

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

## Niekorzystne oddziaływanie tunelu na pasażerów pociągu (1)

Przejazd pociągów dużej prędkości przez tunele wywołuje w nich charakterystyczny rozkład ciśnień, a także powoduje wzrost natężenia hałasu i drgań pojazdu szynowego. W artykule omówiono wpływ pierwszego z wymienionych czynników na pasażerów pociągu, wynikającego z ograniczenia przestrzeni wokół pojazdu. Przedstawiono ogólny rozkład ciśnień występujących wokół pojazdu i w samym pojeździe podczas jego przejazdu przez budowlę tunelową. Omówiono również specyfikę oddziaływania ciśnienia na pasażera.

### 1. Wstęp

Główną tendencją rozwojową kolei europejskich w przewozach pasażerskich jest maksymalne zmniejszenie czasów podróży przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednio wysokiego poziomu komfortu jazdy. Maksymalna prędkość jazdy pociągów przekracza już 300 km/h. Wymusza ona dodatkowe ograniczenia dotyczące promieni łuków stosowanych na szlakach kolejowych, które są ściśle związane ze stosowanym pochyleniem toru. Tym samym nie można dowolnie poprowadzić planowanych linii kolejowych, omijając niekorzystną rzeźbę terenu, lecz należy korzystać do jej pokonania z dodatkowych obiektów inżynierskich. Głównymi z nich są tunele. Przejazdowi pociągu w specyficznych warunkach ograniczonej przestrzeni, jaką jest tunel, towarzyszą niekorzystne oddziaływania na pasażerów takich czynników jak:

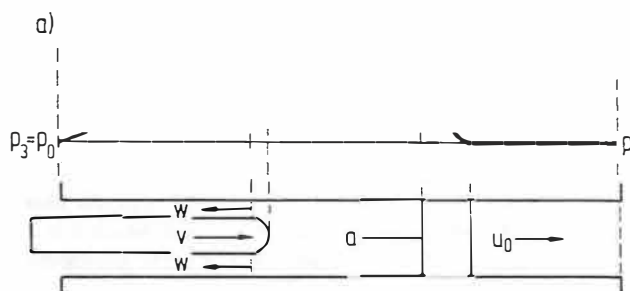
- gwałtowna zmiana ciśnienia wewnątrz pojazdu,
- wzrost natężenia hałasu,
- zmniejszenie spokojności biegu pociągu.

### 2. Zmiany ciśnienia

#### 2.1. Zmiany ciśnienia wewnątrz tunelu

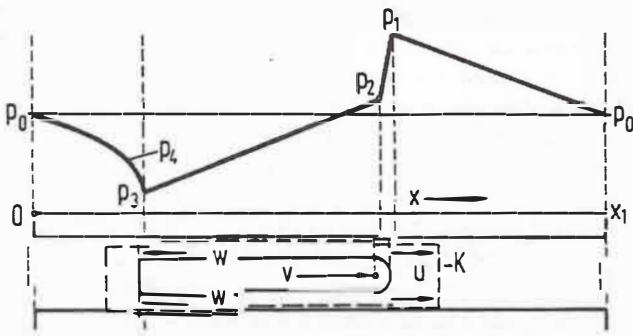
Jadący z dużą prędkością pociąg, wjeżdżając do tunelu, powoduje w nim nagły wzrost ciśnienia, tzw. falę ciśnieniową. Przed czołem pociągu tworzy się obszar nadciśnienia. W

miarę dalszego wgłębiania się czoła pojazdu, nadciśnienie wzdłuż pociągu sukcesywnie spada z wartości  $p_1$  do wartości  $p_0$ . W długim tunelu w momencie wjazdu końca pociągu obserwuje się taką sytuację, gdzie na czole pierwszego pojazdu występuje maksymalne nadciśnienie, a na ostatnim pojeździe ciśnienie równe jest ciśnieniu atmosferycznemu  $p_0$  (rys. 1).

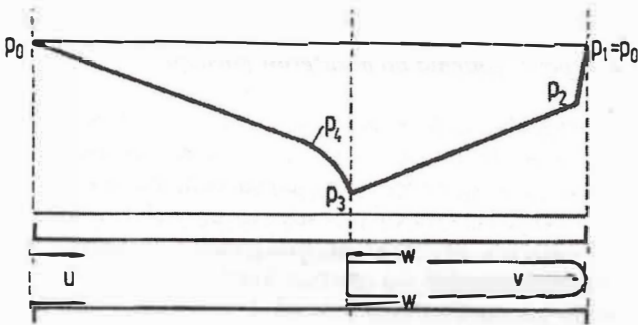


Rys. 1. Rozkład ciśnienia w tunelu – wjazd końca pociągu [3]

Wjeżdżając w głąb tunelu, ciśnienie wzdłuż pociągu zaczyna przechodzić z obszaru nadciśnienia na początku pojazdu do obszaru podciśnienia w jego dalszej części (rys. 2), aż do momentu wyjazdu pociągu, gdzie praktycznie cały pociąg objęty jest obszarem podciśnienia (rys. 3).



Rys. 2. Rozkład ciśnienia w tunelu – pociąg w środku tunelu [3]



Rys. 3. Rozkład ciśnienia w tunelu – wyjazd czoła pociągu [3]

W ostatniej fazie przejazdu pociągu przez tunel, każdy wyjeżdżający punkt pojazdu przechodzi z obszaru podciśnienia do istniejącego na zewnątrz ciśnienia otoczenia.

Wynika stąd, iż tak częste wahania ciśnienia nie mogą pozytywnie wpływać na obsługę i pasażerów pociągu, który nie jest obiektem idealnie szczelnym, ani na samą konstrukcję pojazdu szynowego, co musi zostać uwzględnione już podczas procesu projektowania zarówno pojazdu jak i tunelu.

Dopuszczalne obciążenie pojazdu i znośne zmiany ciśnienia wewnątrz wagonów wywierają główny wpływ na dobór przekroju poprzecznego tunelu. Maksymalne wartości nad i podciśnienia można kształtować właśnie poprzez zmianę pola przekroju poprzecznego portalu wjazdowego. Przy określaniu przekroju poprzecznego tunelu dla pojazdu dużej prędkości brane są także pod uwagę zjawiska aerodynamiczne w nim występujące. Do interpretacji przekroju poprzecznego tunelu służy karta UIC 778-11 „Wymiar przekroju poprzecznego tunelu z uwzględnieniem efektów aerodynamicznych”. Karta ta służy dla pojazdów zabezpieczonych przed ciśnieniem, tzn. pojazdów o dużej szczelności. Gdy używa się granicznych wartości komfortu jazdy kolei brytyjskich, które są względnie wysokie, przekrój poprzeczny tunelu dla prędkości pojazdu 300 km/h wynosi około 130 m<sup>2</sup>. To ukazuje, dlaczego dla tak wysokich prędkości jazdy należy używać pojazdów o dużej szczelności, ażeby dojść do opłacalnych przekrojów poprzecznych tuneli.

## 2.2. Szczelność pojazdu

Wnętrze pojazdu i znajdujących się w nim pasażerów trudno jest skutecznie odseparować od wpływu czynników zewnętrznych takich jak ciśnienie. Z interpretacji w podpunkcie 2.1 wynika, że pociągi poruszające się na szlakach z dużą liczbą tuneli muszą być wyjątkowo szczelne. Do okre-

ślenia szczelności w praktyce wykorzystuje się tzw. stopień szczelności. Określa się go stosunkiem największej różnicy ciśnienia na zewnętrznej bocznej powierzchni wagonu  $\Delta p_z$ , jaka wystąpi podczas przejazdu przez tunel, do maksymalnej zmiany ciśnienia statycznego  $\Delta p_w$  wewnątrz wagonu. Stosunek  $\Delta p_w / \Delta p_z$  wskazuje stopień szczelności wagonu. W przypadku idealnej szczelności  $\Delta p_w / \Delta p_z = 0$ , w przypadku wagonów nieszczelnych  $\Delta p_w / \Delta p_z \approx 1$  [1].

Stopień nieszczelności można wyrazić jeszcze w inny sposób. Przy objętości pojazdu  $V$ , prędkości  $v$  napływającego powietrza i ciśnieniu zewnętrznym  $p_a$ , przekrój poprzeczny nieszczelności  $S$  przy przepływie izotermicznym wynosi

$$-\frac{1}{p_a} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \cdot v \quad (1)$$

gdzie:

- $p_a$  – ciśnienie atmosferyczne [N/m<sup>2</sup>],
- $S$  – przekrój poprzeczny nieszczelności w [cm<sup>2</sup>],
- $V$  – objętość pojazdu w [m<sup>3</sup>],
- $\frac{dp}{dt}$  – przyrost ciśnienia w pociągu [N/m<sup>2</sup>],
- $v$  – prędkość napływającego powietrza [m/s].

Jeśli przyjąć  $\rho = \text{constans}$ , wzór ten przyjmuje postać

$$\sqrt{g} \cdot (\sqrt{p_o} - \sqrt{p}) = 2 \frac{S}{V} \cdot t \quad (2)$$

gdzie:

- $g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],
- $p_o$  – ciśnienie atmosferyczne [N/m<sup>2</sup>],
- $p$  – ciśnienie w pociągu [N/m<sup>2</sup>].

Zmiana ciśnienia odpowiadająca stopniowi nieszczelności

$2 \frac{S}{V} \cong 1$  uchodzi jako nie przeszkadzająca, zaś stopień nie-

szczelności o wartości  $2 \frac{S}{V} \cong 2$  już jako niemiły.

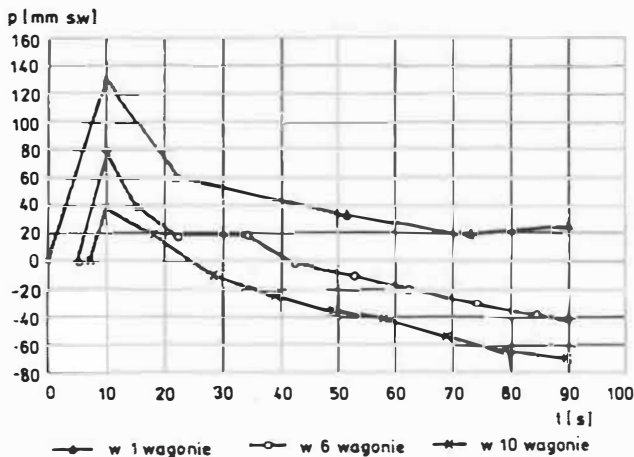
## 2.3. Zmiany ciśnienia w pojeździe

Nieszczelny pociąg i różne od atmosferycznych wartości ciśnienie wokół pociągu znajdującego się w tunelu generują zmiany ciśnienia wewnątrz samego pojazdu. Standardy komfortu dotyczące zmian ciśnień wewnątrz wagonów różnych kolei zawarte są w wyżej wspomnianej karcie UIC. Międzynarodowe, akceptowalne kryterium komfortu wobec zmian ciśnienia w pojeździe jeszcze nie istnieje. Koleje japońskie przeprowadziły badania szczelności wagonów pociągu, składającego się z dwunastu wagonów, wjeżdżających do tunelu z prędkością 80 km/h. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 4.

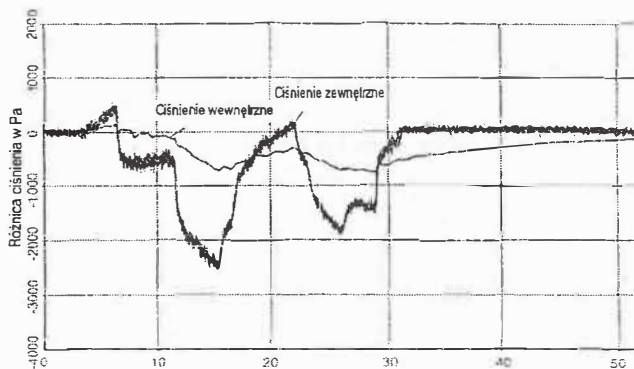
Wartość zmiany ciśnienia – przy danej prędkości – zależy od usytuowania wagonu w składzie pociągu. W czołowym wagonie występuje duży wzrost ciśnienia w chwili wjazdu pociągu do tunelu. W czasie dalszej jazdy ciśnienie w wago-

nach zmienia się w zależności od położenia pociągu w tunelu. W dalszych wagonach ciśnienie względne zmienia znak. Podczas wyjazdu pociągu z tunelu w ostatnich wagonach odczuwa się w uszach nieprzyjemną różnicę ciśnień [1].

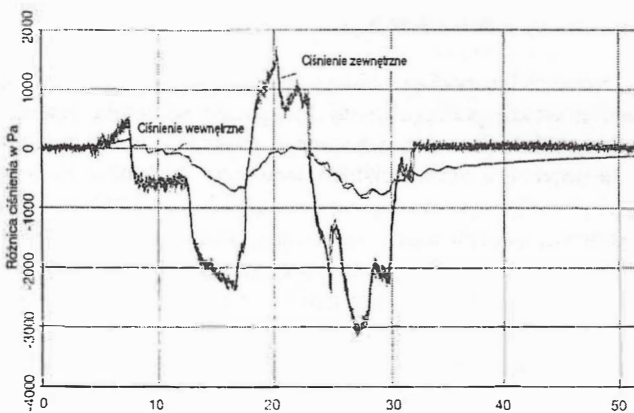
W pojazdach wysokiego przedziału komfortu (dużej szczelności), tak jak jest to realizowane w pociągach ICE, napotyka się bardzo niewielkie wahania ciśnienia (rys. 5 i 6).



Rys. 4. Zmiany ciśnienia wewnątrz wagonów w dwunastowagonowym pociągu [1]



Rys. 5. Przejazd pojedynczy w tunelu Sinnerg, przebieg ciśnienia przy siódmym wagonie ICE, prędkość pociągu  $V_{ICE} = 280$  km/h [2]



Rys. 6. Przejazd ze spotkaniem się pociągów w tunelu Sinnerg, przebieg ciśnienia przy siódmym wagonie pociągu ICE, prędkość pociągu  $V_{ICE} = 280$  km/h [2]

Przy projektowaniu pudła pojazdów DB AG wychodzi się z założenia, że ciśnienie wewnętrzne pozostaje stałe, a pudła wagonów muszą wytrzymać różnicę zewnętrznych wahań ciśnienia. Gdy przyrzeć się nowemu konstruowaniu pojazdów w Japonii, to stałe ciśnienie wewnętrzne utrzymywane jest w znacznym stopniu dzięki systemom aktywnym. Hermetycznie zamyka się pociąg, a ciśnieniem steruje się wewnątrz pociągu. Problem redukuje się do związku pomiędzy przekrojem poprzecznym tunelu, prędkością pojazdu, kształtem pojazdu i dozwolonym naprężeniem pudła wagonu. Związek między naprężeniem pudła wagonu, grubością ściany pojazdu i ciężarem pojazdu był istotnym elementem przy projektowaniu pociągu ICE-2.

#### 2.4. Wpływ ciśnienia na pasażerów pociągu

Szeregi badań kolei brytyjskich BR, przy których amplituda, kształt fal (sinusoidalna lub trójkątna, jednokrotna lub powtarzająca się) i częstotliwość zmieniały się, wykazały, że amplituda zmian ciśnienia ma największy wpływ na odczucia ucha pasażera. Jako wartość maksymalną podaje się przez koleje brytyjskie BR dla „granicy komfortu” zmianę ciśnienia  $3 \text{ kN/m}^2$  w czasie trzech sekund. Przy tym pozwala się na powtórzenie cyklu obciążenia w stosownym odstępie czasu. Przy powtarzającym się obciążeniu, na przykład w tunelu z połączeniami poprzecznymi, granice te muszą zostać zmniejszone [3].

Pierwsza nagła zmiana ciśnienia przy wjeździe pociągu do tunelu przyjmowana jest przez pasażerów w różnoraki sposób. Gdy błona bębenkowa znajduje się w wymuszonym wygięciu do wewnątrz, co jest nienaturalne w normalnym życiu, nie znosi się dobrze zwrotów ciśnienia. Jeśli tunel jest odpowiednio długi, to następuje powrót do niskiego ciśnienia w jamie bębenkowej poprzez ujście powietrza w trąbę usznej lub poprzez otwarcie trąbki usznej przy połykaniu. Odbywa to się zazwyczaj w odcinku tunelu z niskim ciśnieniem chwilowym. Następnie średnie ciśnienie w tunelu powoli wzrasta, aż do nagłego wzrostu przy końcu tunelu. Ten nagły ponowny skok ciśnienia przy portalu wyjazdowym jest bardziej uciążliwy niż zakłócenia przy początku tunelu, gdzie większość błon bębenkowych znajduje się w naturalnym położeniu. U dzieci panuje często względne podciśnienie w jamie bębenkowej. Dlatego mogą one stosunkowo mocniej cierpieć niż dorośli, ponieważ ich błona bębenkowa już wcześniej jest wybrzuszona do środka.

Jeśli na linii kolejowej występuje większa liczba tuneli w małym odstępie od siebie, to po pierwszym tunelu błona bębenkowa może pozostać nadal wybrzuszona do wewnątrz, ponieważ wyrównanie ciśnienia w jamie bębenkowej nie dokonuje w naturalny sposób. Dlatego kolejną nagłą zmianę ciśnienia przy wjeździe do drugiego tunelu doświadczą się dużo boleśniej niż tę poprzednią. Więc czysto teoretycznie, dla pasażerów pociągu korzystniej jest budować jeden długi tunel niż wiele krótszych, które następują szybko jeden po drugim. Odstęp między tunelami większy niż 2 minuty (jest to średni przedział czasu dla fizjologicznego przywrócenia normalnego ciśnienia) pozwala lepiej znieść nagłe zmiany ciśnienia w pociągu. Przy każdym następnym tunelu odczucia pasażerów mogą stać się więc coraz boleśniejsze. Im szybciej tunele następują jeden za drugim, tym agresywniejsze są odczucia podróżnych [4, 5].



Według badań UIC ustalono następujące maksymalne wartości obciążeń fizjologicznych:

Tabela 1

Fizjologiczne wartości obciążeń [5]

L.p.	Odczucie uszne	Przy różnicy ciśnień między uchem środkowym a ciśnieniem zewnętrznym ( $N/m^2$ )
1	Odczuwalne czucie napełnienia w uchu	400 do 700
2	Rosnące uczucie napełnienia w uchu	700 do 1300
3	Silne uczucie napełnienia w uchu, zredukowane zdolności percepcji w uchu	1300 do 2000
4	Bardzo nieprzyjemne dla ucha (dzwonienie, syczenie, trzaski), lekki ból	2000 do 4000

Źródło: [3]

Przy spotkaniu się pociągów z jednoczesnym wjazdem obu pojazdów po przeciwnych stronach tunelu oczekuje się, wg badań DB AG, zmiany ciśnienia  $3600 N/m^2$  już przy 200 km/h. W tunelu o długości 1450 m, przekroju poprzecznym  $92 m^2$ , w niekorzystnym przypadku spotkania się z jednokowym pociągiem, ICE o długości 400 m przy prędkości jazdy 330 km/h musi wytrzymać przez krótki czas różnicę ciśnień  $7,3 kPa$  [3]. Tak duże wartości ciśnień osiąganych przy mijaniu się pociągów w tunelach dwutorowych wymagają zastosowania na tego typu liniach wagonów o bardzo dużej szczelności.

### 3. Zakończenie

Z powyższych rozważań wynika, że pojazdy szynowe do dużych prędkości powinny posiadać dobrze uszczelnione okna i drzwi oraz powinny być wyposażone w wentylację nawiewną, która musi mieć ponadto dobrze usytuowane wloty powietrza. Dlatego wydaje się sensowne przyjmować oraz optymalizować tunel i pojazd jako system. Oprócz tego należy rozważyć jeszcze bardzo zróżnicowaną trwałość tuneli

i pojazdów, jako opcji dla przyszłych, dzisiaj nieznanymi generacji pojazdów.

### 4. Literatura

- [1] Gąsowski W., *Aerodynamika pociągu*. ITE. Radom 1998.
- [2] Glöckle H., *Tunnelaerodynamik im Hochgeschwindigkeitsverkehr*. ETR 1996, nr. 9, s.563–566.
- [3] Glück H., *Aerodynamik der Schienenfahrzeuge*. TÜV Rheinland GmbH, Köln 1985.
- [4] „Ergänzende Druckkammerversuche zur Differenzierung der Empfindungen von Fahrgästen in Tunneln“. European Rail Research Institute, B 106.3/DT 311, 1995.
- [5] „Auswertung der Daten aus der Druckkammer von Derby“, European Rail Research Institute, B 106.3/DT 316, 1995.