

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Gąsowski
mgr inż. Krzysztof Bieliński
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Niekorzystne oddziaływanie tunelu na pasażerów pociągu (2)

W pracy przedstawiono wzrost natężenia hałasu i drgań podczas przejazdu przez tunel pociągu dużej prędkości. Nasilenie obydwu tych zjawisk spowodowane jest ograniczeniem przez tunel przestrzeni napełnionej powietrzem. Przedstawiono także ogólną charakterystykę tych zjawisk oraz ukazano możliwości przeciwdziałania ich szkodliwym wpływom, zarówno od strony pojazdu szynowego, jak i elementów składowych tunelu.

1. Wstęp

Szkodliwe oddziaływanie na ludzi oraz obiekty inżynierne hałasu i drgań emitowanych przez środki transportu – w tym pociągi – zauważono wiele lat temu. Znaczne zwiększenie prędkości jazdy pociągów pasażerskich w ostatnich kilkunastu latach nasiliło te niekorzystne zjawiska. W kilku krajach, szczególnie w Niemczech, Francji i Japonii, intensywnie pracuje się nad tymi problemami. W Polsce również te zagadnienia zaczęły być doceniane i stały się przedmiotem badań [1, 8, 10].

Niniejszy artykuł jest kontynuacją pracy [3], w której przedstawiono charakterystyczny rozkład ciśnienia w tunelu spowodowany przez przejazd przez niego z dużą prędkością pociągu pasażerskiego. W tej części pracy przedstawiono wzrost natężenia hałasu i drgań wywołanych przez pociąg dużej prędkości przejeżdżający przez tunel kolejowy.

2. Hałas w tunelu

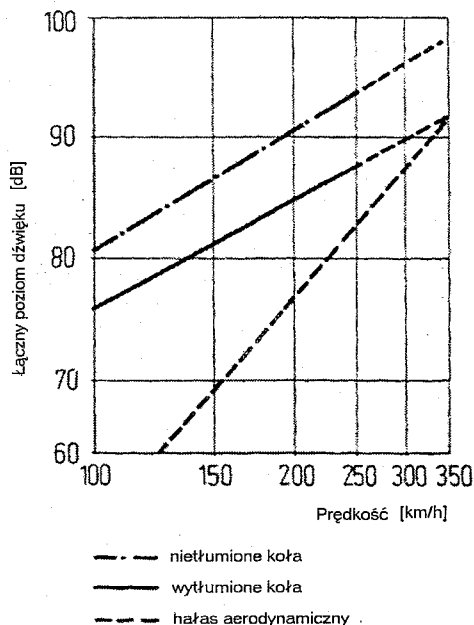
2.1. Źródła zjawiska

Słyszalny przez pasażera hałas podczas jazdy pociągu, zarówno na wolnym torze jak i w tunelu, jest emitowany jednocześnie przez dwa źródła:

- źródło mechaniczne – hałas wynikający z oddziaływań w układzie koło – szyna oraz innych układów trybologicznych,
- źródło aerodynamiczne – hałas wynikający z opływu poszczególnych pojazdów tworzących pociąg oraz z przepływu gazu lub cieczy w różnego rodzaju przewodach.

Jest więc wiele miejsc w konstrukcji pojazdów szynowych i złożonych z nich pociągów, które mogą być ośrodka-

mi powstawania hałasu. Badania wykazały [4], iż hałas wynikający z kontaktu między kołem i szyną, emitowany poprzez tarczę koła, jest głównym źródłem hałasu powodowanego przez pociąg co najmniej w przedziale prędkości do 250 km/h. Przy większych prędkościach (rys. 1) również dużym staje się hałas wytwarzany przez przepływ powietrza wokół pojazdu (hałas aerodynamiczny).



Rys. 1. Całkowity poziom dźwięku zależny od prędkości jazdy wg Krupp, sprawozdanie KI-ST 1214 [4]

2.2. Hałas aerodynamiczny

Burzliwy strumień powietrza, przemieszczający się wzdłuż powierzchni ciała stałego, generuje falę dźwiękową, która powstaje wskutek uderzeń wirów o powierzchnię tego ciała. W ten sposób powstaje dźwięk, który nazwano powierzchniowym hałasem aerodynamicznym. Powstaje on również w burzliwej warstwie przyściennej, która tworzy się w strumieniu gazu bezpośrednio przy powierzchni opływającego ciała. Moc akustyczna hałasu zależy od prędkości strumienia w ósmej potęgze. Dlatego natężenie powierzchniowego hałasu aerodynamicznego osiąga znaczące wartości dopiero przy dużych prędkościach przepływającego czynnika.

Źródłem pierwotnego dźwięku aerodynamicznego są zawirowania powietrza powstające na wszystkich opływających elementach pudła pojazdu, takich jak:

- wywietrzniki,
- listwy,
- uchwyty drzwi,
- szyny dachowe,
- wszystkie elementy wózka,
- odbieraki prądu.

Dąży się więc do ograniczenia liczby ostrych krawędzi nie tylko w celu zmniejszenia oporów, ale także, aby nie zakłócać spokoju pasażerom i ludziom w pobliżu trasy przejazdu pociągu. Nie wszystkie jednak elementy mogą być gładkie. Należą do nich wózki wraz z ich częściami składo-

wymi. Problem ten można złagodzić, wprowadzając deflektory aerodynamiczne zmniejszające opór.

Za jedną z przyczyn hałasu opływu uważany jest przepływ turbulentny przy wycięciach na dachu lokomotywy w obrębie odbieraka prądu. W myśl tego w pociągach dużej prędkości stosuje się jeden zamiast kilku pantografów. Umieszcza się go na tylnej lokomotywie, a do przedniej lokomotywy prąd doprowadzany jest przewodem. Aby jeszcze bardziej ograniczyć hałas, przeprojektowano pantografy w pociągach TGV nowej generacji, zmniejszając liczbę ich krawędzi. Koleje japońskie natomiast w swoich pociągach dużej prędkości obudowują pantografy kominami aerodynamicznymi [4]. Według pomiarów modelowych przedniego odbieraka prądu w stanie opuszczonym i podniesionym stwierdzono jednak, iż nadal główne źródło hałasu opływu znajduje się przy pojeździe, czyli ścianach bocznych i wózkach pojazdów.

Wolny szlak pozwala na swobodne rozchodzenie się fal dźwiękowych. Wewnątrz tunelu powstający dźwięk wielokrotnie odbija się o jego ściany. Dlatego też musimy liczyć się z wyższym poziomem hałasu. Ponadto w tunelu charakteryzują go inne warunki oddziaływania i rozchodzenia się. W skutek interferencji fal dźwiękowych dochodzić może do wzrostu poziomu emitowanego dźwięku. Ze względu na ten czynnik, należy podkreślić ważność zapewnienia odpowiedniej szczelności pojazdów dużej prędkości.

Hałas wytwarzany przez pociąg przejeżdżający po torze na otwartym terenie oddziałuje przede wszystkim na otaczające obiekty, a w mniejszym stopniu na pasażerów wagonów. Oddziaływanie hałasu w tunelu jest mniej uciążliwe dla otoczenia, wskutek tłumiącego działania gruntu znajdującego się wokół konstrukcji „rury” tunelu. Jest on natomiast o wiele silniej odczuwany przez pasażerów wagonów i obsługę pociągu. W wagonie, w chwili gdy wjechał on do tunelu, odczuwa się wyraźny szum dochodzący z zewnątrz przez okna i ściany. Nie odczuwa się natomiast wzrostu poziomu hałasu przenikającego bezpośrednio do wagonu z obszaru podwozia.

Hałas aerodynamiczny ma bardzo duży wpływ na ogólny poziom emitowanego do środowiska hałasu uciążliwego dla człowieka. Szczególnie wysoki poziom hałasu w tunelu w porównaniu z otwartą przestrzenią może wynosić ponad 10%. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów poziomu hałasu w wagonie 1 klasy z przedziałami typu Avmz 111, wagonu o dużej pojemności typu Apmz 122 oraz wagonu 2 klasy typu Bpmz 291 przeprowadzone przez koleje niemieckie [1].

Tabela 1

Poziom hałasu wewnątrz wagonów pasażerskich podczas jazdy z prędkością $v = 200$ km/h na wolnym szlaku i w tunelu [6]

Rodzaj wagonu	Zmierzony poziom hałasu w dB(A)		Wartości graniczne w dB(A)	
	Na wolnym szlaku	W tunelu	Na wolnym szlaku	W tunelu
Avmz 111	63	70	65	70
Apmz 122	66	73	65	70
Bpmz 291	67	74	68	73

2.3. Hałas układu koło – szyna

Hałas w tunelu, wytwarzany przez układ koło – szyna przenika do przedziałów dla podróżnych, kabiny maszynisty, itd. dwiema drogami:

- przez zestawy kołowe, konstrukcję wózka, czopy skreću na konstrukcję wagonu, głównie podłogę, wprawiając je w drgania wytwarzające hałas wewnątrz wagonu,
- rozchodzący się poziomo hałas zostaje odbity od ścian tunelu i oddziałuje na ściany boczne, okna, sufit nadwozia wagonu (wprawia je w drgania) i przenika do wnętrza przedziału.

Metody minimalizacji zjawiska powinny polegać na jak największym ograniczeniu hałasu toczenia pochodzącego od układu koło – szyna. Środkiem zaradczym może być zastosowanie nawierzchni toru o odpowiedniej absorpcji dźwięku lub wyłożenie torowiska matami z materiału absorbującego. Maty te powinny zapewnić pochłanianie dźwięków emitowanych przez układ koło – szyna w kierunku torowiska i odbijających się od niego w kierunku podwozia pojazdu. Można również zastosować niską ścianę dźwiękoizolacyjną wraz z osłonami podwozia utrudniającą emisję hałasu w stronę ścian tunelu.

2.4. Efekt „sonic boom”

Niekiedy wskazana jest budowa nowego, jednotorowego tunelu. Przyczyny mogą leżeć w geologii lub w zaplanowanym eksploatacji tunelu (względny bezpieczeństwa). Przekrój poprzeczny tunelu jednotorowego jest znacznie mniejszy od tunelu dwutorowego. Z tego względu przejazdowi przez taki tunel towarzyszą intensywniejsze oddziaływania aerodynamiczne. Wjazd pociągu w jednotorowy tunel jest powodem fali ciśnieniowej słyszalnej przy końcu tunelu jako głośny huk (efekt „sonic boom”). Połączony jest on ze wstrząsem leżących w pobliżu budynków. Gdy tunel ma większą długość od kilometra, a podłoże toru i ściany tunelu posiadają małe tłumienie, to wtedy na drodze przez tunel może dojść do wzrostu gradientu ciśnienia fali ciśnieniowej i wskutek tego można uzyskać przy portalu wyjściowym powyższe zjawisko. Efekt ten do dziś dorósł do rangi problemu tylko w tunelach japońskich. Wzrasta on, wg japońskich doświadczeń, z trzecią potęgą prędkości jazdy i występuje przede wszystkim w tunelach średniej długości. Aby zapanować nad efektem „sonic boom” proponuje się następujące sposoby przeciwdziałania:

- spłaszczenie budowy wlotu tunelu wokół wywołanej fali ciśnienia,
- instalacje tunelowe zdadne do odbicia fal ciśnienia,
- formowanie smukłych kształtów czoł krańcowych pojazdów pociągu.

Z pomocą przychodzi także różnego rodzaju występy tunelowe. Występy, standardowe dla kolei Tokaido w odległości 20 m od wyjściowego portalu tunelu, o długości 10 m z powierzchnią przekroju poprzecznego 100 m² i bocznymi rowkami dla wyjścia powietrza o przekroju od 7 do 10 m², mogłyby zmniejszyć działanie fali ciśnienia w 25%. Ponieważ zakłócenie przy końcu tunelu znajduje się w bezpośrednim związku z ciśnieniem przy wjeździe pociągu, można przyjąć, że przy mniejszych przekrojach poprzecznych pojazdu, a zwłaszcza przy torze z tłucznią, efekt „sonic boom” zupełnie nie dochodzi do skutku [2].

2.5. Tłumienie hałasu w tunelu

Znając drogi przenikania hałasu do wnętrza pojazdu można opracować środki zapobiegawcze. Jednym ze środków zmniejszających wpływ hałasu od toru na otoczenie i pasażerów są maty dźwiękochłonne Rockwool’a układane bezpośrednio pod główną warstwą tłucznia. Ten sposób okazał się stosunkowo tani, a także przydatny z uwagi na nieorganiczne pochodzenie materiału tłumiącego. Rockwool jest materiałem włóknistym produkowanym z kamienia, który jest mielony i skręcany na wełnę. Ściskając tę wełnę do różnych gęstości otrzymuje się wiele produktów nadających się do zastosowania jako izolacja cieplno-dźwiękowa.

Koleje norweskie (NSB) zastosowały segmenty Rockwool w jednym z torów biegnących w nowo otwartym tunelu na modernizowanej linii Oslo – Halden. Segmenty wełny Rockwool grubości 75 mm i gęstości 190–200 kg/m³ ułożono na dokładnie wyrównanym podłożu z drobnego szutru i na nim ułożono zasadniczą podsypkę. Próby wykazały osłabienie dźwięku o 8–12 dB, nawet przy wytworzonym największym możliwym hałasie i przy maksymalnym ugięciu szyny (ok. 2 mm) pod pociągiem. Poza matami, wełna Rockwool’a została użyta pod tłuczniem do wyłożenia wnętrza tunelu w pobliżu jego wylotów, w celu wy tłumienia efektu „sonic boom”, powstającego przy wyjeździe pociągu z tunelu. Po zamontowaniu segmentów wełny u wylotów, zmiany ciśnienia powietrza stały się bardziej równomierne, a poziom hałasu został obniżony.

Zastosować można również niską ścianę dźwiękoizolacyjną wraz z osłonami podwozia utrudniającą emisję hałasu w stronę ścian tunelu. Przy nie uzyskaniu wymaganych parametrów akustycznych można pokryć ściany tunelu materiałem absorbującym hałas w postaci wykładzin lub past gładzących. Materiały te nie są narażone na bezpośrednie oddziaływanie warunków atmosferycznych, dlatego grupa możliwych do zastosowania materiałów jest szeroka [6].

Hałas aerodynamiczny w znaczny sposób można także ograniczyć poprzez odpowiednie projektowanie nadwozi i podwozi pojazdów. Kształt czoła pojazdu napędzonego ma wpływ na występujące prędkości powietrza przy ścianach bocznych, które są przyczyną hałasu opływu powietrza, zwłaszcza poprzez swe części strukturalne, takie jak, np.: uchwyty hamulcowe [3]. Środkami do osiągnięcia niskiego poziomu hałasu w pociągach są także, obok tłumików dźwięku i izolacji dźwiękowej, różnego rodzaju realizacje korzystne pod względem przepływu powietrza czy chociażby szerokie, nie wystające na zewnątrz okna wagonów lub pojazdów trakcyjnych.

3. Drgania pociągu

Drgania, pojawiające się w pojazdach szynowych, mogą wywierać ujemny wpływ na pasażerów i drużynę trakcyjną, powodując pogorszenie samopoczucia i zmniejszenie zdolności do pracy. Mają one różnorodny i wielostronny wpływ na funkcje fizjologiczne i układy organizmu ludzkiego, w tym na słuch, wzrok, układ nerwowo-mięśniowy i układ krążenia. Obniżenie ogólnego poziomu drgań jest wymagane z punktu widzenia narażenia organizmu człowieka i powinno być realizowane w zależności od częstości drgań, ponieważ istnieją takie obszary częstości, na które człowiek jest szczególnie wrażliwy.

Analizowany przez wielu badaczy problem oddziaływania drgań na organizm ludzki pokazuje, że drgania w granicach 4–8 Hz są bardzo szkodliwe dla wewnętrznych organów człowieka. Informacja przysyłana przez receptory do mózgu pod wpływem drgań okazuje się zafałszowana, dezorientująca, a w niektórych warunkach rozdrażniająca i wywołująca stan chorobowy człowieka. Siły i przemieszczenia wywołane drganiami są odczuwalne przez dużą liczbę małych receptorów mechanicznych w całym organizmie. Przy przenoszeniu drgań, od miejsca przyłożenia do receptorów w ludzkim ciele, niektóre pasma częstotliwości osłabiają się, a inne wzmacniają [4].

Najbardziej szkodliwym rodzajem drgań dla komfortu jazdy są właśnie drgania o niskiej częstotliwości. Oprócz nich podczas wjazdu pociągu w tunel inspirowane są dodatkowo drgania wzdłużne poprzez uderzenie ciśnienia. Zależą one od masy pojazdu, właściwości sprężystych i tłumiących łączy wzdłużnych poszczególnych składowych pojazdu. W zależności od długości pojazdu powstają nierównomierne ruchy, a w niektórych pociągach nawet ruchy częściowo przeciwna. W związku z powyższym powstają dodatkowe obciążenia, które należy wziąć pod uwagę już podczas fazy projektowania pojazdów szynowych, a które muszą zostać przeniesione przez układy usprężynowania i łączenia. Pojawiające się przy tym wartości obciążeń są jednak niższe od tych, które tworzą się przy pełnym hamowaniu.

Powstałe przy wjeździe do tunelu drgania wzdłużne zwiększają wartość parametru nazwanego współczynnikiem spokojności biegu, którego wartości muszą być zachowane dla poszczególnych klas pojazdów. Obliczony analitycznie współczynnik porównuje się ze standardową skalą ocen, na podstawie której wnioskuje się o właściwościach biegowych pojazdu lub wagonu. Dopuszczalne końcowe wartości wskaźnika spokojności jazdy dla poszczególnych rodzajów pojazdów przedstawia tabela 2.

Tabela 2

Dopuszczalne wartości wskaźnika spokojności jazdy W_z [7]

Wartość wskaźnika W_z	Ocena spokojności jazdy
2,0	Bardzo dobre
2,0 ÷ 2,5	Dobra
2,5 ÷ 3,0	Wystarczająca dla wagonów osobowych
3,0 ÷ 3,25	Graniczna dla wagonów osobowych
3,25 ÷ 3,5	Wystarczająca dla lokomotyw
3,5 ÷ 3,75	Graniczna dla lokomotyw
3,6 ÷ 4,0	Wystarczająca dla wagonów towarowych
4,0 ÷ 4,25	Graniczna dla wagonów towarowych
4,5	Graniczna dla człowieka ze względów fizjologicznych
5,0	Niebezpieczeństwo dla ruchu, niebezpieczeństwo wykolejenia

4. Zakończenie

Problemy i zjawiska towarzyszące przejazdowi pociągu przez tunel, przedstawione w dwóch częściach artykułu, wykazały, iż każdy z nich w większy lub mniejszy sposób wpływa na komfort jazdy pasażerów. Ciśnienie, hałas i drgania są tymi czynnikami, które podróżni odczuwają najbardziej. Znając przyczyny powstawania i drogi propagacji tych zjawisk możemy skutecznie im przeciwdziałać, aby zwiększyć komfort jazdy podróżnych. Dlatego wydaje się sensowne uważać oraz optymalizować tunel i pojazd jako system. Należy także wziąć pod uwagę fakt, że wybudowane tunele będą obsługiwały pociągi jeżdżące nie tylko w czasach obecnych, ale również te, które będą skonstruowane i eksploatowane w przyszłości.

W kraju istnieje ponad 20 tuneli kolejowych. W przyszłości wiele z nich będzie modernizowanych oraz przystosowywanych do przejazdów pociągów o podwyższonej prędkości. Była to zasadnicza przyczyna podjęcia tej tematyki.

LITERATURA

- [1] Gąsowski W., *Aerodynamika pociągu, ITE, Radom 1998.*
- [2] Gąsowski W., Kuczma T., *Sposoby zmniejszenia hałasu wywołanego ruchem pociągu stosowane w budowie dróg kolejowych i ich otoczeniu. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Pojazdy, nr 47/97.*
- [3] Gąsowski W., Bieliński K., *Niekorzystne oddziaływanie tunelu na pasażerów pociągu. Pojazdy Szynowe, nr 4/2000.*
- [4] Glöckle H., *Tunnelaerodynamik im Hochgeschwindigkeitsverkehr, ETR 1996, nr. 9, s. 563-566.*
- [5] Glück H., *Aerodynamik der Schienenfahrzeuge, TÜV Rheinland GmbH, Köln 1985.*
- [6] Kellerman C., Hölzl G., *Schalldämmung in Reisezugwagen für den Schenellverkehr auf NBS. ETR 36 (1987) H.12.*
- [7] Marciniak J., *Ocena narażenia organizmu człowieka na drgania podczas jazdy wagonem kolejowym, Przegląd kolejowy 1999, nr 3, s. 14.*
- [8] Nader M., *Investigation of noise in the field of rail transport. Archives of Transport, vol. 12, iss. 3, Warsaw 2000.*
- [9] Raoul J.C., *Coraz więcej szybkich pociągów, Świat nauki 1997, nr 12, s. 68-74.*
- [10] Szukajło P., Pawlaczek A., *Analiza i ocena hałasu w transporcie szynowym, Praca dyplomowa, Politechnika Poznańska, Poznań 1999.*