

Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 4: Oddziaływanie ciśnienia na ludzi

Andrzej ZBIEĆ¹

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 czwartej części cyklu opisano oddziaływanie ciśnienia na ludzi.

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

1. Wstęp

W części pierwszej [1] cyklu opisano ogólną klasyfikację zjawisk aerodynamicznych, które ze względu na rodzaj oddziaływania zostały podzielone na zmiany ciśnienia oraz na 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 dotyczących zmian ciśnienia, dotyczyła wzajemnego oddziaływania poruszających się pociągów na ich powierzchniach czołowe i boczne. Stwierdzono w niej, że to pociąg poruszający się z dużymi prędkościami oddziałuje na pociąg poruszający się wolniej oraz 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. Z porównania podmuchu wywołanego przez pociąg klasyczny (złożony z lokomotywy i wagonów) i zespół trakcyjny dużych prędkości 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 tłuczni przez „ssące” działanie ciśnienia oraz porywanie tłuczni przez falę podmuchu. W części czwartej opisano oddziaływanie 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.

2. Oddziaływanie efektów aerodynamicznych na ludzi

Analogicznie jak przy oddziaływaniu pociągu na obiekty położone w pobliżu toru, można wyróżnić takie same rodzaje oddziaływań aerodynamicznych na ludzi:

- zmiany / uderzenia ciśnienia,
- podmuch,
- oddziaływanie mieszane.

Dodatkowym rodzajem oddziaływania, niezwiązanym bezpośrednio z oddziaływaniem tych wymienionych, ale takim, o którym warto przy tej okazji

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

wspomnieć, jest oddziaływanie psychologiczne. W niniejszej części omówiono oddziaływanie ciśnienia, natomiast pozostałe rodzaje oddziaływań będą przedstawione w dalszych częściach cyklu.

3. Oddziaływanie ciśnienia na pasażerów lub pracowników w otwartej przestrzeni

W przypadku pierwszego z wymienionych wyżej czynników, nie odnotowano żadnych przypadków szkodliwego oddziaływania ciśnienia wywołanego przejazdem pociągu na ciało ludzkie. Jedynym organem mogącym reagować negatywnie na takie zmiany ciśnienia jest organ słuchu. Powstająca podczas przejazdu pociągu fala ciśnienia, odczuwana często jako uderzenie ciśnienia na błonę bębenkową, może spowodować niekorzystne skutki. Podobne zapisy zawarto w raporcie [4]: „Jednym z aspektów zmiany ciśnienia związanego z aerodynamiką ruchu pociągów dużych prędkości jest to, że ludzie na peronach stacji położonych zbyt blisko przejeżdżającego pociągu mogą doświadczać skutków chwilowych ciśnień jako odczucia w kanałach usznych”.

O ile nie ma rozbieżności co do faktu, że występowanie znacznego nadciśnienia może spowodować uszkodzenie organu słuchu, o tyle nie ma jednoznacznych danych, dotyczących szkodliwego oddziaływania zmniejszonego ciśnienia, czy wręcz próżni na organ słuchu.

Według jednych źródeł [5, 6], analogicznie jak przy nadciśnieniu, w próżni również może nastąpić uszkodzenie błony bębenkowej: „Nagła dekompresja może spowodować pęknięcie błony bębenkowej i zatok, w tkankach miękkich mogą wystąpić siniaki i wyciek krwi, a szok może spowodować wzrost zużycia tlenu, co prowadzi do niedotlenienia”. Także według raportu [4], wśród zamieszczonych objawów usznych spowodowanych zmianami ciśnienia rzędu 13 332÷66 661 Pa (zarówno dla nadciśnienia jak i podciśnienia) podano pęknięcie błony bębenkowej – tablica 1.

Według innych źródeł [7, 8, 9] próżnia prowadzi do prawie natychmiastowej utraty przytomności (w ciągu 9÷11 sekund) w wyniku gwałtownej utraty tlenu z organizmu, a próba wstrzymywania oddechu może spowodować uszkodzenie płuc. Możliwe jest również wystąpienie zapaści sercowo-naczyniowej. Próżnia nie powoduje jednak uszkodzenia błony bębenkowej, a szkodliwy może być w tym przypadku jedynie zbyt gwałtowny powrót ze stanu przebywania w próżni do ciśnienia normalnego. W artykule [8] przywołano wypadek z 1966 roku, gdy podczas testowania w komorze próżniowej prototypu kombinezonu księżycowego odłączył się od niego wąż doprowadzający powietrze, a ciśnienie w skafandrze gwałtownie spadło do około 0,007 atmosfery (= 709 Pa). To oznacza, że różnica ciśnień wyniosła około 100 600 Pa i była znacznie większa, niż podana w tablicy 1. Nie nastąpiło pęknięcie błony bębenkowej, a jedynym negatywnym efektem był ból ucha,

Tablica 1

Objawy uszne przy różnych poziomach zmian ciśnienia [4]

Ciśnienie [Pa]	Objawy
Wyższe ciśnienie względne w uchu środkowym (spadek ciśnienia otoczenia)	
400÷667	Wyczuwalne uczucie wypełnienia ucha.
1333÷2000	Wyraźne uczucie wypełnienia ucha. Zmniejszona intensywność dźwięku.
2000÷4000	Narastający dyskomfort związany z dzwonieniem w uszach (szum w uszach) o charakterze syczącym, ryczącym, trzaskającym lub kłapiącym; może objawiać się bólem i łagodnymi zawrotami głowy. (Jeśli nie ma zmian patologicznych, ciśnienie 2000 Pa jest zwykle wystarczające, aby wymusić zadziałanie trąbki Eustachiusza i wyrównać ciśnienie – wywołuje irytujące „kliknięcie”, które jest wyczuwalne w uchu).
> 4000	Narastający ból, szum w uszach i zawroty głowy.
13 332÷66 661	Pęknięcie błony bębenkowej, jeśli trąbka słuchowa jest całkowicie zablokowana.
Ciśnienie względne w uchu środkowym niższe (wzrost ciśnienia otoczenia)	
400÷667	(jak dla spadku ciśnienia),
1333÷2000	(jak dla spadku ciśnienia),
2000÷4000	(jak dla spadku ciśnienia).
7999	Silny ból ucha, wyraźny szum w uszach i rozpoczynające się nudności.
7999÷10 666	Silny ból ucha promieniujący do okolicy skroniowej, ślinianki przyusznej i policzka; wyraźna głuchota; zawroty głowy i szum w uszach zwykle nasilają się, ale szum w uszach może ustąpić.
13 332÷66 661	Pęknięcie błony bębenkowej.

co uznano za skutek gwałtownej kompresji (powrotu do ciśnienia normalnego). Brak jest zatem jednoznacznego potwierdzenia szkodliwego oddziaływania próżni na organ słuchu.

Ponadto należy zauważyć, że zgodnie z fizycznym podziałem rozróżnia się kilka rodzajów próżni (tabl. 2 [10]), a ciśnienie podczas opisywanego wypadku (7 hPa) znajdowało się w dolnej granicy „próżni niskiej”, blisko granicy z następnym przedziałem „próżni średniej”.

Ponieważ zmiany ciśnienia podczas przejazdu pociągu są rzędu 1000 Pa, oznacza to że rozpatrywany zakres ciśnień należy stale do pierwszego zakresu – czyli mamy do czynienia z „ciśnieniem atmosferycznym”. Dla normalnego ciśnienia atmosferycznego 1013 hPa, zmniejszenie ciśnienia o 1000 Pa (= 10 hPa) daje ciśnienie 1003 hPa. Jest to w zakresie występujących w ciągu roku ciśnień atmosferycznych i bardzo daleko od najbliższego zakresu próżni – „próżni niskiej”. Zatem w dalszych rozważaniach obniżenie ciśnienia (podciśnienie) związane z przejazdem pociągu, a oddziałujące na ucho ludzkie, nie będzie brane pod uwagę. Uwzględniane będą jedynie dodatnie wartości ciśnień (nadciśnienie).

Zgodnie z przebiegiem, przedstawionym w części pierwszej [1] na rysunku 3, czas Δt pomiędzy pikiem dodatnim i ujemnym będzie odpowiadał połowie okresu T fali ciśnienia. Zatem częstotliwość f powstałej fali ciśnienia wyraża wzór:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\Delta t}. \quad (1)$$

Dla przebiegu rzeczywistego, zarejestrowanego przy prędkości 200 km/h, przedstawionego w części pierwszej [1] na rysunku 4, czas Δt wynosi 0,0627 s, co odpowiada częstotliwości około 8 Hz. W związku z tym powstały hałas należy zakwalifikować jako hałas infradźwiękowy.

Obecnie obowiązująca wersja rozporządzenia z 2018 r., dotycząca szkodliwych dla zdrowia czynników w środowisku pracy [11], nie zawiera dopuszczalnych wartości dla hałasu infradźwiękowego. Istniały one w rozporządzeniu z 2002 r. [12] i zostały usunięte na podstawie rozporządzenia zmieniającego z 2009 r. [13]. W 2010 r. pojawiła się natomiast norma PN-Z-01338:2010 [14] dotycząca hałasu infradźwiękowego, jednakże wszelkie zawarte w niej sposoby oceny dotyczą jedynie wartości korygowanych, odniesionych do długości czasu oddziaływania. Istnieje ponadto norma PN-ISO 10843 [15], w której przedstawiono zalecane metody opisu i pomiaru pojedynczych dźwięków impulsowych i krótkich serii dźwięków impulsowych powstających w wyniku eksplozji, ognia artyleryjskiego, wybuchów bomb i podobnych zjawisk, fal uderzeniowych, wystrzałów z broni palnej oraz funkcjonowania maszyn i urządzeń pobudzanych ładunkami wybuchowymi. W normie tej nie przedstawiono żadnych wartości dopuszczalnych, nie ma zatem żadnego dokumentu normatywnego, na podstawie którego można by ocenić, czy hałas wynikający z oddziaływania piku ciśnienia jest szkodliwy dla człowieka, czy nie. Jednakże samo zjawisko fizyczne pozostało. Dla szacunkowej oceny można posłużyć się nieobowiązującą już wersją rozporządzenia z 2002 r. [12]. Zgodnie z nią szczytowy, nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego nie może przekroczyć 145 dB.

Podobne spostrzeżenia i wartości zawarto w raporcie [4]: „Wahania ciśnienia poniżej częstotliwości 20 Hz, czyli poniżej zakresu słyszalności ludzkiego ucha, nazywane są infradźwiękami. Nie ustanowiono norm dotyczących limitów narażenia ludzi, ponieważ nie ma wystarczającej wiedzy na temat narażenia ludzi na infradźwięki i ich wpływu na utratę słuchu [16]. Sugerowany maksymalny poziom ciśnienia akustycznego dla ekspozycji na infradźwięki wynosi 150 dB, niezależnie od tego, jak krótki jest czas ekspozycji [17]. Maksymalny poziom ciśnienia jest obniżany w przypadku dłuższej ekspozycji.”

Tablica 2

Rodzaje próżni [10]

Rodzaj ciśnienia	Ciśnienie w hPa (mbar)	Liczba cząsteczek na cm ³	Średnia droga swobodna cząsteczki	Liczba uderzeń na powierzchnię (cm ⁻² ·s ⁻¹)
Ciśnienie atmosferyczne	1013,25	2,7×10 ¹⁹	68 nm	1023
Próżnia niska	300÷1	1019÷1016	0,1÷100 μm	1023÷1020
Próżnia średnia	1÷10 ⁻³	1016÷1013	0,1÷100 mm	1020÷1017
Próżnia wysoka (HV)	10 ⁻³ ÷10 ⁻⁷	1013÷109	10 cm÷1 km	1017÷1013
Próżnia bardzo wysoka (UHV)	10 ⁻⁷ ÷10 ⁻¹²	109÷104	1÷105 km	1013÷108
Próżnia ekstremalnie wysoka (XHV)	10 ⁻¹² ÷10 ⁻¹⁴	104÷102	105÷107 km	108÷106
Przestrzeń kosmiczna	10 ⁻⁷ ÷10 ⁻¹⁶	109÷1	1÷109 km	1013÷104
Próżnia absolutna (doskonała)	0	0	∞	0

Na podstawie wzoru zawartego w p. 1.3.4 normy PN-N-01307 [18], poziom ciśnienia akustycznego L wynosi:

$$L = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \text{ [dB]}, \quad (2)$$

gdzie:

- p – ciśnienie akustyczne [Pa],
- p_0 – ciśnienie odniesienia = 20 μ Pa.

Zatem szczytowy, nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego 145 dB odpowiada 355 Pa (dla sugerowanego w raporcie [4] maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego 150 dB będzie to już 632,46 Pa).

W celu oszacowania bezpiecznej odległości od przejeżdżającego pociągu (od osi toru) można przyjąć dwie drogi postępowania:

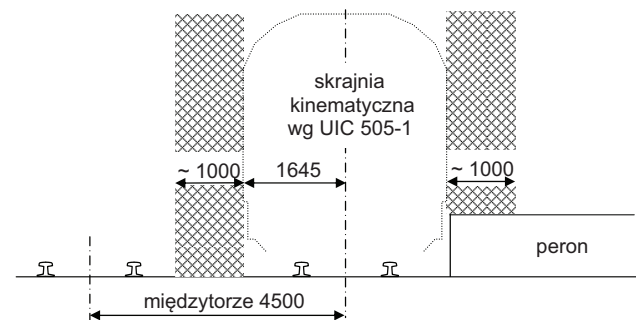
- jeśli pasażer lub pracownik znajduje się w terenie otwartym lub na peronie bez żadnych elementów stałych – jak wiaty, poczekalnie, budki, ekrany dźwiękochłonne czy płoty – można założyć, jak przedstawiono to w części pierwszej [1] w p. 2.1., że każdy pojazd szynowy dopuszczony do ruchu spełnia warunek maksymalnej zmiany ciśnienia w pik 800 Pa (pik do pik) w odległości 2,5 m od osi toru przy prędkości 250 km/h lub
- jeśli pasażer lub pracownik znajduje się w terenie lub na peronie zawierającym jakieś elementy stałe – jak wiaty, poczekalnie, budki, ekrany dźwiękochłonne czy płoty – można skorzystać ze wzorów na zmiany ciśnienia w określonej odległości od osi toru, jak przedstawiono to w części pierwszej [1] w p. 2.2.

W pierwszym przypadku należy oszacować jaką część całkowitej zmiany ciśnienia 800 Pa stanowi dodatnia część pik, gdyż – zgodnie z wcześniejszymi analizami – to ona jest odpowiedzialna za ewentualne szkodliwe oddziaływania na organ słuchu. W przeprowadzonych przez autora badaniach, przytoczonych w części pierwszej [1] w p. 2.1, stosunek pik do pik (dodatni do ujemnego) wynosił w przybliżeniu jak 1:2. Zatem z dopuszczalnej wartości 800 Pa wartość dodatniej części pik to około 267 Pa, a ujemnej to około 533 Pa.

Wspomniane badania były wykonywane na jednym typie pociągu i w ograniczonym zakresie prędkości. W dalszej analizie szkodliwego oddziaływania nadciśnienia na błony bębenkowe, w celu zachowania dodatkowej strefy bezpieczeństwa, można przyjąć bardziej niekorzystne założenie, że stosunek wartości pik dodatniego do ujemnego wynosi jak 1:1 (a nie 1:2 – jak w przytoczonych badaniach). Zatem dodatnia część pik będzie wynosić połowę całkowitej

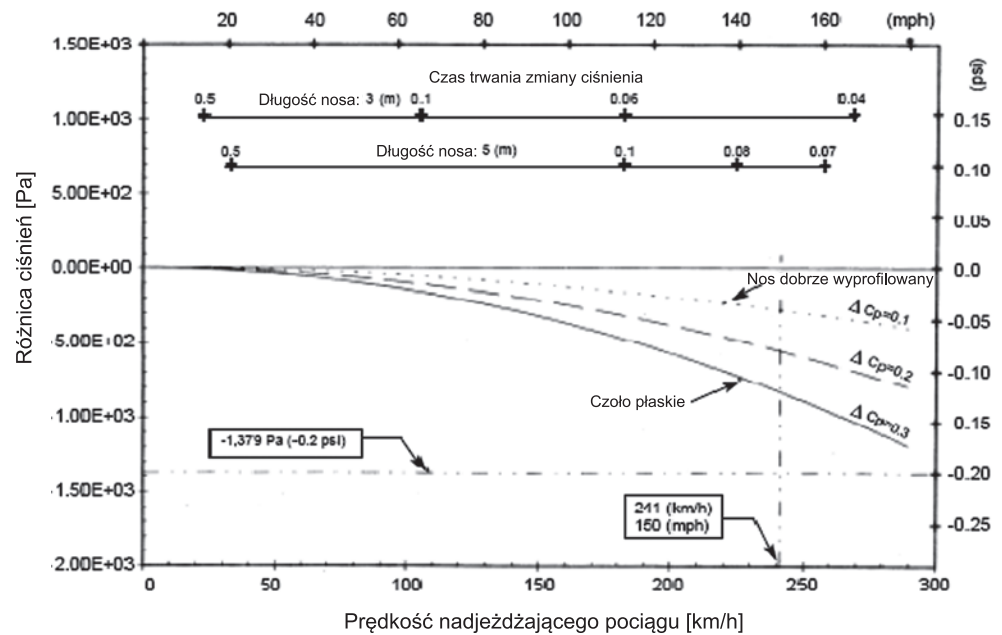
dopuszczalnej zmiany ciśnienia 800 Pa, czyli 400 Pa w odległości 2,5 m od osi toru, jak zaznaczono w części pierwszej [1] w p. 2.1 przy prędkości referencyjnej 250 km/h (lub przy prędkości maksymalnej, jeśli jest niższa). Ponieważ szczytowy nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego wynosi 145 dB, co odpowiada 355 Pa, to modyfikując wzór z części pierwszej [1] p. 2.2. (i układając proporcję z eliminacją czynników $0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot k_1$, a pozostawiając współczynnik aerodynamiczny C_p , zależny od odległości od toru) można obliczyć odległość od osi toru, dla której to ciśnienie zmniejszy się od wartości 400 Pa do wartości 355 Pa. Obliczona odległość wynosi 2,68 m od osi toru, czyli nieco ponad 1 m od ściany pojazdu szynowego (a ściślej – od skrajni kinematycznej taboru) i prawie dokładnie 1 m od krawędzi peronu (według Standardów Technicznych PKP PLK [19]). Sytuację tę przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

W celu doprecyzowania: pomiędzy skrajnią kinematyczną taboru na wysokości peronu, tj. 760 mm powyżej główki szyny [20], a jego krawędzią jest 55 mm różnicy, jednakże bardziej istotna jest tu pozioma różnica odległości pomiędzy krawędzią peronu, a skrajnią kinematyczną taboru na wysokości tułowia pasażera – czyli jej górną częścią, tj. powyżej 1170 mm od główki szyny (= 410 mm powyżej płaszczyny peronu), a ta wynosi zaledwie 30 mm.



Rys. 1. Strefa niebezpieczna dla słuchu w otwartej przestrzeni przy $V = 250$ km/h [opracowanie własne]

Interesujące wyniki badań podano w raporcie [4], prezentując wielkości ciśnień oddziałujących na człowieka w otwartej przestrzeni, znajdującego się właśnie w odległości 1 m od ściany bocznej wagonu (rys. 2). Ciśnienia zaprezentowano w funkcji prędkości pociągu oraz w zależności od kształtu czoła pociągu („Slender-Nose” – nos dobrze wyprofilowany; „Bluff-Nose” – czoło płaskie). Dla prędkości 250 km/h ciśnienie w odległości 1 m od ściany bocznej pociągu, dla pociągu z dobrze wyprofilowanym nosem (krzywa $\Delta C_p = 0,1$), wynosi około 291 Pa, a dla czoła pośredniego (krzywa $\Delta C_p = 0,2$) wynosi 582 Pa. Uzyskana na podstawie analiz wartość 355 Pa w odległości 1 m zawiera się pomiędzy wartościami dla czoła (nosa) dobrze wyprofilowanego i pośredniego z raportu amerykańskiego.



Rys. 2. Ciśnienie w odległości 1 metra od pociągu w otwartej przestrzeni [4]

W drugim rozpatrywanym przypadku, tj. gdy pasażer lub pracownik znajduje się w terenie lub na peronie zawierającym jakieś elementy stałe, to wykorzystując wzór z części pierwszej [1] z p. 2.2. można obliczyć odległość (od osi toru), dla której wystąpi

ciśnienie 355 Pa. Wyniki dla różnych pociągów i różnych prędkości pokazano w tabelicy 3 i na rysunku 3.

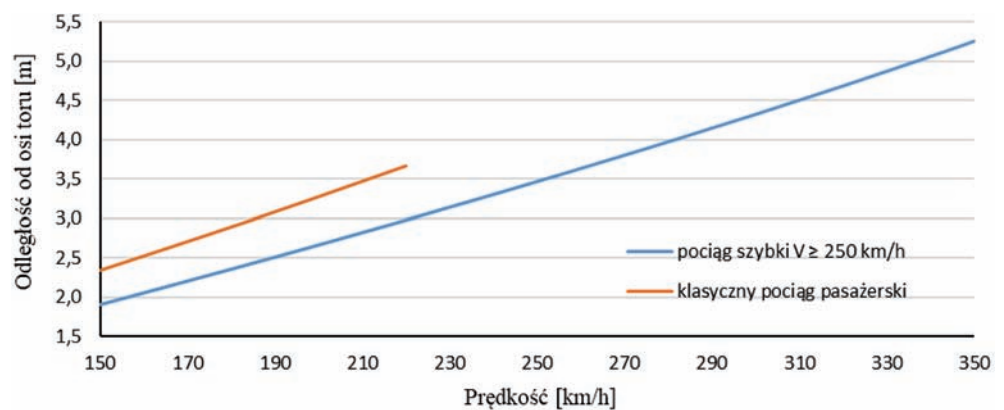
W celu porównania – w pierwszym przypadku otrzymano ciśnienie 400 Pa (zakładana połowa z 800 Pa) w odległości 2,5 m od osi toru, przy

Tablica 3

Odległość występowania ciśnienia 355 Pa dla różnych prędkości

V [km/h]	160	180	200	220	240	250	260	280	300	320	340	350
$p = 355 \text{ Pa}$ dla pociągów pasażerskich (klasycznych)												
Y [m]	2,52	2,90	3,28	3,67	–	–	–	–	–	–	–	–
$p = 355 \text{ Pa}$ dla pociągów dużych prędkości												
Y [m]	2,06	2,36	2,67	2,99	3,31	3,47	3,64	3,98	4,33	4,69	5,07	5,26

[Opracowanie własne].



Rys. 3. Występowanie ciśnienia 355 Pa dla pociągu szybkiego i klasycznego [opracowanie własne]

prędkości 250 km/h. Przy czym ta sytuacja dotyczy wielkości ciśnienia w otwartej przestrzeni. Natomiast dla przestrzeni zawierającej jakieś elementy stałe, dla tej samej prędkości 250 km/h i w odległości 2,5 m od osi toru ciśnienie obliczone za pomocą wzoru z części pierwszej [1] z p. 2.2. wyniesie 621 Pa. Obniżenie tych ciśnień do ciśnienia dopuszczalnego 355 Pa wystąpi: w pierwszym przypadku (otwartej przestrzeni) w odległości 2,68 m od osi toru (czyli około 1 m od skrajni kinematycznej taboru), a w drugim przypadku (przestrzeni zawierającej jakieś elementy stałe) – dopiero w odległości 3,47 m od osi toru (czyli około 1,8 m od skrajni kinematycznej taboru).

Na podstawie analiz można stwierdzić, że bardziej krytycznym (niebezpiecznym) zjawiskiem oddziaływania na organ słuchu jest sytuacja, w której pasażer lub pracownik znajduje się w terenie lub na peronie zawierającym jakieś elementy stałe. Wówczas – ze względu na działanie impulsowej fali ciśnienia – spodziewane ciśnienia są bardziej niekorzystne dla błony bębenkowej. W takim przypadku przy ustalaniu stref niebezpiecznych do przypisywania ludzi, należy przeprowadzać obliczenia według wzoru z p. 2.2 z części pierwszej [1].

Dla prędkości 300 km/h lub 350 km/h i obecności elementów stałych bezpieczna odległość od osi toru, po którym jedzie pociąg szybki, wynosi odpowiednio około 4,33 m lub 5,26 m. Na rysunku 4 pokazano strefy niebezpieczne ze względu na ewentualne uszkodzenia słuchu pasażerów oraz pracowników, dla prędkości pociągu szybkiego 350 km/h. Należy przy tym pamiętać, że otrzymane wartości zostały określone za pomocą wzorów teoretycznych, a nie na podstawie pomiarów. Zatem rzeczywiste wartości dla konkretnych typów pojazdów kolejowych mogą się różnić. Ponadto, z braku uregulowań normatywnych, jako kryterium szczytowego nieskorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego przyjęto wartość 145 dB (≈ 355 Pa) z uchylonej już wersji rozporządzenia dotyczącego szkodliwych dla zdrowia czynników w środowisku pracy.

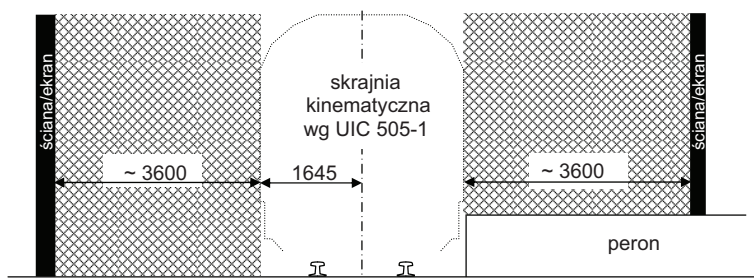
Z rysunku 4 wynika, że aby możliwe było przebywanie pasażerów lub pracowników pomiędzy pociągiem przejeżdżającym z prędkością 350 km/h a ścianą obiektu stałego, odległość od boku pociągu do

tego obiektu, powinna wynosić minimum 4 m (3,6 m dla spadku ciśnienia do wartości akceptowalnej plus przynajmniej niewielki obszar dla ludzi).

4. Oddziaływanie ciśnienia na pasażerów w pociągu

Kolejnym zagadnieniem wymagającym analizy jest oddziaływanie ciśnienia wytwarzanego przez pociąg szybki na pasażerów w pociągu konwencjonalnym. W tablicy 3 oraz na rysunku 3, zamieszczonych w części drugiej [2], pokazano wartości ciśnienia na ścianie bocznej mijanego pociągu, w zależności od prędkości V_1 pociągu szybkiego oraz szerokości międzytorza. W przypadku mijania się pociągu szybkiego z innym pociągiem na liniach o międzytorzu 4,5 m (przeznaczonych do ruchu z prędkością powyżej 300 km/h), na ścianie tego drugiego pociągu zostanie osiągnięte ciśnienie 355 Pa już przy prędkości około 212 km/h pociągu szybkiego. Oznacza to, że osoby siedzące lub stojące w pociągu tuż przy otwartym oknie (w pociągu klasycznym z wagonami starszego typu lub EZT starszej generacji), podczas mijania się z pociągiem szybkim jadącym z prędkością wyższą niż 212 km/h, będą narażone na działanie impulsowej fali ciśnienia znacznie przekraczającej 355 Pa. Dla międzytorza o szerokości 4,2 m (przeznaczonego do ruchu z prędkością powyżej 250 km/h do 300 km/h) szacunkowa wartość graniczna ciśnienia akustycznego zostanie osiągnięta już przy prędkości nieco powyżej 190 km/h, a dla międzytorza o szerokości 4,0 m (przeznaczonego do ruchu z prędkością powyżej 200 km/h do 250 km/h) szacunkowa wartość graniczna ciśnienia akustycznego zostanie osiągnięta już przy prędkości około 180 km/h.

W raporcie [4] przedstawiono wyniki badania oddziaływania ciśnienia przeprowadzone na torach o szerokości międzytorza 3,96 m (13 stóp) i przy użyciu elektrycznych zespołów trakcyjnych „Silverliners” o szerokości 3,035 m. W jednej z jazd, pociąg z czujnikami ciśnienia jechał z prędkością około 160 km/h (100 mph) i mijał się z pociągiem jadącym z prędkością około 220 km/h (138 mph).



Rys. 4. Strefa niebezpieczna dla słuchu w sąsiedztwie obiektów stałych przy $V = 350$ km/h [opracowanie własne]

Wówczas zarejestrowano piki ciśnienia o wartościach $+352/-469$ Pa. Wartości te są niższe, niż wartości uzyskane za pomocą obliczeń dla 220 km/h i międzytorza 4 m z tablicy 3 oraz rysunku 3, zamieszczonych w drugiej części [2] cyklu. Należy jednak przypomnieć, że są to wyniki uzyskane z jednej jazdy, natomiast jak wspomniano w części pierwszej [1] p. 2.1 do prawidłowego określenia ciśnienia wymagane jest przeprowadzenie serii co najmniej 10 jazd oraz obliczenie wartości średniej Δp_{sr} i odchylenia standardowego σ , na podstawie których określa się wartość średnią powiększoną o 2σ ($\Delta p_{95\%} = \Delta p_{sr} + 2\sigma$). Nie można zapominać, że obliczenia według normy PN-EN 14067-4 [21] prowadzono do zarysu skrajni kinematycznej taboru (1645 mm od osi toru), a przeciętne rzeczywiste szerokości polskich wagonów osobowych wynoszą do 2,88 m. Czyli rzeczywiste odległości pomiędzy pociągami będą nieco większe, a ciśnienia oddziaływania nieco mniejsze. Jedynie rzeczywiste badania na szlaku będą mogły zweryfikować uzyskane wartości teoretyczne, natomiast przytoczone tutaj badania amerykańskie pokazują wyraźnie, że już przy prędkości 220 km/h osiągnięto wartość dodatniego piku ciśnienia 352 Pa, czyli prawie równą wartość dopuszczalnej 355 Pa. Oznacza to, że dla międzytorza o szerokości 4,0 m, przeznaczonego do ruchu z prędkością maksymalną do 250 km/h, wartość ciśnienia akustycznego zostanie przekroczona już dla prędkości powyżej 220 km/h.

Uwzględniając przytoczone wyniki obliczeń według normy PN-EN 14067-4 [21] oraz wyniki badań amerykańskich według raportu [4], należy przedsięwziąć środki zaradcze, zapewniające ochronę pasażerów pociągów konwencjonalnych starszego typu – z otwieranymi oknami, przed powstawaniem fali ciśnienia o większej niż dopuszczalna amplitudzie. Może to być osiągnięte przez:

- zastosowanie wyraźnego oznakowania o zakazie stania w otwartym oknie;
- odpowiednie ułożenie rozkładu jazdy, tak aby podczas przejazdu pociągu szybkiego, tabor konwencjonalny był zatrzymany na stacjach, na torach niesąsiadujących z torem, po którym przejeżdża pociąg szybki;
- ograniczenie prędkości pociągu szybkiego do ok. $180 \div 210$ km/h (w zależności od szerokości międzytorza), podczas mijania się z pociągami konwencjonalnymi.

Jednakże najlepszym i najpewniejszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie na tej samej trasie, co pociągi szybkie, nowoczesnych klimatyzowanych wagonów z nieotwieralnymi oknami.

Podobne wnioski znalazły się w pracy [22], pomimo że jako prędkości pociągów szybkich rozpatrywano wówczas prędkość 200 km/h:

- „...w przypadkach, w których pociągi jadące z dużą szybkością muszą mijać pociągi osobowe rozwijające szybkość konwencjonalną (do 120 km/h), a również stojące na sąsiednim torze z wagonami nie przystosowanymi do dużych szybkości, pociąg jadący z dużą szybkością musi zwolnić tak, aby minąć pociąg konwencjonalny przy zwolnionej szybkości do 120 km/h.”;
- „Okna wagonów i same wagony w pociągach mijających się z pociągami jeżdżącymi z dużą szybkością powinny być szczelne. Otwieranie okien w pociągu, który mija pociąg jadący z dużą szybkością (160–200 km/h) powinno być uniemożliwione.”

5. Wnioski

Jedynym organem, który może być narażony na negatywne skutki oddziaływania ciśnienia wywołanego przejazdem pociągu jest organ słuchu. Powstała fala ciśnienia może być odczuwana jako uderzenie ciśnienia na błonę bębenkową i może spowodować niekorzystne skutki. Z wytwarzanych zmian ciśnienia należy uwzględnić przede wszystkim dodatnie wartości ciśnień (nadciśnienie), gdyż nie istnieją wystarczające dowody na szkodliwe działanie obniżonego ciśnienia (podciśnienia) związanego z przejazdem pociągu.

Dla przebiegu rzeczywistego, zarejestrowanego przy prędkości 200 km/h, powstała fala zmian ciśnienia miała częstotliwość około 8 Hz. Zatem jest to hałas infradźwiękowy. Ponieważ nie istnieją dopuszczalne wartości dla hałasu infradźwiękowego, rozważania zawarte w niniejszym artykule mają charakter informacyjny i mogą służyć jedynie jako wskazówki i zalecenia.

Przeprowadzone analizy wskazują, że niebezpieczeństwo szkodliwego oddziaływania ciśnienia na organ słuchu jest większe w przypadku, kiedy pasażer lub pracownik znajduje się w pobliżu stałej zabudowy pionowej (wiaty, poczekalnie, budki, ekrany dźwiękochłonne, płoty itp.), niż w przestrzeni bez żadnej zabudowy. Przy prędkości jazdy pociągu szybkiego 250 km/h oraz dla przyjętej w analizie, jako dopuszczalnej wartości maksymalnej szczytowego nieskorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego 145 dB (co odpowiada 355 Pa), strefa niebezpieczna dla przebywania ludzi w przestrzeni bez żadnej zabudowy wynosi 2,68 m od osi toru, tj. 1 m od krawędzi peronu, a w pobliżu stałej zabudowy pionowej – 3,47 m od osi toru, tj. 1,8 m od krawędzi peronu. Dla prędkości 350 km/h odległości te będą oczywiście większe. Dla zabudowy pionowej bezpieczna odległość wyniesie 5,26 m od osi toru, tj. około 3,6 m od krawędzi peronu (jak na rysunku 4), a uwzględniając miejsce

dla pasażerów, odległość od krawędzi peronu do tego obiektu powinna wynosić minimum 4 m. Strefa niebezpieczna na peronie, przy którym będą przejeżdżać pociągi szybkie bez zatrzymania, powinna być odpowiednio oznaczona, np. żółtą linią lub nawet barierkami i uzupełniona o tablice informacyjne.

W celu zapewnienia ochrony pasażerów podróżujących pociągami z otwieranymi oknami (pociągi konwencjonalne starszego typu), które mogą mijać się z pociągami dużych prędkości, należy zastosować wspomniane wcześniej odpowiednie środki zaradcze. Jednakże najlepszym rozwiązaniem powinno być wprowadzenie zasady, że na tej samej trasie, co pociągi szybkie, mogą kursować jedynie pociągi z nieotwieralnymi oknami, wyposażone w klimatyzację.

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.
- 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.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Outer_space (dostęp 30.01.2023 r.).
- Busby D.E.: *Clinical Space Medicine. A prospective look at medical problems from hazards of space operations*, NASA, July 1967, NASA-CR-856.
- Przestrzeń kosmiczna: https://pl.wikipedia.org/wiki/Przestrze%C5%84_kosmiczna (dostęp 30.01.2023 r.).
- Człowiek, który przeżył w próżni – jak to naprawdę wygląda?: <https://www.crazy.nauka.pl/czlowiek-ktory-przezyl-w-prozni-jak-to-naprawde-wyglada/> (dostęp 30.01.2023 r.).
- Co się stanie z człowiekiem przebywającym w próżni kosmicznej bez kombinezonu?: <https://m51.pl/astronautyka/co-sie-stanie-z-czlowiekiem-przebywajacym-w-prozni-kosmicznej-bez-kombinezonu> (dostęp 30.01.2023 r.).
- Próżnia: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%B3żnia> (dostęp 30.01.2023 r.).
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U., 2018, poz. 1286.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U., 2002, nr 217, poz. 1833.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 czerwca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U., 2009, nr 105, poz. 873.
- PN-Z-01338:2010: Akustyka – Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- PN-ISO 10843:2002: Akustyka – Metody opisu i pomiaru pojedynczych impulsów lub serii impulsów.
- Beranek L., Ver I.: *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- Harris C.: *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control* [Editor-in-Chief], New York: McGraw-Hill, Inc., 1991.
- PN-N-01307:1994: Hałas – Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.
- 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.
- Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- PN-EN 14067-4+A1:2019-03: Kolejnictwo – Aerodynamika – Część 4: Wymagania i procedury badań aerodynamicznych na szlaku.
- 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.