeni na podmuch nawet o sile 9 stopni w skali Beauforta, ale działający również na wysokości tułowia. Dodatkowo

należy uwzględnić prędkość pociągu, dla której zostały podane limity poddmuchu. Wartość poddmuchu na wysokości 1,4 m – a więc dotycząca przede wszystkim osób na peronie – jest mierzona przy prędkości pociągu 200 km/h (lub mniejszej, jeśli pociąg nie rozwija takiej prędkości). Czyli pociągi mogące rozwijać znacznie większe prędkości, np. 350 km/h, mogą w odległości 3 m od osi toru (tj. około 1,3 m od krawędzi peronu) wywołać znacznie większy podmuch, niż wskazuje norma. Inaczej została określona wartość poddmuchu na wysokości 0,2 m – a więc działająca na pracowników kolejowych w terenie oraz częściowo na osoby na peronie, na wysokości nóg. Podmuch jest w tym przypadku mierzony przy prędkości pociągu 300 km/h. Zatem dla pociągu rozwijającego prędkość 350 km/h wytwarzany podmuch nie będzie znacząco większy. Posłużono się przy tym dopuszczalnymi wartościami poddmuchu, chociaż podmuch rzeczywisty dla konkretnego typu pojazdu kolejowego może być zdecydowanie mniejszy. Nie można jednak wykluczyć, że do eksploatacji zostanie dopuszczony pojazd, który podczas jazdy będzie wywoływał podmuch bliski wartości granicznej. W związku z tym należy dążyć do ograniczenia wielkości poddmuchu, przynajmniej o 1÷2 stopnie w skali Beauforta dla pasażerów (do wartości 5÷6 B) i o 2÷3 stopnie w skali Beauforta dla pracowników (do wartości 6÷7 B). Dopuszczenie oddziaływania nieco większego poddmuchu dla pracowników wydaje się uzasadnione, uwzględniając, że są to z założenia osoby dorosłe (w wieku od 18 do 65 lat) i w pełni sprawne, co niekoniecznie musi być spełnione w przypadku pasażerów (mogą to być również dzieci i osoby starsze oraz osoby o zmniejszonej sprawności).

Ograniczenie wielkości poddmuchu można uzyskać albo przez zmniejszenie prędkości pociągów podczas mijania peronów, na których te pociągi nie będą zatrzymywać się, albo przez zwiększenie dla pasażerów czy pracowników odległości od osi toru (ściany pociągu) lub przez budowę peronów nie bezpośrednio przy torach głównych zasadniczych (będących przedłużeniem torów szlakowych), lecz przy torach dodatkowych (głównych dodatkowych) tak, aby pociągi niezatrzymujące się przy peronach były oddzielone od nich dodatkowym torem. W tym kierunku zmierza też polskie prawodawstwo. W rozporządzeniu [15], dotyczącym usytuowania budowli kolejowych (paragraf 98, ust. 4a), znalazł się zapis: „Peronów nie lokalizuje się przy torach, po których ruch pociągów odbywa się z prędkością większą niż 200 km/h, z wyjątkiem przypadków, gdzie zastosowano środki techniczno-eksploatacyjne zapewniające dostęp z peronu do pociągu tylko w przypadku jego zatrzymania.” Ponieważ lokalizacja peronu przy torach głównych zasadniczych nie jest całkowicie wykluczona, należy dążyć do zapewnienia odpowiednio

szerokiej strefy niedostępnej dla pasażerów, najlepiej w połączeniu z systemem ostrzegawczym informującym o zbliżającym się pociągu i o tym, czy pociąg zatrzymuje się na stacji.

Przyjmując zmniejszenie podmuchu, z dopuszczonych normą PN-EN 14067-4 [5] 15,5 m/s w odległości 3 m od osi toru do wartości ze środka zakresu prędkości powietrza przy 5 stopniach w skali Beauforta, tj. 9 m/s otrzymamy 1,7-krotne zmniejszenie prędkości wiatru. Do znalezienia odległości, w której podmuch osiągnie zakładaną prędkość, można posłużyć się krzywymi podmuchu dla różnych pojazdów z rysunku 8 z części trzeciej [3]. Przyjmując dla uproszczenia, że szerokość taboru wynosi 3,0 m (przeciętne rzeczywiste szerokości polskich wagonów osobowych wynoszą do 2,88 m), to dla odległości 3 m od osi toru (czyli około 1,5 m od ściany bocznej pociągu) odczytujemy z wykresu bezwymiarowe wartości podmuchu odniesione do prędkości i po podzieleniu przez współczynnik 1,7 odczytujemy nową bezpieczną odległość dla tak obliczonych ilorazów. Wyniki zamieszczono w tablicy 2.

Jako krzywą teoretyczną przyjęto najniższą położoną na wykresie „mały indukowany podmuch”, ponieważ dla pozostałych krzywych przeliczone nowe wartości znalazłyby się poza wykresem. Ponadto, jedna krzywa reprezentująca obliczenia teoretyczne jest tu w zupełności wystarczająca, bo wszystkie trzy krzywe pochodzą z tych samych obliczeń. W przypadku lokomotywy 103 DB, dla którego nowa przeliczona wartość także znalazłaby się poza wykresem, wątpliwości budzi charakter tej krzywej – widoczne silne wypłaszczenie, co oznaczałoby niemalże całkowity brak tłumienia (zanikania) podmuchu, a osiągnięcie wartości zerowej nastąpiłoby w odległości kilkudziesięciu metrów. Po odrzuceniu tej krzywej otrzymuje się średnią wartość 3 m, liczoną od boku pojazdu, tj. w przybliżeniu 4,5 m od osi toru. Wartość ta

jest o około 0,7 m mniejsza niż zaproponowana strefa zabroniona ze względu na ochronę słuchu w sąsiedztwie obiektów stałych, wynosząca około 5,2 m od osi toru, co przedstawiono na rysunku 4 w części czwartej [4].

W stosunku do polskich pracowników torowych obowiązują Standardy Techniczne [18], zgodnie z którymi strefa zagrożenia, w której nie mogą przebywać pracownicy dla prędkości pociągów 160 km/h  $< V \leq 250$  km/h, wynosi 3,0 m (wartość nominalna; istnieją ponadto wartości zawężone i wyjątkowo dopuszczalne), przy czym liczona jest ona od ujednoliconej skrajni budowli GPL-1, której krawędź znajduje się w odległości 2 m od osi toru. Zatem pracownicy torowi nie powinni znaleźć się bliżej, niż 5,0 m od osi toru. W związku z tym wydaje się zasadne, aby podróżni na peronie również znajdowali się przynajmniej w odległości 5 m od osi toru (ponad 3,3 m od krawędzi peronu), szczególnie, że wyznaczona dla pracowników strefa obowiązuje dla prędkości nie większej niż 250 km/h.

Podobne podejście Kolei Brytyjskich w zakresie zróżnicowania dopuszczalnych prędkości podmuchu dla pasażerów i pracowników przywołano w raporcie [17]: „Jeśli chodzi o poziom narażenia ludzi na przepływ powietrza indukowanego na peronach stacji, Koleje Brytyjskie zasugerowały limit dla pracowników przytorowych wynoszący 38 mil na godzinę, co odpowiada górnej granicy 7 stopni w skali Beauforta. Dla ogółu społeczeństwa sugerowany limit wynosi 25 mil na godzinę, co odpowiada górnej granicy 5 stopni w skali Beauforta.” Bazując na tej podstawie, Koleje Amerykańskie dokonały oszacowania ograniczeń prędkości dla pociągów ze względu na pasażerów i pracowników, znajdujących się w odległości 1 m lub 2 m od pociągu (tabl. 3). Podane zakresy prędkości wynikają z różnych właściwości aerodynamicznych, charakteryzujących różne składy pociągów.

Tablica 2

Przeliczenie wartości podmuchu i znalezienie nowej odległości bezpiecznej

Źródło podmuchu	Wartości z wykresu dla 1,5 m	Wartości po podzieleniu (:1,7)	Nowa odległość [m]
pociąg konwencjonalny	0,25	0,15	3,1
krzywa teoretyczna „mały indukowany podmuch”	0,29	0,17	4,1
pociąg BR 86, podmuch na wys. $H = 1,75$	0,30	0,18	2,5
pociąg BR 86, podmuch na wys. $H = 0,81$	0,38	0,22	2,47
lokomotywa 103 DB	0,39	0,23	poza skalą
pociąg rosyjski z płaskim czołem	0,40	0,23	3
<b>średnio</b>			<b>3,0</b>

Opracowanie własne na podstawie [16, 17].

W tabelicy 4 zamieszczono wartości podmuchu indukowanego na peronach przez pociągi przejeżdżające na trasie New Haven (Stan Connecticut) – Boston (Stan Massachusetts). Analogicznie jak w tabelicy 3, zakresy prędkości wynikają z różnych właściwości aerodynamicznych pociągów. Wprawdzie nie podano, na jakiej wysokości ponad główką szyny zmierzony został podmuch, jednakże część z uzyskanych wartości przekracza europejskie wartości dopuszczalne z normy PN-EN 14067-4 [5], podane dla odległości 3 m od osi toru, czyli około 1,5 m od pociągu (dla podanych tu prędkości pociągów jest to 20 m/s na wysokości 0,2 m oraz przy prędkości 200 km/h lub maksymalnej eksploatacyjnej – 15,5 m/s na wysokości 1,4 m).

W raporcie [17] zawarto również analizę wpływu podmuchu wykonaną przez Szwedów [19]. Na peronie ustawiono dwa manekiny w dwóch odległościach od osi toru – 3,2 m i 4,3 m. Symulowano najbardziej niekorzystny

przypadek osób stojących twarzą lub plecami w stronę nadjeżdżającego pociągu – ciała miały powierzchnię 0,73 m<sup>2</sup> w płaszczyźnie prostopadłej do osi toru i 0,36 m<sup>2</sup> w płaszczyźnie równoległej do osi toru. Mierzono siłę wiatru podczas 32 przejazdów trzech różnych typów pociągów: pociągu towarowego, pociągu ekspresowego IC i pociągu szybkiego X2000. Pomiary wykonano w różnych warunkach wietrznych i dla różnych prędkości pociągów. Wyniki średnich arytmetycznych maksymalnych sił wypadkowych przedstawiono w tabelicy 5.

W raporcie [6] przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w 2002 r. przez personel SNCF w Mansfield w Stanie Massachusetts. Badania wykonano za pomocą, imitujących sylwetkę ludzką, cylindrycznych manekinów (SNCF/VR Model 1993), składających się z cylindrów o średnicy 0,39 m i długości 0,92 m, zamocowanych na otensometrowanych słupkach z podstawą (rys. 2). Zestawienie wyników przedstawiono w tabelicy 6.

Tabelica 3

## Zmniejszenie prędkości pociągu dla ograniczenia podmuchu w odległości 1 i 2 m od pociągu [17]

Kryterium siły wiatru	$V_{max}$ dla 1 m od pociągu [km/h]	$V_{max}$ dla 2 m od pociągu [km/h]
5 stopni w skali Beauforta (pasażerowie)	80÷118	98÷146
7 stopni w skali Beauforta (pracownicy)	127÷188	156÷232

Tabelica 4

## Prędkość podmuchu wywołanego przez przejeżdżające pociągi [17]

Prędkość pociągu	Podmuch w odległości 1 m od pociągu	Podmuch w odległości 2 m od pociągu
161 km/h	14,7 21,7 m/s (53 78 km/h)	11,9÷17,5 m/s (43÷63 km/h)
241 km/h	21,9÷32,2 m/s (79÷116 km/h)	17,8÷26,4 m/s (64÷95 km/h)

Tabelica 5

## Średnie arytmetyczne maksymalnych sił wypadkowych [17]

	Pociąg IC	Pociąg towarowy	Pociąg szybki $V < 200$ km/h	Pociąg szybki $V > 200$ km/h
Manekin w odległości 4,3 m od osi toru*	62 N	96 N	59 N	114 N
Manekin w odległości 3,2 m od osi toru**	139 N	154 N	103 N	261 N
Maksymalna siła ciągnąca (ssąca) w odległości 3,2 m od osi toru**	88 N	65 N	90 N	126 N
Maksymalna siła pchająca w odległości 3,2 m od osi toru**	101 N	101 N	88 N	208 N

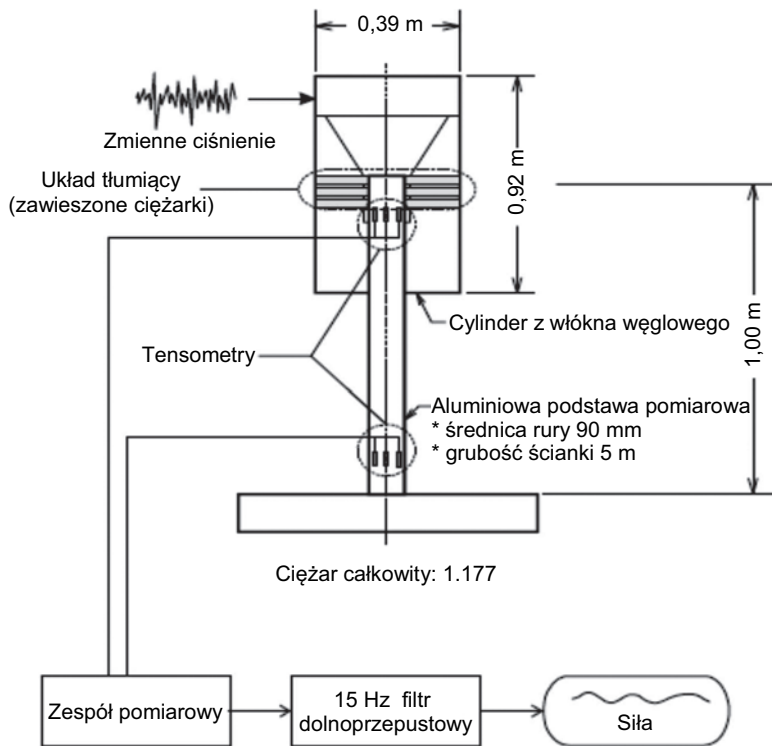
\*) 4,3 m od osi toru odpowiada 2,76 m od ściany pociągu szybkiego  
 \*\*) 3,2 m od osi toru odpowiada 1,66 m od ściany pociągu szybkiego

Tabelica 6

## Siły oddziaływania na pasażerów dla nominalnych prędkości pociągów [6]

Rodzaj pociągu	Siła wynikowa (średnia + 2σ)			
	Oś manekina 1,2 m od pociągu		Oś manekina 1,46 m od pociągu*	
	201 km/h	241 km/h	201 km/h	241 km/h
Acela Express	74 N	106 N	63 N	91 N
Pociąg Amfleet z lokomotywą AEM-7	174 N	–	119 N	–
Pociąg Amfleet z lokomotywą HHP-8	129 N	–	zbyt mało pomiarów	–

\*) we Francji – 1,46 m odpowiada bezpiecznej odległości dla personelu kolejowego w pobliżu torów dużych prędkości (z pociągami TGV jadącymi z prędkością większą niż 209 km/h i pociągami konwencjonalnymi jadącymi z prędkością większą niż 161 km/h)



Rys. 2. Manekin SNCF/VR Model 1993 do pomiaru sił działających na ludzi [6]

Pociąg Acela Express to typowy elektryczny zespół trakcyjny dużych prędkości ze zwężającym się nosem na każdym końcu ( $V_{\max} = 240$  km/h). Wagony typu Amfleet to konwencjonalne wagony pasażerskie z płaskim końcem, przeznaczone do ciągnięcia przez lokomotywę ( $V_{\max} = 201$  km/h). Lokomotywa AEM-7 to lokomotywa elektryczna starszego typu z płaskim czołem ( $V_{\max} = 201$  km/h). Lokomotywa HHP-8 to lokomotywa elektryczna z nieco wydłużonym czołem ( $V_{\max} = 217$  km/h). Wyniki przedstawione w tablicy 6 w pełni odpowiadają kształtom lokomotyw.

Wyniki cząstkowe pokazano na rysunkach 3–6 ze szczególnym wskazaniem, przez który pociąg i którą jego część wywołany jest podmuch o określonej sile:

- „Head” – okolica czoła, obejmująca zjawiska tuż przed pociągiem do przejścia czoła pociągu;
- „Tail” – cały pociąg z pominięciem czoła oraz przestrzeń za pociągiem, w której masy powietrza są ciągnięte za pociągiem;
- „Wake” – przestrzeń za pociągiem, w której masy powietrza są ciągnięte za pociągiem;
- „Train” – cała długość związana ze zjawiskami aerodynamicznymi wywołanymi przez przejeżdżający pociąg.

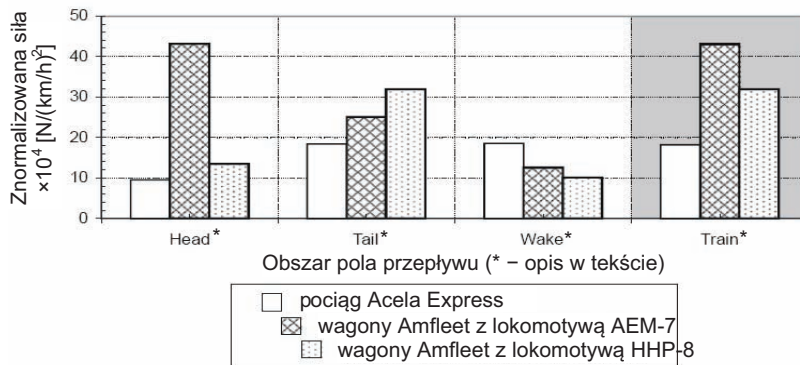
Na osi pionowej zaprezentowano siły odniesione do prędkości pociągu (iloraz siły do prędkości pociągu  $\cdot 10^{-4}$ ).

Rysunki 4 i 6 pokazują wyraźne różnice pomiędzy pociągami – jednolite oddziaływanie sił podmuchu wytwarzanych przez pociąg dużych prędkości

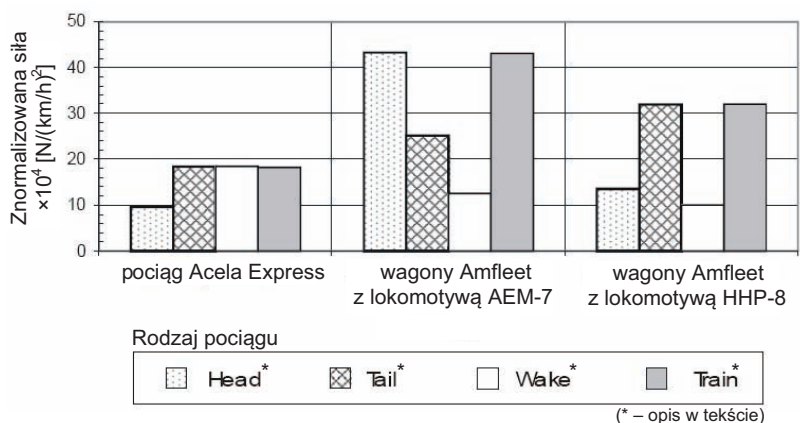
(elektryczny zespół trakcyjny dużych prędkości ze zwężającym się nosem) i bardzo nierównomierne oddziaływanie sił podmuchu wytwarzanych przez pociągi klasyczne – złożone z lokomotywy i wagonów. Z tego powodu pociągi specjalnie zaprojektowane do jazdy z dużymi prędkościami mogą jechać o wiele szybciej, wywołując taki sam podmuch, jak jadące wolniej pociągi starszej generacji z lokomotywą z płaskim czołem. Badania te pokazują także, że łatwiej jest uzyskać pożądane efekty aerodynamiczne na jednolitym pojeździe, jakim jest zespół trakcyjny.

Przeprowadzone przez autora badania dotyczące wytwarzanego podmuchu przez polski tabor kolejowy, a opisane w części trzeciej [3] doprowadziły do dokładnie takich samych wniosków, że aerodynamiczny kształt pojazdu ma kluczowe znaczenie dla wywołanego podmuchu. Pod tym względem puda pociągów zespolonych są znacznie lepiej ukształtowane, mają możliwie dobrze osłonięte podwozie oraz wózki i wywołują łagodniejsze oddziaływania niż pociągi klasyczne złożone z lokomotywy i doczepionych do niej wagonów. Tabor klasyczny takich osłon w ogóle nie ma lub je ma w ograniczonym zakresie, co powoduje, że wprawia w ruch większe masy powietrza i wywołuje większe jego zawirowania. Dotyczy to zarówno wywołania samego podmuchu w postaci „wiatru”, jak i generowanych przez niego sił.

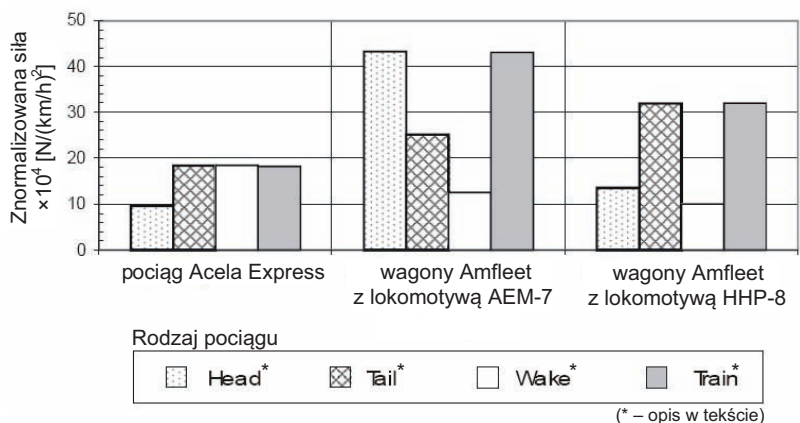
Badania wykonane na manekinach [6] pokazały również, że chociaż oddziaływanie przejeżdżającego pociągu jest turbulentne (szczególnie w strefie za



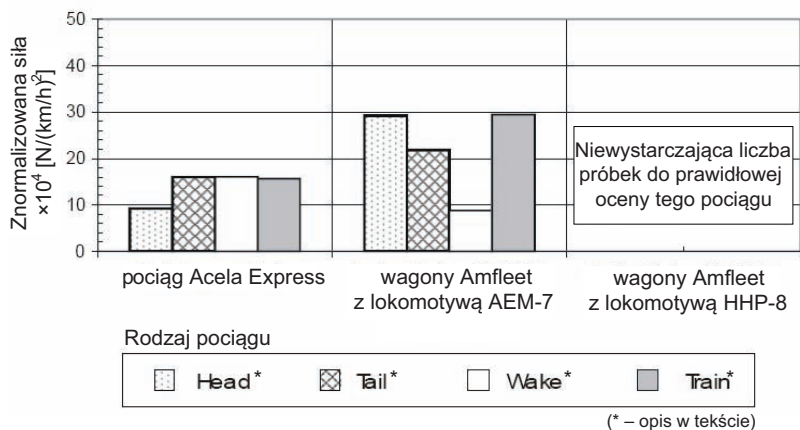
Rys. 3. Siły oddziaływania na manekina w odległości 1,2 m od pociągu z podziałem na strefy [6]



Rys. 4. Siły oddziaływania na manekina w odległości 1,2 m od pociągu z podziałem na rodzaje pociągów [6]



Rys. 5. Siły oddziaływania na manekina w odległości 1,46 m od pociągu z podziałem na strefy [6]



Rys. 6. Siły oddziaływania na manekina w odległości 1,46 m od pociągu z podziałem na rodzaje pociągów [6]

pociągiem), to dominującym kierunkiem przepływu powietrza jest kierunek przejeżdżającego pociągu. Oddziaływanie na ludzi odbywa się głównie w kierunku podłużnym, a oddziaływanie poprzeczne nie ma znaczącego wpływu, z wyjątkiem przypadku pociągu z płaskim czołem, dla którego występuje silny podmuch boczny. Siła oddziaływania na pasażerów (manekina) jest podobna dla wszystkich pociągów i przedstawia się następująco:

- dla kierunku podłużnego: podczas przejazdu czoła pociągu pasażer jest popychany najpierw w kierunku jazdy pociągu, po czym natychmiast następuje pociągnięcie w kierunku przeciwnym, a podczas przejazdu pozostałej części pociągu pasażer jest głównie popychany w kierunku jazdy pociągu;
- dla kierunku poprzecznego: podczas przejazdu czoła pociągu pasażer jest początkowo odpychany od pociągu, a następnie przyciągany w jego kierunku, a podczas przejazdu pozostałej części pociągu pasażer jest na przemian odpychany i przyciągany, oscylując wokół położenia neutralnego.

W wyniku badań przeprowadzonych z poziomu niskiego peronu (o wysokości 8 cali, tj. 203 mm powyżej główki szyny) na pociągach pasażerskich Acela Express ( $V_{\max} = 240$  km/h) oraz wagonów Amfleet z lokomotywami AEM-7 ( $V_{\max} = 201$  km/h) i HHP-8 ( $V_{\max} = 217$  km/h), w raporcie [6] zaproponowano następujące odległości minimalne od przejeżdżających pociągów (tabl. 7).

Tablica 7

Zalecane odległości minimalne [6]

	Odległość od osi toru [m]	Odległość od pociągu [m]
Pasażer na peronie	3,12	1,6
Pracownik na poboczu toru	2,72	1,2

W Polsce istnieją dwa typy pociągów pasażerskich dużych prędkości:

- elektryczny zespół trakcyjny ED250 (Pendolino), mogący jechać z maksymalną prędkością eksploatacyjną 250 km/h,
- lokomotywa EU44 Husarz (Europrinter ES64U4 Taurus) z wagonami osobowymi, mogące jechać z maksymalną prędkością eksploatacyjną 200 km/h (według [20] prędkość maksymalna lokomotywy ES64U4 przy zasilaniu prądem stałym wynosi 200 km/h, a przy zasilaniu prądem prędiennym – 230 km/h).

W tablicy 8 przedstawiono wyniki dotychczasowych badań przeprowadzonych przez autora na tych pociągach. Wyniki badań mają charakter orientacyjny,

ponieważ badania nie dotyczyły dopuszczenia konkretnego typu pojazdu kolejowego do ruchu i nie wykonano 20 jazd z określonymi prędkościami. Część wyników badań została przeliczona do prędkości wymaganych normą. Jednakże w sposób wiarygodny pokazują one wartości wywołwanego podmuchu w odległości 3 m od osi toru.

Na podstawie przeprowadzonych przez autora badań można stwierdzić, że dla tych pociągów spełniony jest postulowany warunek obniżenia podmuchu do wartości 5÷6 B dla pasażerów oraz do wartości 6÷7 B dla pracowników. Zakładając, że na pasażerów oddziałuje głównie podmuch na wysokości 1,4 m powyżej główki szyny, to w odległości 3 m od osi toru ani dla lokomotywy Husarz ciągnącej wagony osobowe, ani dla Pendolino nawet przy prędkości 250 km/h nie została przekroczona wartość 5 stopni w skali Beauforta (podczas dopuszczania pojazdu badania odbywałyby się z prędkością maksymalną 200 km/h, dla której podmuchy są jeszcze mniejsze). Jeśli chodzi o pracowników, którzy oprócz podmuchu na wysokości 1,4 m powyżej główki szyny mogą być narażeni również na podmuch na wysokości 0,2 m powyżej główki szyny, to dla obu tych pociągów nie została przekroczona wartość 6 stopni w skali Beauforta. Pomimo, że wyniki te nie uwzględniają oddziaływania wiatru w otoczeniu i szczególnych warunków terenowych mogących mieć wpływ na uzyskane wyniki pomiarów, to jednak można stwierdzić, że dla obecnie kursujących w Polsce pociągów szybkich, odległość 3 m od osi toru (1,325 m od krawędzi peronu) jest wystarczającą strefą bezpieczną ze względu na oddziaływanie podmuchu. Jest to zgodne ze strefą zagrożenia wynoszącą 1,5 m od krawędzi peronu, wyznaczoną przez Rozporządzenie [15] (par. 98, ust. 11) dla prędkości pociągów do 200 km/h.

Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami dotyczącymi określenia bezpiecznej odległości od toru (pociągu) przez pasażerów i pracowników torowych, dla osiągniętych przez nowe pociągi prędkości z zakresu 250÷350 km/h, należy zachować odległość 5 m od osi toru, do czasu eksperymentalnego potwierdzenia wywołwanego przez nie podmuchu.

### 3. Wnioski

Zarówno badania opisane w cytowanej literaturze zagranicznej, jak i badania przeprowadzone przez autora na polskim taborze kolejowym dowodzą, że aerodynamiczny kształt pojazdu ma istotne znaczenie dla wywołwanego podmuchu oraz generowanych przez niego sił. Znacznie lepszym kształtem aerodynamicznym od taboru klasycznego (lokomotywa i doczeponie do niej wagony) wyróżniają się pociągi zespolone dużych prędkości. Mają dobrze osłonięte



Tablica 8

## Podmuchy w odległości 3 m od osi toru

Podmuchy [m/s] w odległości 3 m od osi toru na wys. 0,2 i 1,4 m odniesione do siły wiatru w skali Beauforta z tablicy 1				
Lokomotywa Husarz, prędkość 200 km/h, 11 pomiarów				
	$h = 0,2$ m	st. Beauforta	$h = 1,4$ m	st. Beauforta
<b>Wartość maksymalna</b>	13,6	górna 6	10,2	górna 5
<b>Wartość średnia</b>	10,5	górna 5	7,9	górna 4
<b>Średnia + 2<math>\sigma</math></b>	13,4	górna 6	10,6	górna 5
Pendolino, prędkość 200 km/h, 6 pomiarów				
	$h = 0,2$ m	st. Beauforta	$h = 1,4$ m	st. Beauforta
<b>Wartość maksymalna</b>	9,4	średnia 5	8,0	dolna 4
<b>Wartość średnia</b>	7,0	średnia 4	6,6	średnia 4
<b>Średnia + 2<math>\sigma</math></b>	10,6	górna 5	8,8	średnia 5
Pendolino, prędkość 250 km/h, 8 pomiarów				
	$h = 0,2$ m	st. Beauforta	$h = 1,4$ m	st. Beauforta
<b>Wartość maksymalna</b>	10,9	dolna 6	9,8	średnia 5
<b>Wartość średnia</b>	9,3	średnia 5	7,6	górna 4
<b>Średnia + 2<math>\sigma</math></b>	12,2	średnia 6	10,4	górna 5

[Opracowanie własne].

podwozie i wózki oraz jednolitą, smukłą bryłę, zakończoną z obu stron zwężającym się nosem, co wywołuje łagodniejsze oddziaływania. Tabor klasyczny takich osłon w ogóle nie ma lub je ma w ograniczonym zakresie, co powoduje, że wprawia w ruch większe masy powietrza i wywołuje większe jego zawirowania.

Opisane w niniejszej części badania pokazały również, że dominującym kierunkiem przepływu powietrza jest kierunek przejeżdżającego pociągu. Zatem oddziaływanie na ludzi odbywa się głównie w kierunku podłużnym, a oddziaływanie poprzeczne nie ma znaczącego wpływu. Jedynie w przypadku pociągu z płaskim czołem występuje silny podmuch boczny, ale takie pociągi nie kursują z dużymi prędkościami. Autorzy analizowanych tu różnych opracowań wskazują, że siła wiatru 7 stopni w skali Beauforta (czyli do 17,1 m/s) może być wartością niebezpieczną dla ludzi. W związku z tym należy dążyć do ograniczenia wielkości podmuchu dla pasażerów, przynajmniej o 1÷2 stopnie w skali Beauforta (do wartości 5÷6 B) i o 2÷3 stopnie dla pracowników (do wartości 6÷7 B).

Ograniczenie wielkości podmuchu można uzyskać przez zmniejszenie prędkości pociągów podczas mijania peronów, na których te pociągi nie będą się zatrzymywać. Jednakże takie postępowanie jest sprzeczne z ideą zwiększania prędkości kursowania pociągów – nie po to jest podnoszona, aby następnie ją ograniczać. W związku z tym należy szukać innych sposobów ograniczenia niebezpiecznego wpływu

podmuchu na pasażerów i pracowników kolejowych. Można to osiągnąć innymi sposobami przez:

- ograniczenie przebywania ludzi na peronach stacji, przez którą przejeżdża pociąg z dużą szybkością;
- zwiększenie odległości przebywania ludzi od osi toru (ściany pociągu), np. przez zapewnienie odpowiednio szerokiej strefy niedostępnej dla pasażerów, najlepiej w połączeniu z systemem ostrzegawczym informującym o zbliżającym się pociągu i o tym, czy pociąg zatrzymuje się na stacji;
- budowę peronów nie bezpośrednio przy torach głównych zasadniczych (będących przedłużeniem torów szlakowych), lecz przy torach dodatkowych (głównych dodatkowych), tak aby pociągi niezatrzymujące się przy peronach były oddzielone od nich dodatkowym torem.

Dla obecnie kursujących w Polsce pociągów szybkich, odległość 3 m od osi toru (1,325 m od krawędzi peronu) jest wystarczającą strefą bezpieczną ze względu na oddziaływanie podmuchu i spełnia postulowany warunek obniżenia podmuchu do wartości 5÷6 B dla pasażerów oraz do wartości 6÷7 B dla pracowników. Na wysokości 1,4 m powyżej główki szyny (wysokość głównego oddziaływania na pasażerów), w odległości 3 m od osi toru ani dla lokomotywy Husarz ciągnącej wagony osobowe, ani dla Pendolino nie została przekroczona wartość 5 stopni w skali Beauforta. Natomiast dla pracowników, którzy są narażeni również na podmuch na wysokości 0,2 m powyżej główki

szyny, to dla obu tych pociągów nie została przekroczona wartość 6 stopni w skali Beauforta.

Dla ewentualnych nowych pociągów osiągających prędkości z zakresu 250÷350 km/h, do czasu eksperymentalnego potwierdzenia wywołanego przez nie podmuchu, należy zachować odległość 5,0 m od osi toru.

## Literatura

- Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 1: Oddziaływanie ciśnienia na obiekty*, Problemy Kolejnictwa, 2021, z. 191.
- Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 2: Oddziaływanie ciśnienia na mijające się pociągi*, Problemy Kolejnictwa, 2021, z. 192.
- Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 3: Oddziaływanie podmuchu*, Problemy Kolejnictwa, 2022, z. 194.
- Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 4: Oddziaływanie ciśnienia na ludzi*, Problemy Kolejnictwa, 2022, z. 197.
- Norma PN-EN 14067-4+A1:2019-03: Kolejnictwo – Aerodynamika – Część 4: Wymagania i procedury badań aerodynamicznych na szlaku.
- The Aerodynamic Effects Of Passing Trains To Surrounding Objects And People, Final Report, U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, April 2009.
- Freedenberg M.: *Train Rips Passengers' Items from Platform*. The Ventura County Star, Ventura, CA, August 25, 2003.
- Gawthorpe R.: *High Speed Aerodynamic Effects on Existing Railways*, Proceedings from WCRR'94 World Congress on Railway Research (Paris, France, November 14–16, 1994) 1:787–795. Paris: SNCF.
- Johnson T., Dalley S., Temple J.: *Recent Studies of Train Slipstreams*, The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains, Monterey-Pacific Grove, California, 2002, December 2–6.
- Temple, J., Johnson T.: (2003): Review of Slipstream Effects on Platforms." Prepared for Rail Safety and Standards Board, 2003, Report number: AEATR-AER-2003-002, Issue 1. <http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/Review%20of%20train%20slipstream%20effects%20on%20platforms.pdf>, WWW [dostęp: 05.07.2023].
- Skala Beauforta, WWW [https://pl.wikipedia.org/wiki/Skala\\_Beauforta](https://pl.wikipedia.org/wiki/Skala_Beauforta) [dostęp: 05.07.2023].
- Beaufort scale, WWW [https://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort\\_scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort_scale) [dostęp: 05.07.2023].
- 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.
- TSI INF – Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie, Dz.U. 1998, poz. 987 z późniejszymi zmianami.
- Neppert H. and Sanderson R.: *Aerodynamics of High-Speed Trains Based on a Comparison of Results from Model Tests, Full-Scale Measurements and Theoretical Studies*, Glasers annalen ZEV, 1977/04/04, 101(4) pp. 97-102 (30 Ref.) (German).
- Assessment of potential aerodynamic effects on personnel and equipment in proximity to high-speed train operations, Final Report, U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, December, 1999.
- Standardy Techniczne szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości  $V_{max} \leq 200$  km/h (dla taboru konwencjonalnego) /250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Tom II. Skrajnia budowlana linii kolejowych. Wersja 2.0, Warszawa, 2017.
- Andersson T., Aronson L., Pettersson B.: *Train Wind Force Caused by Passing Trains*, NTIS No. PB95-131306/HDM, Report No: SP-RAPP-1994:23.
- Lokomotywa ES64U4, TTS Technika Transportu Szynowego, 2009, nr 12.