

Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 3: Oddziaływanie podmuchu

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 trzeciej części cyklu opisano charakterystyczne cechy podmuchu oraz jego oddziaływanie na otoczenie (w postaci sił działających na obiekty) oraz na infrastrukturę kolejową.

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

1. Wstęp

W części pierwszej [1] omówiono 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 dotyczących zmian ciśnienia, dotyczyła wzajemnego oddziaływania poruszających się pociągów na ich powierzchniach czołowej i bocznej. 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.

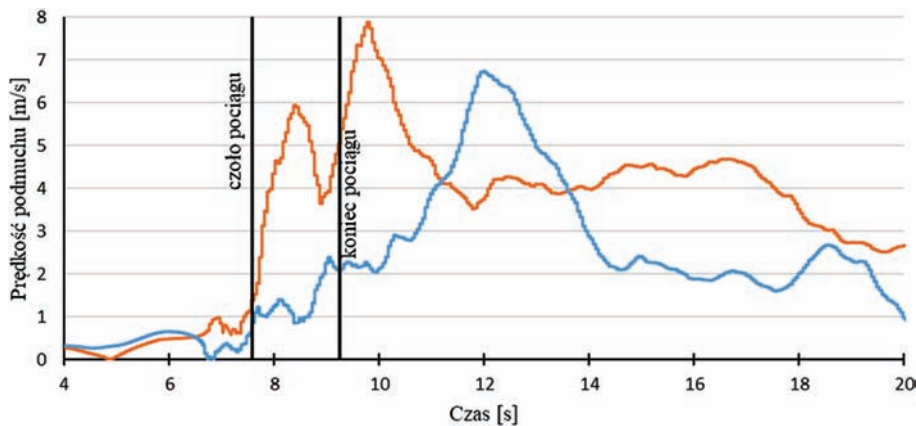
Część trzecia została poświęcona podmuchowi, który jest drugim oprócz ciśnienia, podstawowym rodzajem oddziaływań aerodynamicznych, wywołanych przez przejeżdżający z dużą prędkością pociąg.

2. Oddziaływanie podmuchu

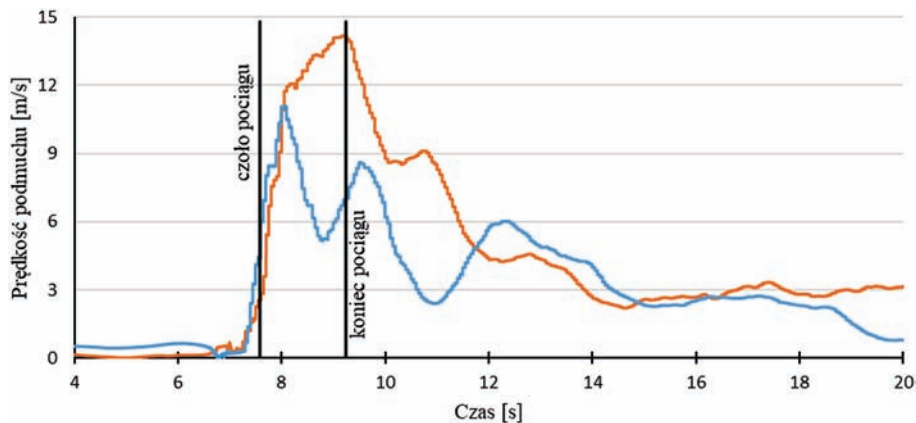
Przejeżdżający pociąg wprawia w ruch masy powietrza powodując ich przemieszczanie się i oddziaływanie na obiekty znajdujące się w pobliżu toru. W odróżnieniu od zmian ciśnienia, które osiągają największe wartości podczas samego przejazdu pociągu i tuż za nim – w czasie 0,1÷0,3 s (rys. 4 w części pierwszej [1]), a następnie podlegają szybkiemu wytłumieniu, to zjawisko podmuchu charakteryzuje się dużą zmiennością przebiegu oraz „ciągnięciem” mas powietrza dość długo za pociągiem – nawet do kilkunastu sekund, co jest rejestrowane przez czujniki do pomiaru prędkości powietrza i „niezauważalne” dla czujników do pomiaru ciśnienia. Ponadto, przepływowi powietrza za pociągiem towarzyszą burzliwe zawirowania.

Możliwe są różne przebiegi krzywych podmuchu – takie, w których maksimum jest osiągnięte w czasie przejazdu pociągu oraz takie, w których podmuch swoje maksimum osiąga już po przejeździe pociągu. Na rysunkach 1 i 2 pokazano przykładowe przebiegi podmuchu dla dwóch różnych jazd z taką samą prędkością. Dodatkowo, dwiema pionowymi liniami zaznaczono początek i koniec przejazdu pociągu. Początek narastania krzywej podmuchu daje się zaobserwować na chwilę przed czołem pociągu, co jest wynikiem pchania masy powietrza przez pociąg. W otwartej przestrzeni zjawisko to nie jest tak bardzo wyraźne jak w metrze, gdzie podmuch powietrza jest odczuwalny w stosunkowo długim czasie przed

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



Rys. 1. Podmuch na wysokości 1,4 m dla dwóch jazd z tą samą prędkością [opracowanie własne]



Rys. 2. Podmuch na wysokości 0,2 m dla dwóch jazd z tą samą prędkością [opracowanie własne]

wjazdem pociągu na stację. Wyraźny przyrost krzywej poddmuchu odpowiada przejazdowi czoła pociągu obok czujników poddmuchu, natomiast dalszy przebieg jest różny. Na wysokości 1,4 m powyżej główki szyny, dla obu przejazdów obserwowany szczyt krzywej poddmuchu jest – proporcjonalnie do czasu przejazdu – w dość długim czasie już po przejeździe pociągu. Nieco inaczej wyglądają przebiegi na wysokości 0,2 m powyżej główki szyny. W jednym z przejazdów obserwowany szczyt krzywej poddmuchu występuje w trakcie samego przejazdu pociągu, a w drugim – na końcu przejazdu. Zatem w przypadku poddmuchu nie możemy mówić o takiej powtarzalności wyników – przynajmniej w odniesieniu do charakteru krzywych – jak w przypadku pomiarów ciśnienia, a maksymalna wartość poddmuchu może wystąpić w trakcie przejazdu pociągu lub w różnym czasie już po jego przejeździe.

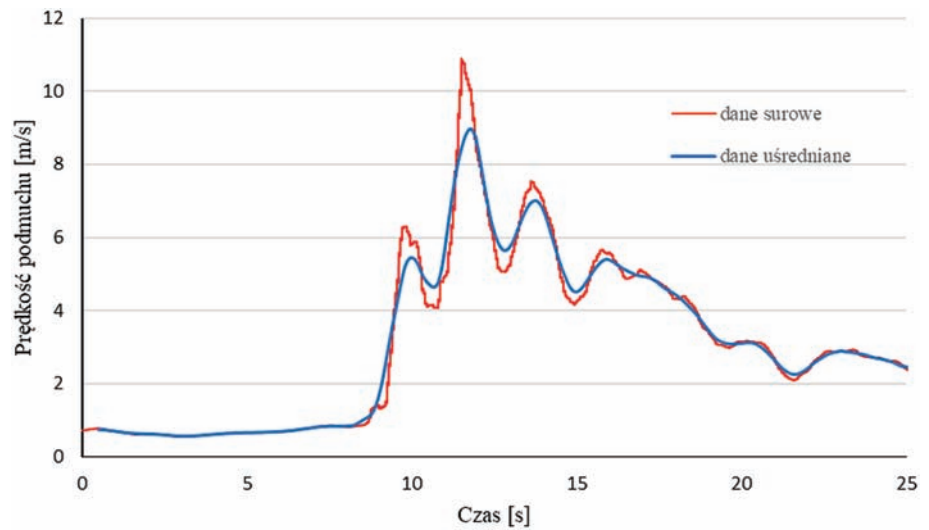
Z tego powodu norma PN-EN 14067-4 [3] wymaga, aby początek rejestracji następował na min. 4 s przed przejazdem czoła pociągu, a zakończenie rejestracji odbywało się min. 10 s po przejeździe pociągu. I tak, jak przy pomiarach ciśnienia wymagane było przeprowadzenie serii co najmniej 10 jazd, tak przy pomiarach poddmuchu dla prawidłowej oceny

pojazdu wymagane jest przeprowadzenie serii co najmniej 20 jazd. Rejestracja powinna odbywać się z częstotliwością min. 10 Hz, a zarejestrowane dane podlegają uśrednianiu w czasie jednej sekundy (rys. 3), co powoduje wyraźne złagodzenie pików, szczególnie tych o krótkim czasie trwania. Następnie zarejestrowane wartości maksymalne należy poddać obróbce statystycznej.

Norma PN-EN 14067-4 [3] określa maksymalne wartości poddmuchu dla uzyskanych wyników pomiarów, zawartych w przedziale ufności 95% – $U_{95\%max}$, w odległości 3 m od osi toru. Pomiar wykonuje się dla dwóch wysokości ponad główką szyny: 0,2 m – podmuch związany z dużymi zawirowaniami powietrza na wysokości układu biegowego i podwozia pojazdu oraz na wysokości 1,4 m – podmuch związany z przemieszczaniem się pudła pojazdu.

Maksymalne dopuszczalne wartości poddmuchu wynoszą:

- na wysokości 1,4 m ponad główką szyny – 15,5 m/s, mierzone przy prędkości maksymalnej lub przy prędkości 200 km/h, jeżeli prędkość pojazdu przekracza 200 km/h;
- na wysokości 0,2 m ponad główką szyny – 20 m/s, mierzone przy prędkości maksymalnej poniżej



Rys. 3. Uśrednianie zarejestrowanych danych w czasie jednej sekundy [opracowanie własne]

250 km/h lub 22 m/s mierzone przy prędkości maksymalnej pojazdu z zakresu $250 \text{ km/h} \leq V < 300 \text{ km/h}$ lub mierzone przy 300 km/h, jeżeli prędkość pojazdu przekracza 300 km/h.

Dla prędkości $V \leq 160 \text{ km/h}$ nie określono żadnych wymagań.

Na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano uśrednione w czasie jednej sekundy maksymalne wartości podmuchów dla pociągu klasycznego i elektrycznego zespołu trakcyjnego dużych prędkości (EZT), zarejestrowane na wysokościach 1,4 m oraz 0,2 m ponad główką szyny. Do wykresów wykorzystano wyniki z innych badań, niż dopuszczenie konkretnego typu pojazdu kolejowego do ruchu. Dzięki temu uzyskano znacznie szerszy zakres prędkości badań niż podczas badań dopuszczeniowych (wówczas badane są podmuchy przy prędkości jazdy bliskiej prędkości maksymalnej badanego pojazdu lub podanej wyżej prędkości ustalonej normą [3]). Wynikającym z tego dodatkowym efektem jest możliwość pokazania narastania średniej wartości podmuchu (kropkowane linie trendu) przy wzroście prędkości jazdy.

Uzyskane wartości liczbowe podmuchu z poszczególnych jazd zostały poddane obróbce statystycznej, tzn. zostały przeliczone do wartości odpowiadającej referencyjnej prędkości jazdy, według zależności:

$$U_{i,\text{ref}} = U_i \cdot V_{\text{ref}} : V_i \quad (1)$$

gdzie:

$U_{i,\text{ref}}$ – i -ta prędkość podmuchu dla referencyjnej prędkości jazdy [m/s],

U_i – i -ta prędkość podmuchu dla zarejestrowanej prędkości jazdy [m/s],

V_{ref} – referencyjna prędkość jazdy,

V_i – zarejestrowana prędkość jazdy.

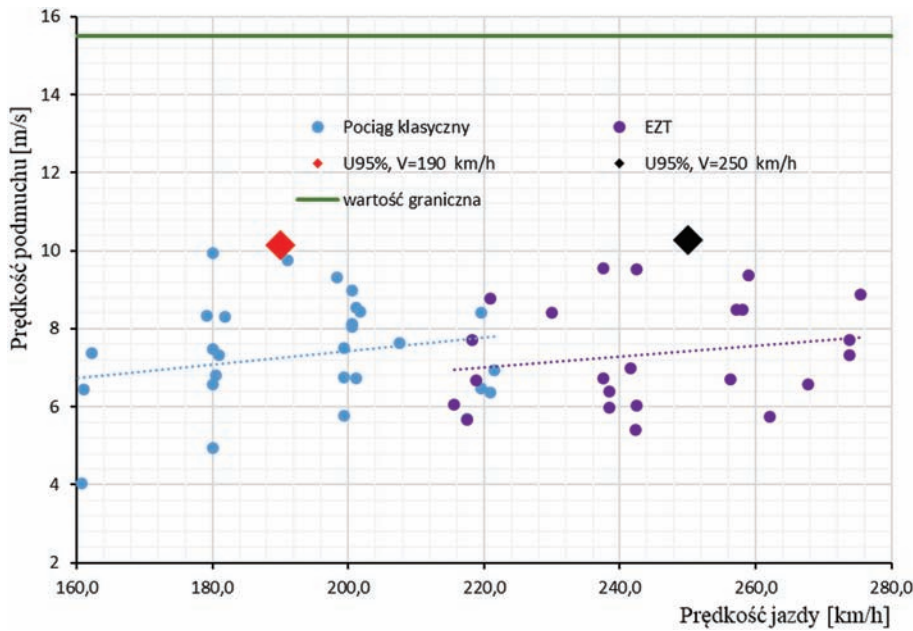
Dla pociągu klasycznego, jako referencyjną prędkość jazdy przyjęto 190 km/h, a dla EZT – 250 km/h. Następnie obliczono wartość średnią U_{sr} dla wszystkich U_i oraz odchylenie standardowe σ . Jako charakterystyczną wartość liczbową podmuchu przyjmuje się wartość średnią powiększoną o 2σ – czyli wartość zawierającą się w 95% przedziale ufności:

$$U_{95\%} = U_{\text{sr}} + 2\sigma \quad (2)$$

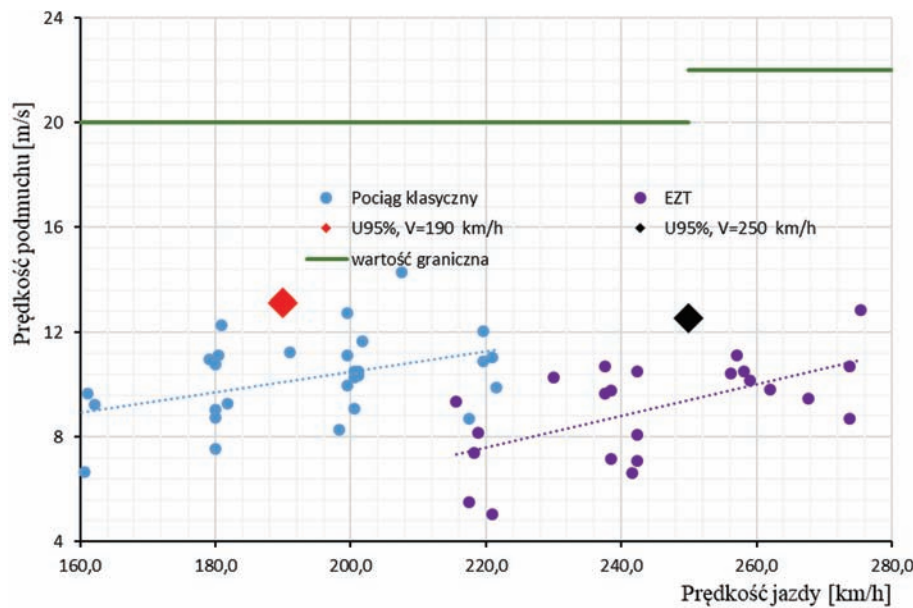
Wartości $U_{95\%}$ zostały zaznaczone na obu wykresach (znaki w kształcie rombu). Ponadto poziomymi liniami zaznaczono określone normą [3] wartości graniczne (maksymalne) podmuchu.

Charakterystyczne wartości liczbowe podmuchu $U_{95\%}$ dla taboru klasycznego i taboru dużych prędkości (EZT) pokazują, że pomimo znacznej różnicy prędkości (tu: 60 km/h) tabor zaprojektowany do jazdy z dużą prędkością ma tylko nieznacznie większą wartość $U_{95\%}$ na wysokości 1,4 m ponad główką szyny (odpowiadającej podmuchowi wywołanemu przez pudło pojazdu) niż tabor klasyczny. Natomiast na wysokości 0,2 m ponad główką szyny (odpowiadającej podmuchowi wywołanemu przez układ biegowy i podwozie pojazdu), pomimo większej prędkości jazdy, tabor dużych prędkości (EZT) ma mniejszą charakterystyczną wartość liczbową podmuchu $U_{95\%}$ niż tabor klasyczny. Wskazuje to na znacznie lepszy kształt aerodynamiczny pojazdu dużych prędkości, który ma możliwie dobrze osłonięte podwozie i wózki w przeciwieństwie do taboru klasycznego, który takich osłon nie ma lub posiada je w ograniczonym zakresie wprawiając w ruch większe masy powietrza i wywołując również większe jego zawirowania.

Dla pociągów skonfigurowanych ze składów stałych oraz predefiniowanych, ocenie podlega cały skład. W przypadku pociągów złożonych z kilku połączonych



Rys. 4. Podmuch na wysokości 1,4 m dla pociągu klasycznego i ERTMS [opracowanie własne]



Rys. 5. Podmuch na wysokości 0,2 m dla pociągu klasycznego i ERTMS [opracowanie własne]

ze sobą składów wystarczające jest sprawdzenie pociągu złożonego z dwóch składów, pod warunkiem że minimalna długość pociągu wynosi 120 m.

Dla pojedynczych pojazdów trakcyjnych, wyposażonych w kabinę maszynisty, sprawdzeniu podlega badany pojazd w składzie pociągu razem z wagonami pasażerskimi o minimalnej łącznej długości 100 m. Sprawdzenie należy przeprowadzić zarówno dla pojazdu trakcyjnego umieszczonego na początku, jak i na końcu składu, a także z dwoma pojazdami trakcyjnymi – jednym na początku i drugim na końcu składu.

Dla pojedynczych wagonów osobowych istnieją dwie możliwości potwierdzenia spełnienia warunków wymaganych przez normę. Pierwszą możliwością jest

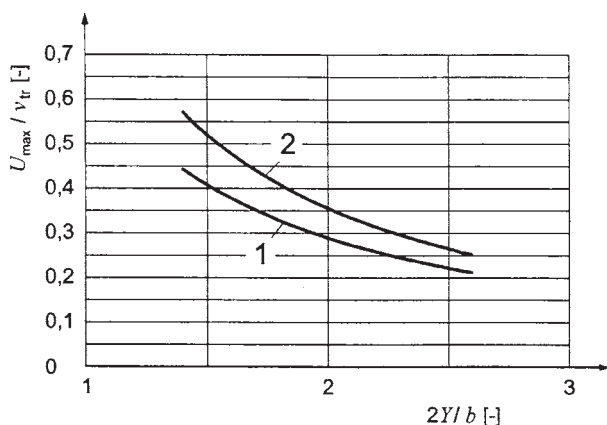
potwierdzenie podobieństwa do wagonów istniejących lub takich, dla których uzyskano pozytywne wyniki badań, z uwzględnieniem:

- prędkości maksymalnej (nie większej, niż prędkość pojazdu odniesienia);
- usytuowania wózków skrajnych (rozmieszczenie, wnęki i obrys wózka);
- zmiany obwiedni pociągu (tj. szerokości i wysokości pudła) nad wózkami o mniej niż 10 cm.

Drugą możliwością jest przeprowadzenie badań i sprawdzenie, czy wartości podmuchu zmierzone w odległości 3 m od osi toru, na wysokości 0,2 m i 1,4 m ponad główką szyny, zawarte w przedziale

ufności 95% – $U_{95\%}$, nie przekraczają wartości dopuszczalnych $U_{95\%max}$. W takim przypadku wagon powinien być przebadany w dwóch konfiguracjach umiejscowienia w składzie pociągu: bezpośrednio za lokomotywą spełniającą wymagania w składzie wagonów o minimalnej łącznej długości 100 m oraz na końcu składu wagonów o minimalnej łącznej długości 100 m za spełniającą wymagania lokomotywą. Jeśli jest to wagon specjalnego przeznaczenia, jak np. wagon restauracyjny, który zawsze znajduje się w środku składu – powinien być badany tylko w środku składu wagonów o minimalnej łącznej długości 100 m.

Gdy niedostępne są wyniki badań lub symulacji, w celu zgrubnego oszacowania wartości maksymalnego podmuchu na podstawie normy PN-EN 14067-4 [3], można zastosować wykres z rysunku 6. Przedstawiono na nim iloraz podmuchu maksymalnego do prędkości pociągu U_{max}/v_{tr} w funkcji ilorazu odległości od osi toru do połowy szerokości pociągu $2Y/b$ (wartość osi poziomej 1 odpowiada ścianie bocznej pociągu). Pociągom dużych prędkości odpowiada krzywa 1, a pociągom klasycznym – krzywa 2.



Rys. 6. Wykres do zgrubnego oszacowania podmuchu maksymalnego [3]: 1) pociągi dużych prędkości, 2) pociągi klasyczne

Podobne wyniki zamieszczono w raporcie [4]. Na rysunku 7 naniesiono prędkości przepływu powietrza uzyskane na podstawie obliczeń teoretycznych. Podobnie jak na rysunku 6, oś pionowa zawiera bezwymiarową wartość ilorazu podmuchu do prędkości pociągu U/v_{tr} , natomiast na osi poziomej naniesiono bezwymiarową wartość ilorazu odległości od pojazdu do szerokości tego pojazdu (czyli wartościom 1, 2 i 3 osi poziomej z rysunku 6 odpowiadają wartości 0, 0,5 i 1 osi poziomej z rysunku 7). Daje się zauważyć dosyć dobrą zgodność wyników dla pociągów dużych prędkości (krzywa 1 z rysunku 6 i krzywa „mały indukowany przepływ powietrza” z rysunku 7).

Na rysunku 8, zaczerpniętym także z raportu [4], zaprezentowano wyindukowane prędkości przepływu

powietrza uzyskane z badań rzeczywistych dla różnych pojazdów. W celu porównania naniesiono na nim również – te same, co na rysunku 7 – wartości uzyskane z obliczeń teoretycznych (trzy linie ciągłe oznaczone na wykresie jako „duży/średni/mały indukowany przepływ powietrza”). Tak samo jak na rysunkach 6 i 7, oś pionowa zawiera bezwymiarową wartość ilorazu podmuchu do prędkości pociągu U/v_{tr} , natomiast na osi poziomej naniesiono odległość od pojazdu, podaną w metrach. Dla kolei zrzeszonych w UIC, ze względu na stosowanie tej samej skrajni pojazdu, maksymalna szerokość pojazdu wynosi około 2,9 m. Oznacza to, że wartości odległości 0 m, 1,5 m oraz 3 m z rysunku 8 odpowiadają w przybliżeniu bezwymiarowym wartościom odciętych 0, 0,5 i 1 z rysunku 7, a także wartościom odciętych 1, 2 i 3 z rysunku 6. W zakresie do około 1,5 m od ściany pociągu, zauważalna jest bardzo dobra zgodność wyników dla pociągu TGV z krzywą „mały indukowany przepływ powietrza”.

Na podstawie znajomości wartości podmuchu możemy obliczyć siłę działającą na obiekty znajdujące się w pobliżu, która jest fizyczną realizacją podmuchu. Można ją obliczyć ze wzoru (3) [3]:

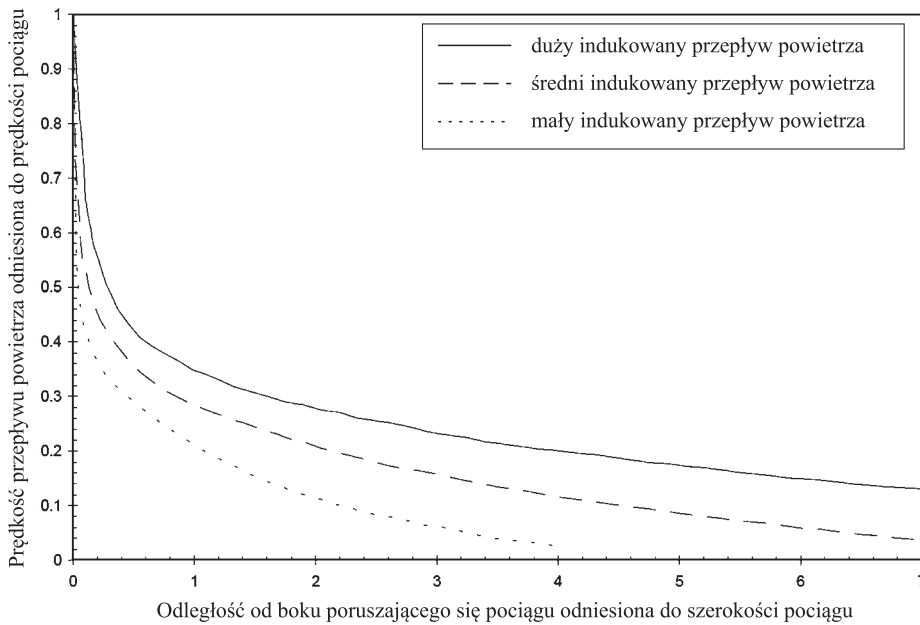
$$F = 0,5 \cdot C_F \cdot S \cdot \rho \cdot U_{max}^2, \quad (3)$$

gdzie:

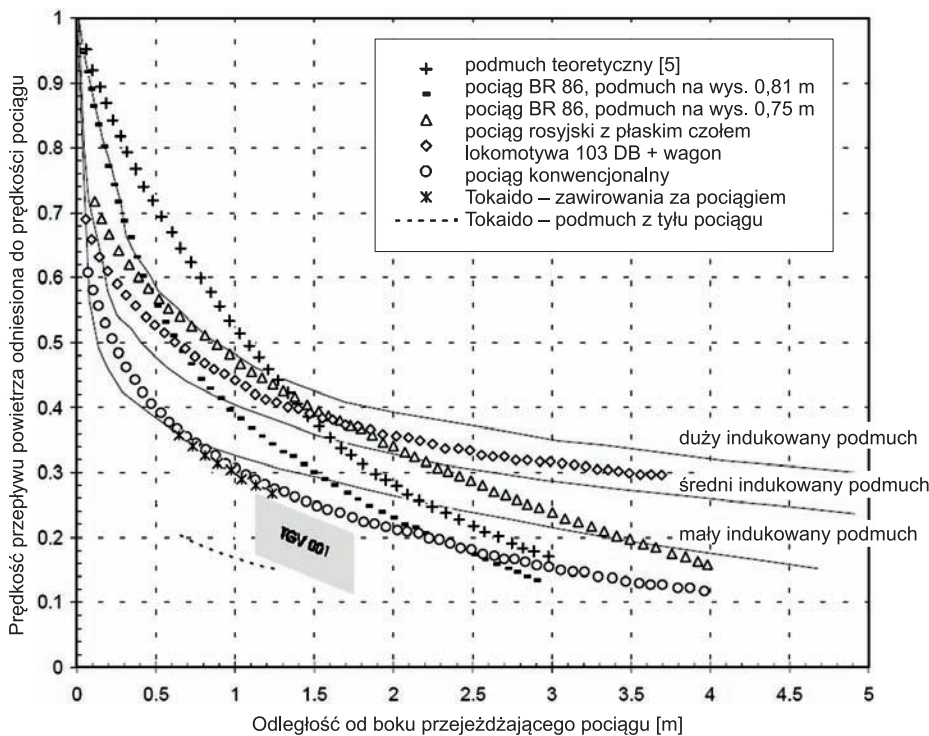
- F – maksymalna siła oddziaływująca na obiekt;
- C_F – współczynnik aerodynamiczny (zmierzony w tunelu lub wzięty z normy [7]),
- S – powierzchnia charakterystyczna,
- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ – gęstość powietrza,
- U_{max} – maksymalna wartość podmuchu wytworzona podczas przejazdu pociągu.

3. Oddziaływanie aerodynamiczne mieszane

Podobnie jak powstają zmiany ciśnienia, które mogą być obserwowane z boku pociągu (opisane w p. 2.1 części pierwszej [1]), tak samo zmienia się ciśnienie pod pociągiem, które oddziałuje na podsypkę. W strefie czoła pociągu będzie powstawało nadciśnienie, które następnie przejdzie w podciśnienie. W zależności od wartości, podciśnienie to może powodować podrywanie tłucznia (jego „zasysanie”), a w dalszej kolejności fala podmuchu może porywać tłuczeń ze sobą. Dochodzi zatem do połączonego oddziaływania ciśnienia i podmuchu – czyli oddziaływania mieszane. Zjawisko to nie jest dostatecznie przebadane i norma PN-EN 14067-4 [3] pozostawia kwestie oddziaływań aerodynamicznych na torowisko jako otwarte.



Rys. 7. Wartości podmuchu uzyskane z obliczeń teoretycznych [4, 5]



Rys. 8. Wykres podmuchu uzyskany z obliczeń oraz z badań różnych pojazdów [4, 6]

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że oprócz prędkości samego pociągu i jego kształtu aerodynamicznego, duży wpływ na ewentualne podrywanie tłucznia będzie miała wielkość kamieni i wysokość ich ułożenia. Przy tych samych prędkościach jazdy, częstsze podrywanie tłucznia będzie następowało w przypadku pociągu klasycznego (lokomotywa + wagony), niż w przypadku składu

o jednolitej konstrukcji, jaką charakteryzują się zespoły trakcyjne. Z kolei im większa wysokość ułożenia tłucznia i jednocześnie mniejsze jego uziarnienie, tym większa możliwość poderwania i ciągnięcia kamieni za pociągiem. W pewnych przypadkach tłuczeń może uderzać w elementy nawierzchni kolejowej lub stalowe elementy wózka pojazdu, odbijając się od nich i uderzać w inne, wrażliwe na te uderzenia

Rys. 9. Poderwany i lecący pod pociągiem i lecący pod nim w trakcie przejazdu. [fot. A. Zbieć]



Rys. 10. Kamień poderwany pod pociągiem i lecący jeszcze po przejeździe pociągu [fot. A. Zbieć]



elementy na podwoziu pojazdu, w efekcie powodując ich uszkodzenia. Ilustrację opisywanego zjawiska przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Na rysunku 9 zaprezentowano kamień poderwany przez pociąg i lecący pod nim w trakcie przejazdu. Natomiast na rysunku 10 zaprezentowano kamień poderwany przez końcową część pociągu i lecący za pociągiem jeszcze po jego przejeździe.

W skrajnie niekorzystnych sytuacjach wynikających z kombinacji prędkości, kształtu aerodynamicznego pociągu, wielkości tłucznia i sposobu jego ułożenia tudzież obecności elementów infrastruktury (zmieniających zarówno wielkość oddziaływania ciśnienia, jak i przepływu powietrza wywołanego przejazdem pociągu) może nastąpić poderwanie tłucznia również na zewnątrz toru. Zjawisko to jest na szczęście zdecydowanie rzadsze, niż podrywanie tłucznia pod przejeżdżającym pociągiem, ponadto dotyczy raczej tłucznia o małej wielkości i ma miejsce w bardzo bliskim sąsiedztwie przejeżdżającego pociągu (do około 0,5 m od ściany pociągu).

Analogiczne niebezpieczeństwo, związane z porywaniem przedmiotów z torowiska i ewentualnym ich odbijaniem się od pociągu, ale w kontekście

oddziaływania na ludzi, będzie omówione szerzej w dalszej części cyklu.

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań pokazują, że aerodynamiczny kształt nadwozia ma kluczowe znaczenie dla wywoływanego podmuchu. Pod tym względem pudła pociągów zespolonych są znacznie lepiej ukształtowane i wywołują łagodniejsze oddziaływania, niż pociągi klasyczne, złożone z lokomotywy i doczepionych do niej wagonów. Dotyczy to zarówno wywoływania samego podmuchu w postaci „wiatru”, jak i generowanych przez niego sił. Połączone oba rodzaje oddziaływania, tzn. ciśnienie i podmuch, wywołane przejazdem pociągu z dużą prędkością, mogą powodować podrywanie tłucznia i jego ciągnięcie wraz z pociągiem. Im gorszy pod względem aerodynamicznym jest kształt nadwozia pojazdu kolejowego oraz im drobniejsze są kamienie tłucznia w połączeniu z większą wysokością jego ułożenia, tym większe jest niebezpieczeństwo poderwania tłucznia. W przypadku dużych prędkości kursowania pociągów (powyżej

200 km/h) może okazać się konieczne stosowanie środków zabezpieczających przed podrywaniem podsypki (jak np. specjalne żywice wiążące tłuczeń) lub stosowanie nawierzchni bezpodsypkowej.

Literatura

1. Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 1: Oddziaływanie ciśnienia na obiekty*, Problemy Kolejnictwa, 2021, z. 191.
2. Zbieć A.: *Zjawiska aerodynamiczne wywołane przejazdem pociągu. Część 2: Oddziaływanie ciśnienia na mijające się pociągi*, Problemy Kolejnictwa, 2021, z. 192.
3. PN-EN 14067-4+A1:2019-03: Kolejnictwo – Aerodynamika – Część 4: Wymagania i procedury badań aerodynamicznych na szlaku.
4. 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.
5. Hammitt A.G.: *The Aerodynamics of High Speed Ground Transportation*, North Hollywood, California, 1973.
6. 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*, Glaser's annalen ZEV, 1977/04/04, 101(4) pp. 97–102 (30 Ref.) (German).
7. PN-EN 1991-1-4:2008: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1–4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.