

## Propedeutyka aerodynamiki pojazdów szynowych

*W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia występujące przy przepływie powietrza omywającego pojazdy szynowe podczas ich ruchu. Opisano warstwę przyścienną i oderwanie strug powietrza oraz opory aerodynamiczne i możliwości ich zmniejszenia.*

### 1. Wprowadzenie

Aerodynamika umożliwia rozwiązywanie wielu problemów ruchu pociągów, zwłaszcza pociągów dużej prędkości.

Zasadniczym jej problemem jest określenie oporów aerodynamicznych pojazdów szynowych oraz dążenie do ich minimalizacji. Ma to duże znaczenie zarówno na etapie projektowania pojazdu, jak i w trakcie jego eksploatacji.

Proces projektowania pojazdu szynowego już na wstępie wymaga choćby przybliżonego oszacowania oporów aerodynamicznych. Umożliwia to prawidłowe dobranie mocy niezbędnej do osiągnięcia założonych parametrów trakcyjnych pojazdu takich jak prędkość, przyspieszenie lub siła pociągowa. Na etapie projektowania dąży się też do zharmonizowania zewnętrznych kształtów pojazdu oraz do optymalizacji parametrów konstrukcyjnych pojazdu, ze względu na zużycie energii.

Znajomość oporów aerodynamicznych, jako składowej całkowitych oporów ruchu, jest też niezbędna na etapie eksploatacji. Daje to możliwość obliczenia tzw. przejazdów teoretycznych, rzeczywistego zapotrzebowania mocy, a co za tym idzie - zużycia energii w zależności od konfiguracji składu pociągu, jego masy oraz prędkości jazdy.

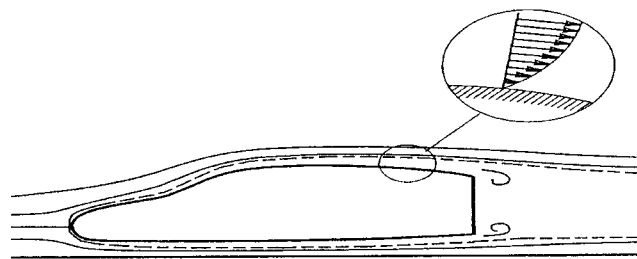
### 2. Podstawowe zagadnienia przepływu

Problemy związane z ruchem pojazdów szynowych można podzielić na problemy związane z zewnętrznym opływem pojazdu oraz na zagadnienia dotyczące przepływu wewnętrznego takie jak np. chłodzenie silników trakcyjnych, hamulców i innych zespołów, przepływu powietrza przez wnętrze pociągu (konieczność zapewnienia sprawnego ogrzewania i wentylacji), odpowiednie usytuowanie wlotów i wylotów powietrza, itp.

W niniejszej pracy poruszono problemy opływu zewnętrznego wokół pociągu.

#### 2.1. Pojęcie opływu

Przez opływ zewnętrzny pojazdu rozumie się przepływ powietrza wokół pojazdu wymuszony prędkością jazdy  $v$  oraz przepływ w bezpośredniej bliskości torowiska pod pociągiem.



Rys. 2.1. Schemat opływu pojazdu [6]

Dopóty nie nastąpi oderwanie strug przepływu w cienkiej warstwie  $\delta$  (o grubości kilku milimetrów), dopóki zjawiska w bezpośrednim otoczeniu opływanych ścian, które określa się jako warstwę przyścienną, wynikają z oddziaływania lepkości opływającego czynnika.

Poza tą warstwą, płyn zachowuje się jak przy przepływie nielepkiem (tzn. przy braku tarcia wewnętrznego). Ciśnienie będące rezultatem zewnętrznego przepływu nielepekatego ma wpływ na zachowanie się warstwy przyściennej. Podłoże przy braku wiatru traktuje się jak ściankę poruszającą się wraz z powietrzem.

Z dala od pojazdu względna prędkość pomiędzy powietrzem a podłożem jest równa zeru, zatem brak jest warstwy przyściennej przy podłożu. W polu przepływu zakłócenia są możliwe tylko wówczas, gdy bezwymiarowa liczba podobieństwa zwana liczbą Reynoldsa spełnia zależność:

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} > 10 \quad (2.1)$$

gdzie:  $v$  – prędkość pojazdu [m/s],  
 $L$  – długość pojazdu [m],  
 $\nu$  – lepkość kinematyczna powietrza [m<sup>2</sup>/s].

Liczba Reynoldsa określa stan przepływu zależny od prędkości  $v$ , lepkości kinematycznej  $\nu$ , oraz długości charakterystycznej  $L$ .

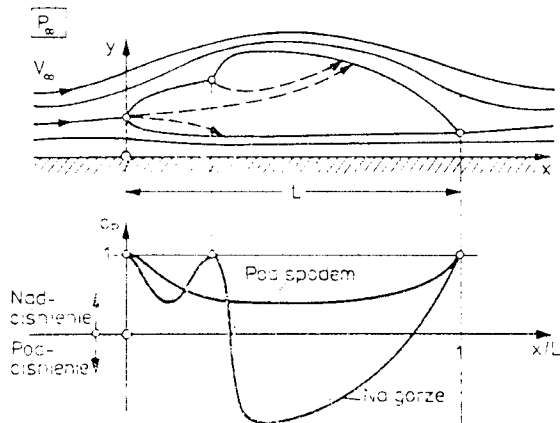
Opływy brył podobnych geometrycznie, dla których liczby Reynoldsa przyjmują takie same wartości mimo różnic w wymiarach geometrycznych i w cechach fizycznych, określa się jako podobne dynamicznie.

Te założenia są podstawą techniki modelowania. Wyniki na pomniejszych lub powiększonych modelach można po-

równywać z oryginalnym obiektem, gdy przepływy wykazują dynamiczne podobieństwo, czyli mają równe liczby podobieństwa  $Re$  (istnieją również inne kryteria podobieństwa przepływu, ale tu ograniczymy się do  $Re$ ). Dla różnych liczb Reynoldsa zwykle występują różne stany przepływu.

## 2.2. Podstawowe równania przepływu zewnętrznego

Przepływ płynu pozbawionego lepkości, odbywający się przy zewnętrznej krawędzi warstwy przyściennej, określa rozkład ciśnienia na opływanej bryle.



Rys. 2.2. Schemat opływu i rozkład ciśnienia na nadwoziu pojazdu przy przepływie dwuwymiarowym nielepkiem [5]

Podstawową zależnością determinującą taki przepływ jest prawo zachowania masy, zwane też równaniem ciągłości przepływu. Jeżeli przepływ jest nieściśliwy (tzn. dotyczy płynu nieściśliwego lub ściśliwego traktowanego jako nieściśliwy, czyli gdy gęstość powietrza  $\rho = const.$ ), to prawo to można wyrazić następująco:

$$vf = const. \quad (2.2)$$

gdzie:  $f$  – powierzchnia lokalnego przekroju [ $m^2$ ],  
 $v$  – lokalna prędkość przepływu w miejscu tego przekroju [ $m/s$ ].

Z tej zależności wynika, że miejsca o dużej prędkości przepływu  $v$  mają zagęszczone linie prądu i odwrotnie, co uwidoczniono na rys. 2.1.

Następną obowiązującą zależnością jest druga zasada dynamiki Newtona głosząca, że iloczyn masy i przyspieszenia jest równy sumie sił działających w kierunku przyspieszenia. Na płyn pozbawiony lepkości, oddziałują siły bezwładności i siły ciśnienia.

Dla nieściśliwego płynu wzdłuż linii prądu wynika stąd zależność zwana równaniem Bernoulliego:

$$g = p + 0,5(\rho v^2) = const. \quad (2.3)$$

gdzie:  $g$  – ciśnienie całkowite [Pa],  
 $p$  – ciśnienie statyczne [Pa],  
 $0,5(\rho v^2)$  – ciśnienie dynamiczne [Pa].

Określa ona zależność między ciśnieniem  $p$  i prędkością  $v$  na linii prądu.

Wzdłuż linii prądu suma ciśnienia statycznego i dynamicznego jest stała i równa ciśnieniu całkowitemu. Czyli w miejscach, gdzie chwilowa prędkość przepływu  $v$  jest duża panuje niskie ciśnienie  $p$ , i odwrotnie.

Gdy przepływ znajdzie się na tzw. punkcie spiętrzenia (np. na ścianie czołowej opływanej bryły), to wówczas na skutek zerowej prędkości  $v = 0$  ciśnienie dynamiczne również jest równe zero. Aby równanie Bernoulliego było spełnione, ciśnienie statyczne  $p$  musi być równe ciśnieniu całkowitemu  $g$ .

Przy opływie pojazdu jak na rys. 2.2., linie prądu wywodzą się z obszaru o określonej prędkości napływu  $v$  i o określonym ciśnieniu statycznym  $p$ . Na wszystkich liniach prądu ciśnienie całkowite jest jednakowe. Wartość ta zwana jest też stałą Bernoulliego pola przepływu.

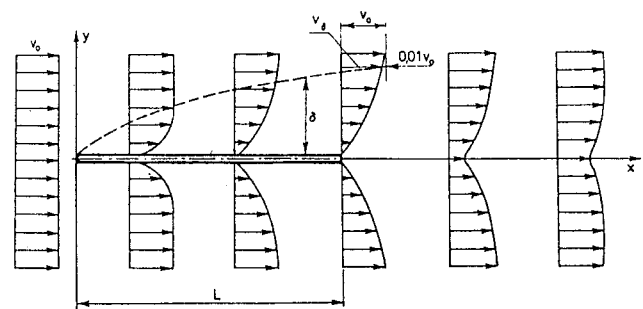
## 2.3. Warstwa przyścienne

Warstwa przyścienne jest warstwą płynu (w tym przypadku powietrza) znajdującą się w pobliżu ścian opływającego przedmiotu, w której występują duże gradienty prędkości w kierunku prostopadłym do powierzchni opływającego ciała.

W celu wyjaśnienia istoty tego pojęcia, rozpatrzono opływ płaskiej płytki.

Strumień powietrza napływający na płytkę ma stałą prędkość. Cząsteczki powietrza opływające płytkę, które znajdują się w bezpośrednim kontakcie z jej powierzchnią, zostają dzięki siłom adhezji całkowicie wyhamowane ( $v = 0$ ). Natomiast cząsteczki znajdujące się w pewnej odległości od płytki są hamowane tym silniej, im bliżej opływanej ścianki się znajdują.

Wówczas powstaje rozkład prędkości jak na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Schemat powstawania i zanikania warstwy przyściennej na płaskiej płycie [7]

Hamowanie warstw powietrza, ze względu na małą jego lepkość dynamiczną, szybko maleje wraz z oddalaniem się od powierzchni płytki. Zatem gradienty prędkości  $\partial v / \partial y$  przy ściankach opływanych w kierunku prostopadłym do ich powierzchni są duże, a następnie szybko maleją.

Naprężenia styczne przyłożone do cząsteczek warstwy przyściennej w czasie ich ruchu wykonują pracę, która jest dyssypowana powodując tzw. straty tarcia.

Zatem w miarę jak rośnie droga cząsteczek płynących wzdłuż ścianki w warstwie przyściennej, zmniejsza się energia kinetyczna strumienia przyściennej.

Tak więc grubość warstwy przyściennej  $\delta$  rośnie wzdłuż ścianki w kierunku przepływu.

Na spływie opływanej płytki obydwie warstwy przyścienne łączą się, tworząc za nią tzw. ślad aerodynamiczny.

W miarę oddalania się od opływającego przedmiotu profil prędkości stopniowo się wyrównuje, a ślad aerodynamiczny zanika.

Przyjmuje się, że grubość warstwy przyściennej to taka odległość od opływanej powierzchni, w której prędkość jest równa 0,01 prędkości nabiegania powietrza  $v_0$ .

Poza obszarem warstwy przyściennej i śladu aerodynamicznego, naprężenia styczne mogą być pominięte, ponieważ współczynnik lepkości dynamicznej  $\eta$ , oraz gradienty prędkości są relatywnie niewielkie.

Ruch powietrza w warstwie przyściennej może mieć charakter laminarny, turbulentny lub mieszany.

Przepływ laminarny jest to stacjonarny przepływ uwarstwiony. Odbywa się on w warstwach równoległych do ścianki. Ruch elementów płynu jest uporządkowany i nie ma wymiany elementów płynu między sąsiednimi warstwami. W przepływie tym istnieje przewaga sił lepkości.

Natomiast w przepływie turbulentnym, zwanym również przepływem burzliwym, występują intensywne fluktuacje prędkości w kierunku prostopadłym do przepływu, a co za tym idzie – także intensywna wymiana cząsteczek powietrza między sąsiednimi warstwami. Przeważają tutaj siły bezwładności.

W warstwie przyściennej rzeczywistych obiektów z reguły panuje przepływ mieszany, gdzie przepływ laminarny występujący na pewnym odcinku przechodzi w przepływ turbulentny.

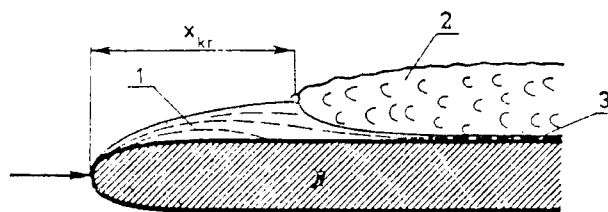
Położenie punktu przejścia z ruchu laminarnego w ruch turbulentny zależy od prędkości przepływu  $v$ , kinematycznego współczynnika lepkości  $\nu$ , oraz od turbulentności ośrodka i chropowatości powierzchni ciała.

Przejście warstwy laminarnej w turbulentną, następuje przy tzw. krytycznej liczbie Reynoldsa:

$$Re_{kr} = \frac{v \cdot x_{kr}}{\nu} \quad (2.4)$$

gdzie:  $v$  – prędkość przepływu [m/s],  
 $x_{kr}$  – odległość od początku płyty do punktu przejścia w warstwę turbulentną [m],  
 $\nu$  – lepkość kinematyczna [m<sup>2</sup>/s].

Rozpatrując przykładowo opływ płytki płaskiej w części wlotowej na długości  $x < x_{kr}$  mamy laminarną warstwę przyścienną, natomiast w części spływowej  $x > x_{kr}$  warstwa przyścienna ma charakter turbulentny. Krytyczna liczba Reynoldsa dla tego przepływu mieści się w przedziale  $Re_{kr} = 10^5 \div 10^7$ , i zależy od turbulencji początkowej napływającego płynu, zaburzeń na krawędzi wlotowej, oraz od chropowatości powierzchni płytki.



Rys 2.4. Przejście laminarnej warstwy przyściennej w warstwę turbulentną:

1 – warstwa laminarna, 2 – warstwa turbulentna, 3 – podwarstwa laminarna [7]

## 2.4. Odrwanie strug

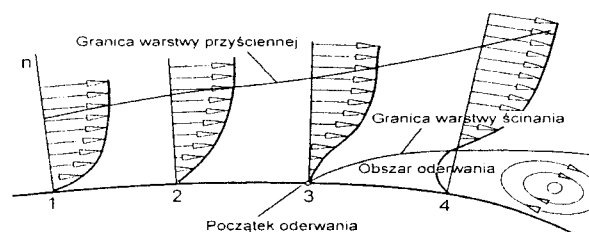
Zarówno przepływy laminarne jak i turbulentne, są w istotny sposób zależne od zmian ciśnienia w przepływie zewnętrznym, który generuje warstwę przyścienną. W odróżnieniu od laminarnej, turbulentna warstwa przyścienna jest bardziej podatna na strome wzrosty ciśnienia bez odrywania strug. Dzięki poprzecznym fluktuacjom prędkości elementów płynu i ich wymianie z elementami sąsiednich warstw, dochodzi do zwiększenia pędu w strumieniu tuż przy ściance.

W razie zmniejszenia ciśnienia nie ma niebezpieczeństwa oderwania strug.

Jeżeli wzrost ciśnienia jest niewielki, proces turbulentnego mieszania lub zderzeń cząstek pozwala warstwom zewnętrznym na efektywne popychanie warstw wewnętrznych. Energia jest wówczas przekazywana z szybciej poruszających się warstw.

W przypadku gdy szybkość wzrostu ciśnienia jest zbyt duża, proces mieszania może okazać się zbyt powolny aby podtrzymać ruch najbliższych powierzchni warstw powietrza. Wówczas wzrost ciśnienia w kierunku przepływu powoduje znaczną jego deformację, szczególnie w pobliżu ścianek.

Struga może ulec cofnięciu, co jest uwidocznione na rys. 2.5. Linie prądu odbiegają wtedy od ścianki, a zjawisko to jest określane potocznie jako oderwanie strugi.



Rys 2.5. Schemat procesu oderwania warstwy przyściennej [6]

Po oderwaniu, cząsteczki powietrza mają tendencję do ruchu w kierunku niższego ciśnienia, a więc przeciwnie do głównego kierunku przepływu.

Jeżeli tył pojazdu nie zwęża się płynnie tworząc długi ogon, to przepływ odrywa się na tylnej krawędzi pojazdu lub nawet wcześniej.

Tendencja do odrywania pojawia się, gdy przepływ odbywa się od obszaru niskiego ciśnienia do obszaru wysokiego ciśnienia, co jest określane jako niesprzyjający (dodatni) gradient ciśnienia. Natomiast sytuacja odwrotna, tj. przepływ z

obszaru wysokiego ciśnienia do niskiego występuje przy sprzyjającym (ujemnym) gradiencie ciśnienia. Nie tylko przeciwdziała on oderwaniu, lecz także spowalnia szybkość narastania grubości warstwy przyściennej, i opóźnia przejście z przepływu laminarnego do turbulentnego.

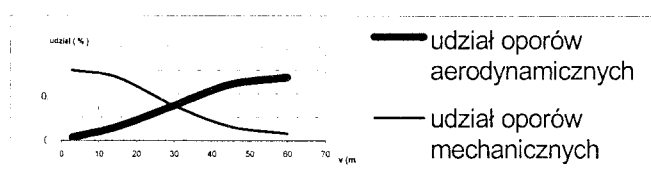
### 3. Opory aerodynamiczne

#### 3.1. Podstawowe zależności na opór aerodynamiczny

Całkowite opory ruchu są sumą oporów mechanicznych i oporów aerodynamicznych.

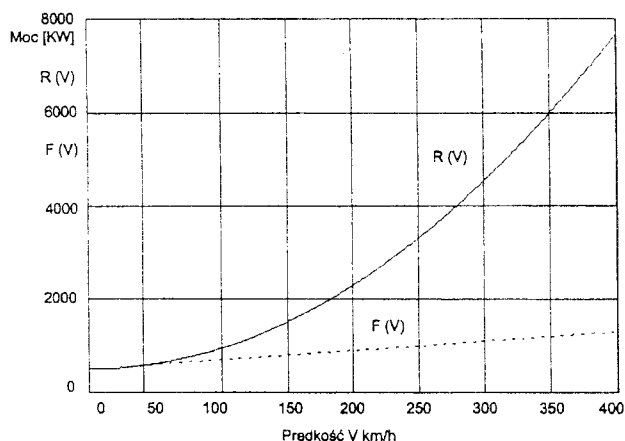
Opory mechaniczne to: tarcie w łożyskach zestawów kołowych, tarcie toczne na styku kół i szyn, tarcie ślizgowe między wózkami a ostojami, tarcie w urządzeniach ciągnowozderżnych oraz w innych zespołach.

Zarówno opory mechaniczne jak i aerodynamiczne rosną wraz ze wzrostem prędkości. Jednak o ile przyrost wartości oporów mechanicznych jest relatywnie niewielki, to opory aerodynamiczne rosną gwałtownie i ich udział w całkowitych oporach ruchu jest już znaczny.



Rys. 3.1. Udział oporów mechanicznych i aerodynamicznych w całkowitych oporach ruchu w funkcji prędkości

Szybki przyrost oporów aerodynamicznych (a co za tym idzie także oporów całkowitych), powoduje też szybki przyrost mocy niezbędnej do ich pokonania.



Rys. 3.2. Zapotrzebowanie na moc pojazdu trakcyjnego w funkcji prędkości [1]

F(V) – opory mechaniczne  
R(V) – opory całkowite

Pod względem aerodynamicznym znamioną cechą pociągu – w odróżnieniu od innych pojazdów – są jego proporcje wymiarowe. Znaczna długość przy stosunkowo niewielkiej szerokości i wysokości – te cechy stwarzają szczególne warunki przepływu powietrza wokół pociągu nie tylko na

otwartej przestrzeni, ale także podczas jazdy w tunelu, czy w trakcie wymijania się dwóch pociągów.

Najprostsza zależność na opory aerodynamiczne przedstawia się następująco:

$$W_a = C \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Zatem siła oporu aerodynamicznego rośnie wraz z kwadratem prędkości.

Zakładając, że płaszczyzna symetrii pojazdu jest równoległa do wektora prędkości powietrza, zależność na opory aerodynamiczne przedstawia się następująco:

$$W_a = C_x \cdot 0,5(\rho \cdot v^2) \cdot S \quad (3.2)$$

Gęstość powietrza  $\rho$  jest wielkością w zasadzie stałą i niezmienną (rzeczywiste zmiany gęstości są znikomo małe i mają marginalne znaczenie).

Powierzchnia odniesienia pojazdu  $S$  to inaczej powierzchnia czołowa pojazdu (ściślej - powierzchnia przekroju pojazdu płaszczyzną prostopadłą do jego osi podłużnej).

W pojazdach szynowych jest ona określona dodatkowo wymaganiami skrajni taboru.

Współczynnik oporu aerodynamicznego  $C_x$  zwany też współczynnikiem doskonałości aerodynamicznej, zależy od kształtów geometrycznych pojazdu i od liczby Reynoldsa. Jest on wielkością niemianowaną i jego zmniejszenie jest w zasadzie jedyną możliwością redukcji oporów aerodynamicznych.

Z oczywistych względów zmniejszanie przekroju poprzecznego, a zwłaszcza prędkości nie może być brane pod uwagę.

We wzorze (3.1) składowa  $C$  jest uogólnionym współczynnikiem charakteryzującym ciśnienie powietrza działające na czołową powierzchnię pociągu, przepływ powietrza wzdłuż dachu i ścian bocznych, zawirowania między wagonami, rozrzedzenie powietrza za ostatnim wagonem, zaburzenia przepływu pod pociągiem spowodowane bliską obecnością toru, zaburzenia spowodowane obecnością rozmaitego wyposażenia na dachu, ścianach bocznych, czołowych i pod nadwoziem oraz zaburzenia na skutek przypadkowych czynników, takich jak uchylone okna itp.

Opór aerodynamiczny pociągu jest sumą oporów pierwszego pojazdu (lokomotywy), środkowych pojazdów oraz ostatniego pojazdu. Opory pojazdów środkowych są w zasadzie sobie równe, chociaż mogą się nieznacznie różnić między sobą w zależności od warunków przepływu na poszczególnych członach.

Natomiast opory pierwszego, środkowego, i ostatniego wagonu różnią się między sobą zasadniczo. Wynika to ze zróżnicowania udziału oporów ciśnienia i tarcia powietrza na poszczególnych członach pociągu.

Zależność na opory aerodynamiczne pociągu może więc być zapisana następująco:

$$W_a = W_{ac} + (n - 2) \cdot W_{ap} + W_{ao} \quad (3.3)$$

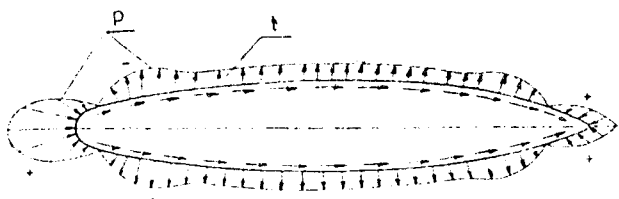
gdzie:  $W_a$  – opory aerodynamiczne pociągu,  
 $W_{ac}$  – opory aerodynamiczne czołowego pojazdu,  
 $W_{ap}$  – opory aerodynamiczne środkowego pojazdu,  
 $W_{ao}$  – opory aerodynamiczne ostatniego pojazdu,  
 $n$  – liczba wszystkich pojazdów w pociągu.

Uwzględniając zależności ( 3.1 ) i ( 3.2 ), opór aerodynamiczny można wyrazić w postaci:

$$W_a = C_v^2 = [C_{xc} + C_{xp}(n-2) + C_{xo}] \cdot 0,5 \cdot (\rho v^2) \cdot S \quad (3.4)$$

gdzie:  $C_{xc}$  – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu czołowego,  
 $C_{xp}$  – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu środkowego,  
 $C_{xo}$  – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu końcowego.

Z kolei zarówno opór aerodynamiczny każdego pojazdu wchodzącego w skład pociągu, jak i pociągu jako całości, jest sumą sił ciśnieniowych skierowanych prostopadle do powierzchni (zwanymi oporami kształtu) i sił stycznych wywołanych lepkością powietrza występujących na powierzchni pojazdu. Przedstawia to poniższy rysunek:



$p$  – ciśnienie  
 $t$  – tarcie  
 $+$  – nadciśnienie  
 $-$  – podciśnienie

$$C_{xc} = 0,033$$

$$C_{xt} = 0,067 \quad \lambda = 7$$

$$C_x = 0,01 \quad Re = 10^5$$

Rys. 3.3. Współczynnik oporu aerodynamicznego i rozkład ciśnienia dla ciała wydłużonego [2]

Współczynnik oporu aerodynamicznego  $C_x$  może być więc przedstawiony w postaci:

$$C_x = C_{xc} + C_{xt} \quad (3.5)$$

gdzie:  $C_{xc}$  – współczynnik oporu ciśnienia (kształtu),  
 $C_{xt}$  – współczynnik oporu tarcia.

Udział każdego z tych współczynników jest zmienny i zależy głównie od wydłużenia (smukłości) ciała. Najprostszą zależność na wydłużenie mają bryły obrotowe:

$$\lambda = \frac{L}{D} \quad (3.6)$$

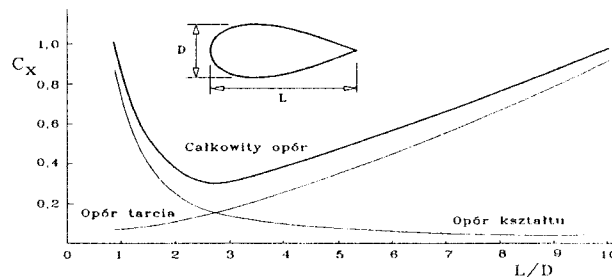
gdzie:  $L$  – długość ciała,  
 $D$  – średnica ciała.

Jeżeli bryła ma przekrój odmienny od kołowego (a taki przekrój mają pojazdy szynowe), to wydłużenie jest obliczane ze wzoru:

$$\lambda = \frac{L}{2\sqrt{S/\Pi}} \quad (3.7)$$

gdzie:  $L$  – długość ciała,  
 $S$  – powierzchnia maksymalnego przekroju ciała.

Badania aerodynamiczne brył obrotowych wykazały, że przy stopniowym ich wydłużaniu całkowite opory aerodynamiczne zmniejszają się, lecz po przekroczeniu  $\lambda = 3$  ponownie wzrastają na skutek wzrostu udziału oporów tarcia w oporach całkowitych. Tymczasem zarówno wielkość jak i udział oporów kształtu stale maleją.



Rys. 3.4. Wpływ smukłości bryły obrotowej na jej opór aerodynamiczny [6]

Prawidłowość ta odnosi się do brył geometrycznych jednorodnych, o gładkiej powierzchni, poruszających się z dala od ziemi w niezakłóconym ośrodku.

W obliczeniach aerodynamicznych rzeczywistego pojazdu szynowego muszą być jednak uwzględnione nierówności jego powierzchni, wpływ toru oraz zakłócenia wywołane obecnością innych pojazdów i obiektów przytorowych.

Należy również pamiętać, że każdy człon pociągu będzie miał inne warunki opływu (a zatem inne udziały  $C_{xc}$  i  $C_{xt}$  i inną wartość sumarycznego współczynnika  $C_x$ ) w zależności, czy jest traktowany oddzielnie jako samodzielny pojazd, czy też jako część składowa pewnej całości jaką jest pociąg.

Ponieważ uwzględnienie tych zagadnień wyłącznie w teoretycznych obliczeniach jest niezmiernie trudne, wykorzystuje się w obliczeniach wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzanych zarówno na rzeczywistych pojazdach, jak i na ich modelach.

### 3.2. Opór tarcia aerodynamicznego

Opór tarcia aerodynamicznego wynika z naprężeń stycznych na skutek lepkości molekularnej płynu. Obliczenia oporów tarcia sprowadzają się do wyznaczenia siły tarcia.

Siła tarcia z jaką jedna strona płytki o długości  $L$  i o szerokości jednostkowej oddziałuje na napływający strumień wynosi:

$$T = C_t \cdot 0,5(\rho v^2) \cdot F = C_t \cdot 0,5(\rho v^2) \cdot L \cdot 1 \quad (3.8)$$

gdzie:  $C_t$  – współczynnik tarcia,  
 $F$  – powierzchnia omywana płytką,  
 $L$  – długość płytki,  
 $\rho$  – gęstość powietrza,  
 $v$  – prędkość przepływu.

Wartości współczynników tarcia w warstwie przyściennej wynoszą:

$$\begin{aligned} C_{it} &= 1,33Re^{(-0,5)} && \text{przepływ laminarny} \\ C_{it} &= 0,074Re^{(-0,2)} && \text{przepływ turbulentny} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Opór tarcia płyty o długości  $L$  i szerokości jednostkowej, składa się z oporu tarcia tej części płyty o długości  $x_{kr}$  gdzie przepływ ma charakter laminarny, i z oporu tarcia na części o długości  $(L - x_{kr})$  gdzie przepływ jest turbulentny.

Tak więc siła tarcia w warstwie przyściennej mieszanej może być wyrażona w postaci:

$$T_t = T_{it} - [T_{it} - T_{it}]_{x_{kr}} \quad (3.10)$$

gdzie:  $T_{it}$  – opór tarcia w warstwie laminarnej,  
 $T_{it}$  – opór tarcia w warstwie turbulentnej,  
 $[T_{it} - T_{it}]_{x_{kr}}$  – różnica oporów między warstwą turbulentną i laminarną na odcinku  $x_{kr}$ .

Po uwzględnieniu długości na których występują poszczególne opory, oraz wiedząc, że gęstość powietrza  $\rho$  i prędkość przepływu  $v$  są stałe, powyższą zależność można przedstawić następująco:

$$C_t = C_{it} - [C_{it} - C_{it}] \cdot \frac{x_{kr}}{L} \quad (3.11)$$

gdzie:  $C_t$  – współczynnik oporu w warstwie mieszanej,  
 $C_{it}$  – współczynnik oporu w warstwie turbulentnej,  
 $C_{it}$  – współczynnik oporu w warstwie laminarnej.

Uwzględniając zależności ( 3.9 ) oraz zależność

$$\frac{x_{kr}}{L} = \frac{Re_{kr}}{Re}, \text{ można ostatecznie napisać:}$$

$$C_t = 0,074Re^{(-0,2)} - [0,074Re^{(-0,2)} - 1,33Re_{kr}^{(-0,5)}] \frac{Re_{kr}}{Re} \quad (3.12)$$

W przypadku opływu wagonów i lokomotyw, a szczególnie złożonych z nich pociągów, biorąc pod uwagę ich kształty i wymiary, można założyć, że na całej długości warstwa przyścienne jest turbulentna, czyli  $x_{kr} = 0$  i  $Re_{kr} = 0$ .

Powyższe zależności dotyczą gładkich płyt, których szorstkość powierzchni wyrażona przez względną grubość ziarna

$$\text{wynosi } \frac{h}{L} \leq 10^{-7}.$$

Jeżeli ta wielkość jest większa, to oprócz oporów tarcia wywołanych lepkością płynu, występują także lokalne mikroopory ciśnieniowe spowodowane przez wystające ziarna. Miarą tych oporów jest współczynnik  $C_f$  znany jako współczynnik oporu powierzchniowego spowodowanego szorstkością.

Współczynnik  $C_f$  jest zależny od rodzaju przepływu i od liczby Reynoldsa, a jego wartość waha się w granicach od 0,001 do 0,01 dla  $Re = 10^6 \div 10^{10}$ .

Współczynnik oporu tarcia w warstwie mieszanej wyraża się zależnością:

$$C_t = C_f \cdot \frac{F}{S} \quad (3.13)$$

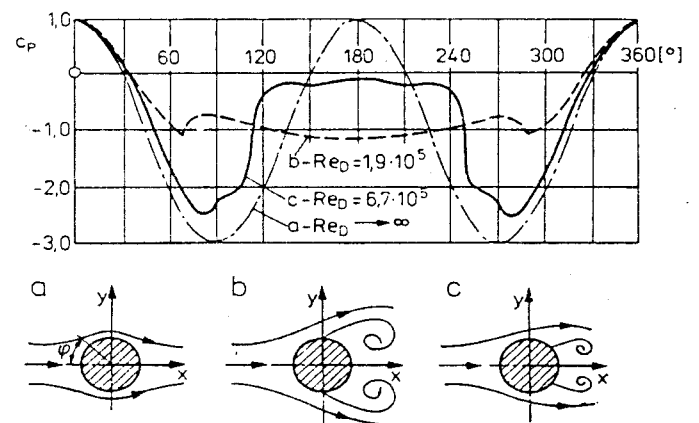
gdzie:  $F$  – powierzchnia omywana pudła (dach, ściany boczne i spód),

$S$  – powierzchnia odniesienia pojazdu (przekrój poprzeczny).

### 3.3 Opór ciśnienia

Niektóre bryły o małym wydłużeniu, np. walec, kula lub poprzecznie ustawiona płyta, wykazują zupełnie inny charakter oporu. Po tylnej stronie takich brył występują przy zewnętrzny przepływie beztarciovym tak silne wzrosty ciśnienia, że dochodzi do odrywania strumienia.

Przykładowo dla walca kołowego rzeczywisty rozkład ciśnienia jest odmienny od teoretycznego przypadku przepływu nielepkiego. Na czołowej stronie walca, rozkład ciśnienia jest podobny do rozkładu dla przepływu beztarciovego. Tymczasem na tylnej stronie walca, zmiany przepływu na skutek odrywania strug powodują powstawanie stref znacznego podciśnienia.



Rys. 3.5. Rozkład ciśnienia i przebieg linii prądu przy opływie walca kołowego przy różnych wartościach  $Re$  [5];  
a – przepływ beztarciovym (nielepki), b – przepływ podkrytyczny, laminarna warstwa przyścienne,  
c – przepływ nadkrytyczny, warstwa przyścienne turbulentna

Opór ciśnienia walca kołowego, jest sumą sił składowych w kierunku przepływu wynikających z rozkładu ciśnienia  $p$ :

$$W_d = \int_0^{2\pi} p \sin \varphi r b d\varphi \quad (3.14)$$

gdzie:  $r$  – promień walca,  
 $b$  – długość walca,  
 $\varphi$  – kąt biegunowy,  
 $p$  – ciśnienie.

Bezpośrednio przy ściankach bryły istnieją też naprężenia styczne, z których wynika opór tarcia  $T$ , jednak na skutek niewielkiego wydłużenia opór ciśnienia znacznie przeważa. Całkowite opory bryły są sumą sił oporu ciśnienia i sił tarcia:

$$W = W_d + T \quad (3.15)$$

Współczynnik  $C_{xc}$  jest to współczynnik oporu ciśnienia (kształtu) i jest on odniesiony do powierzchni czołowej ciała. Wynosi on:

$$C_{xc} = \frac{2W}{\rho v^2 \cdot F} \quad (3.16)$$

gdzie:  $W$  – całkowite opory aerodynamiczne bryły,  
 $\rho$  – gęstość powietrza,  
 $v$  – prędkość opływu,  
 $F$  – powierzchnia czołowa.

W przypadku poruszającego się pojazdu, opór ciśnienia również jest funkcją prędkości, ciśnienia i masy powietrza w każdym punkcie otaczającego pola i w dowolnym czasie. Wyznaczenie oporu ciśnienia polega na określeniu tych parametrów przepływu.

Prędkości jakie osiągają pojazdy lądowe (w tym także pojazdy szynowe) są mniejsze od  $0,5Ma$  (liczba Macha), dlatego powietrze jest traktowane jako płyn nieściśliwy o stałej gęstości.

Wówczas przepływ wokół pojazdu może być określony analitycznie, jeżeli znane są funkcje:

$$\begin{aligned} u &= f_1(x, y, z, t), & v &= f_2(x, y, z, t) \\ w &= f_3(x, y, z, t), & p &= f_4(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (3.17)$$

gdzie:  $u, v, w$  – składowe prędkości wzdłuż osi  $x, y, z$ ,  
 $p$  – ciśnienie,  
 $t$  – czas.

Do określenia niewiadomych  $u, v, w, p$  stosuje się:

- równanie ciągłości:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.18)$$

- równania Navier–Stokes’a (równania różniczkowe płynu lepkiego, nieściśliwego):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \\ + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \\ + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\ + \nu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

Analityczne wyznaczenie oporu ciśnienia pociągu za pomocą tych równań, jest możliwe tylko po dokonaniu następujących założeń upraszczających:

- Kształt przedniej i tylnej części pojazdu jest opływowy i nie następuje oderwanie strug warstwy przyściennej.
- Relatywnie mała prędkość powietrza ( $v < 0,5Ma$ ) sprawia, że wpływ jego ściśliwości jest znikomy, a jego gęstość jest niezmienna ( $\rho = const$ ).
- Przepływ jest ustalony, a więc pochodna cząstkowa wszystkich wielkości charakteryzujących przepływ jest równa zero ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ).

#### 4. Możliwości zmniejszenia oporów aerodynamicznych pojazdów szynowych

##### 4.1. Tworzenie brył obrotowych

W celu zminimalizowania oporu kształtu (ciśnienia), ważne jest utrzymanie przepływu bez oderwania tak długo, jak to możliwe. Niekorzystny aerodynamicznie kształt czoła pociągu powoduje powstawanie niekorzystnych gradientów ciśnienia i odrywanie strug powietrza.

Natomiast korzystne aerodynamicznie kształty generują sprzyjające gradienty ciśnienia. Dzięki temu skłonność do oderwań jest niewielka, a poza tym maleje opór tarcia. Wówczas czołowa powierzchnia pociągu niewiele wnosi do oporu ciśnieniowego.

Duże prędkości opływu i w konsekwencji niskie ciśnienie, mogą nawet wywołać lokalnie na fragmentach nadwozia siłę ciągnącą (ujemny opór).

Korzyści ze stosowania aerodynamicznych kształtów są znaczne. Przykładowo, współczynnik oporu walca może być nawet dwadzieścia razy większy od współczynnika opływowego profilu (w pewnym zakresie  $Re$ ), ponieważ przepływ wokół walca odrywa się w pobliżu maksymalnej grubości, podczas gdy na opływowym profilu przepływ jest „przyklejony” na całej niemal jego długości.

##### 4.2. Zmniejszanie oporu tarcia

Znaczny wpływ na opór aerodynamiczny ma także wydłużenie bryły, zwane też smukłością. Przykładowo dla kształtu kropłowego, minimum całkowitych oporów ruchu występuje

gdy długość  $L$  jest trzykrotnie większa od średnicy  $D$  (rys. 3.4.).

Pociągi są z reguły pojazdami bardzo długimi o wydłużeniu  $\lambda \gg 3$ , zatem w oporach całkowitych dominować będą opory tarcia. W celu ich zminimalizowania, można dążyć do utrzymania laminarnej warstwy przyściennej na jak największej powierzchni nadwozia.

Nie jest to jednak łatwe, ponieważ już przy prędkości 100 km/h przejście z laminarnej do turbulentnej warstwy przyściennej na gładkiej płycie, pojawia się już w odległości ok. 30 cm od krawędzi natarcia.

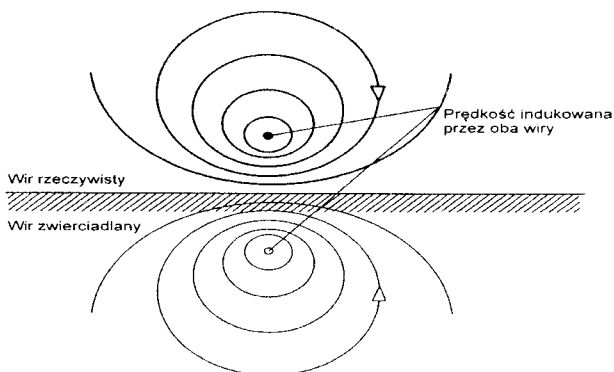
Dlatego łatwiejsze do zrealizowania jest zmniejszenie do minimum liczby szczelin, nieciągłości powierzchni, nierówności i wystających elementów powodujących lokalne zaburzenia przepływu, osłanianie wyposażenia podwagonowego, oraz stosowanie możliwie gładkich powierzchni w celu zmniejszenia mikrooporów ciśnieniowych.

### 4.3. Redukcja oporów wirów krawędziowych

Osiągnięcia aerodynamiki wykazały, iż zmniejszenie siły nośnej zmniejsza także opór, lecz w przypadku pojazdów szynowych i innych pojazdów lądowych, bliskość podłoża silnie wpływa na związki pomiędzy siłą nośną a oporem.

W pobliżu ziemi wiry krawędziowe zostają wytłumione, ponieważ powietrze nie może wirować przez ziemię, a zatem opór wirów krawędziowych w ogóle się nie pojawi.

W rzeczywistych pojazdach, które nie poruszają się tak blisko ziemi, wiry zostają przy ziemi jedynie osłabione i zniekształcone.



Rys. 4.1. Modelowanie wpływu ziemi przez odbicie zwierciadlane [6]

Obecność ziemi może być symulowana, przez użycie dodatkowego wiru w lustrzanym odbiciu. Wir taki oczywiście nie istnieje w rzeczywistości, jednak tego typu symulacja ułatwia obliczenia i upraszcza interpretację fizyczną zjawiska.

Ten dodatkowy wir, musi wirować w przeciwną stronę do wiru rzeczywistego.

Rozkład prędkości w wirze rzeczywistym, zależy od wpływu obu wirów.

Pomiędzy wirami ich wpływy sumują się dając większą prędkość, która jest w rzeczywistości redukowana przez lepkość, natomiast na zewnątrz wirów prędkości wirowania maleją, ponieważ wpływy obydwu wirów częściowo się rekompensują. Ponieważ nadwozie pociągu jest usytuowane w pewnej odległości od ziemi, wiry krawędziowe nie są

stłumione całkowicie, i jeśli istnieje siła nośna lub dociskająca, pojawi się wraz z nią opór wirów krawędziowych.

Siła oporu zależy też od charakteru innych czynników takich jak np. miejsce usytuowania elementów aerodynamicznych takich jak deflektory, spoilery czy owiewki.

### 4.4. Chłodzenie omywanych powierzchni

Już w latach 40-tych ubiegłego stulecia zaobserwowano, że opór płaskiej płyty umieszczonej w tunelu aerodynamicznym zwiększa się znacznie, gdy płyta jest ogrzewana. Dzieje się tak, ponieważ lepkość gazów rośnie wraz z temperaturą. Odbieranie ciepła przez powierzchnię pozwala na lokalne obniżenie lepkości i większe ustabilizowanie przepływu.

W lotnictwie wykorzystuje się paliwo do chłodzenia ważniejszych elementów samolotu.

W przypadku szybkich pociągów rozwiązanie takie nie wchodzi w grę, choćby z tego względu, że są one zasilane energią elektryczną.

Jedyną możliwością jest ograniczenie zbędnego nagrzewania powierzchni, np. przez odpowiednie usytuowanie zespołów, chłodzenie ich, czy zastosowanie odpowiednich lakierów. Ze względu bowiem na oddziaływanie promieni słonecznych, korzystniejsze są jasne kolory.

## 5. Zakończenie

Rozwój transportu kolejowego na świecie zmierza w stronę wzrostu prędkości jazdy. Niedawno za dużą prędkość przyjmowano 200 km/h. Obecnie jest to już 250 km/h.

Przy tak dużych prędkościach, aerodynamika odgrywa dominującą rolę w redukcji całkowitych oporów ruchu. Stawia to nowe wyzwania dla jej rozwoju.

Znaczące postępy w zakresie aerodynamiki kolejowej zostały dokonane począwszy od lat 60-tych ubiegłego stulecia. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu wcześniejszych jej osiągnięć w lotnictwie i motoryzacji, jak również dzięki rozwojowi nowych technik badawczych zarówno eksperymentalnych (tunelowych), jak i opartych na symulacji numerycznej. Stały wzrost prędkości jazdy zarówno pociągów pasażerskich jak i towarowych sprawia, że aerodynamika kolejowa będzie zyskiwać na znaczeniu.

## Literatura

- [1] Gąsowski W.: *Aerodynamika pociągu*. ITE Radom 1998.
- [2] Gąsowski W.: *Podstawy teoretyczne badań aerodynamicznych pojazdów szynowych*. Zeszyty Naukowe P.P. Maszyny Robocze i Pojazdy, nr 39/1993.
- [3] Gąsowski W.: *Problemy polskich pociągów dużej prędkości*. Materiały XII Konferencji Naukowe „Pojazdy Szynowe”. Poznań-Rydzyń 1996.
- [4] Gąsowski W., Krettek O.: *Określanie oporów aerodynamicznych pojazdów szynowych*. Trakcja i Wagony, nr 10/1990.
- [5] Hucho W.H.: *Aerodynamika samochodu*. WKiŁ Warszawa 1988.
- [6] Piechna J.: *Podstawy aerodynamiki pojazdów*. WKiŁ Warszawa 2000.
- [7] Tulińska E.: *Mechanika płynów*. PWN Warszawa 1980.