

Piotr A. Wrzecioniarz, Wojciech Ambroszko, Aleksandra Pindel

Granice oporów ruchu w pojazdach. Opór aerodynamiczny

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.393

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówione zostały granice oraz przykładowe metody minimalizacji oporu aerodynamicznego.

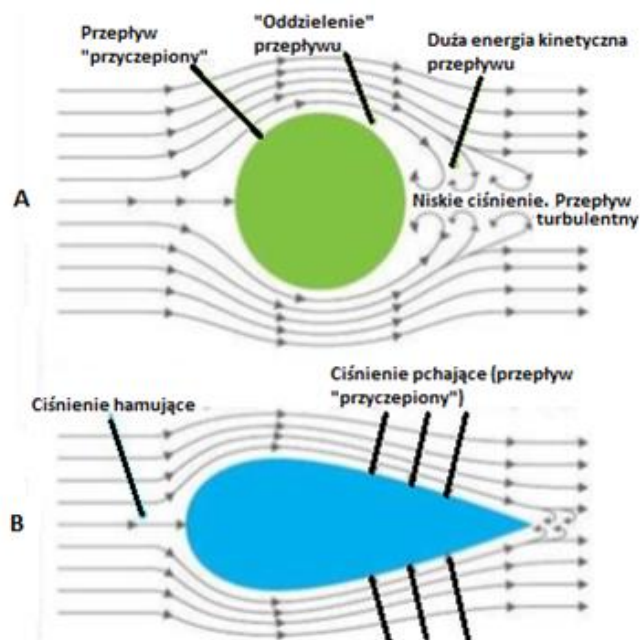
Słowa kluczowe: opór aerodynamiczny, współczynnik oporu aerodynamicznego, samochody osobowe, samochody ciężarowe, pociągi, Hyperloop.

Wstęp

Istotną kwestią w projektowaniu samochodów elektrycznych jest ich zasięg, który zwiększyć można nie tylko poprzez zwiększanie pojemności baterii, ale również poprzez zmniejszanie zapotrzebowania energetycznego pojazdu. Widoczny wpływ na zużycie energii w pojeździe ma opór aerodynamiczny. Celem niniejszego tekstu jest przedstawienie pewnych granic oraz przykładowych metod minimalizacji oporu aerodynamicznego.

1. Opór aerodynamiczny

Opór aerodynamiczny to siła, którą wywiera powietrze na poruszający się w nim pojazd. Siła ta jest skierowana przeciwnie do kierunku ruchu, powodując spowolnienie pojazdu. Istnieją dwie składowe oporu aerodynamicznego. Pierwszą z nich jest opór, który wywiera sprężone powietrze w czołowej części pojazdu, a drugą jest tarcie ośrodka jakie zachodzi na powierzchni pojazdu. Im mniejsza powierzchnia czołowa obiektu tym mniejsza jest składowa oporu aerodynamicznego. W miarę trwania ruchu cząsteczki powietrza z przedniej części zaczynają przemieszczać się po bocznych powierzchniach pojazdu, aż zaczynają w końcu wirować, tworząc przepływ turbulentny. Jeżeli poruszające się ciało ma opływowy kształt i wykazuje się dużą gładkością, przepływ cząsteczek powietrza odbywa się w sposób laminarny po jego powierzchni. Im mniej opływowy kształt i większa chropowatość poruszającego się obiektu, tym przepływ ośrodka ma charakter bardziej turbulentny. Co więcej, warstwy ośrodka znajdujące się w bliskim kontakcie z powierzchnią ciała ulegają znacznej zmianie prędkości na skutek tarcia, niż te bardziej od niej oddalone. Dzieje się tak dlatego, że tarcie powstałe między chropowatą powierzchnią ciała, a cząsteczkami ośrodka ma większy współczynnik, niż tarcie występujące tylko między cząsteczkami ośrodka. Bardziej oddalone warstwy ośrodka wprawiane są w ruch nie przez poruszające się ciało, ale inne warstwy położone bliżej poruszającego się obiektu. Opląnawszy powierzchnie boczne, cząsteczki powietrza odrywają się w końcu od poruszającego się obiektu w sposób turbulentny, tworząc za nim obszar obniżonego ciśnienia. Powoduje to „zasysanie” ciała w kierunku przeciwnym do jego ruchu [7, 14, 16]. Na wielkość strefy obniżonego ciśnienia za pojazdem wpływ ma jego kształt. W celu minimalizacji wyżej wymienionych zjawisk kształt ciała powinien być możliwie najbardziej opływowy, a powierzchnia bardzo gładka [7, 16].



Rys. 1. Wizualizacja oporu aerodynamicznego (A: ciało o wyższym oporze aerodynamicznym, B: ciało o niższym oporze aerodynamicznym) [16].

Podstawowy wzór służący do obliczania oporu aerodynamicznego ma postać:

$$F_d = \frac{1}{2} * c_x * A * \rho * v^2$$

gdzie:

F_d: opór aerodynamiczny [N],

c_x: współczynnik oporu aerodynamicznego,

A: rzut powierzchni przedniej obiektu na płaszczyznę normalną do wektora prędkości [m²],

v: prędkość poruszającego się obiektu [m/s],

ρ: gęstość ośrodka, w którym odbywa się ruch ciała [kg/m³].

Jak wynika z powyższego wzoru czynnikami wpływającymi na obniżenie oporu aerodynamicznego są:

- obniżenie gęstości ośrodka ruchu,
- minimalizacja rzutu czołowej powierzchni na płaszczyznę normalną do wektora prędkości,
- optymalizacja kształtu. Bardziej opływowy kształt charakteryzuje się mniejszym, współczynnikiem oporu aerodynamicznego,
- zmniejszenie chropowatości powierzchni.

Każdemu z tych zagadnień poświęcona jest bogata literatura przedmiotu.

2.Sposoby na obniżanie oporu aerodynamicznego

Istnieje wiele praktycznych sposobów obniżenia oporu aerodynamicznego. W przypadku samochodów ciężarowych jest to np. zaokrąglanie narożników i krawędzi, zmniejszanie otworów chłodnic, unikanie odstających elementów np. lamp i zbiorników, minimalizacja przerw oraz projektowanie łagodnych przejść między np. pojazdem a przyczepą (Rys. 2.a) lub między podwoziem a podłożem, instalacja spoilerów, osłon między przednimi i tylnymi kołami (Rys. 2.b) [7].



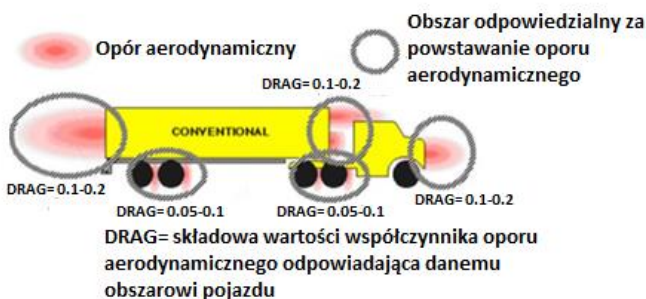
Rys. 2.a - Boczne przedłużenie kabiny [18], **b**- Osłony między tylnymi i przednimi kołami [19].

Podobny efekt można osiągnąć również poprzez zastosowanie pochylonych do wewnątrz spojlerów z tyłu przestrzeni ładunkowej (Rys. 3.b) oraz rozdzielaczy ułatwiających płynny przepływ powietrza w szczelinach (Rys. 3.a) [6].



Rys. 3.a - Rozdzielacz [5], **b**- Pochylone do wewnątrz spojler z tyłu przestrzeni ładunkowej [20].

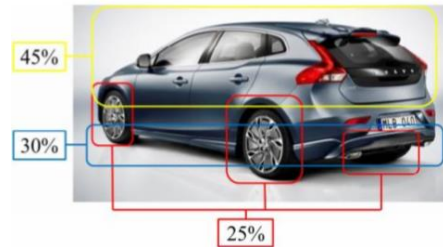
Nawet jazda samochodów blisko siebie, jeden za drugim pozytywnie wpływa na obniżenie oporu aerodynamicznego [9]. Nowe technologie polegają na zastąpieniu zewnętrznych lusterek wbudowanymi kamerami oraz zastosowaniu pneumatycznych dmuchaw wpływających na ciśnienie za pojazdem [14]. Rysunek 4 przedstawia udział poszczególnych obszarów samochodu ciężarowego w tworzeniu oporu aerodynamicznego.



Rys. 4. Wpływ poszczególnych części samochodu ciężarowego na wartość oporu aerodynamicznego [2].

W samochodach osobowych łatwiej jest wpłynąć na opór aerodynamiczny kreując odpowiednią geometrię pojazdu. Proces ten, w języku angielskim, nazywa się „streamlining”. W praktyce jednak samochód o idealnie opływowym kształcie (podobnym do wydłużonej kropli wody, $c_x=0.04$) byłby z powodu długiego ogona niekomfortowy w użytkowaniu. Niewielkie uniesienie tyłu auta względem

przodu wpływa korzystnie na wartość oporu aerodynamicznego. Nawet 30% całego oporu aerodynamicznego w samochodach osobowych jest generowane przez podwozie. Jedną z metod rozwiązania tego problemu jest instalacja odpowiednich paneli umożliwiających dostanie się powietrza pomiędzy elementy podwozia. W celu minimalizacji tarcia powierzchniowego karoseria samochodów powinna być dobrze wypolerowana. Należy również unikać szczelin oraz wystających elementów takich jak klamki [14]. Należy jednak ostrożnie podchodzić do optymalizacji kształtu pojazdu, ponieważ niekiedy może ona prowadzić do zmniejszenia przyczepności pojazdu przy dużych prędkościach. Rysunek 5 przedstawia udział poszczególnych obszarów samochodu osobowego w tworzeniu oporu aerodynamicznego.

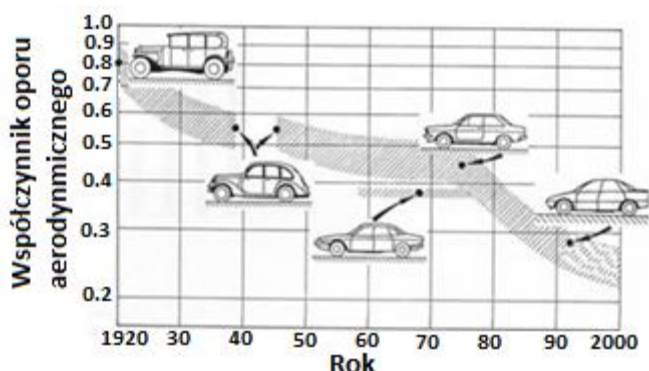


Rys. 5. Wpływ poszczególnych części samochodu osobowego na wartość oporu aerodynamicznego [7].

W przypadku pociągów opór aerodynamiczny może być zminimalizowany poprzez wydłużenie i zaostrenie przodu lokomotywy i tyłu pociągu, minimalizację szczelin, obniżenie wysokości, maksymalne skrócenie długości pojazdu [11] oraz zamknięcie urządzeń wysokiego napięcia w niewystające ponad zarys pociągu klatki [17]. Kształt i wielkość tuneli również mają wpływ na wartość oporu aerodynamicznego generowanego przez pociąg. Im mniejsza przestrzeń między tunelem a pociągiem, tym wartość oporu aerodynamicznego generowanego przez pociąg rośnie. Dzieje się tak m.in. na skutek zwiększonego ciśnienia na czole pociągu oraz dodatkowej powierzchni tarcia na ścianach tunelu. W warunkach bardzo małej przerwy między pociągiem, a tunelem występują tak zwany „efekt strzykawki”, w którym pociąg dosłownie przepycha powietrze wzdłuż tunelu. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne. Tunele prostokątne wykazują się gorszymi właściwościami aerodynamicznymi niż np. tunele okrągłe. Tunele z zaokrąglonym samym sklepieniem mają natomiast najmniej negatywny wpływ na wytwarzany przez pociąg opór aerodynamiczny. Pomimo możliwości minimalizowania negatywnego wpływu tunelu na aerodynamikę pociągów, każdy pociąg będzie podlegał zwiększonemu oporowi aerodynamicznemu w tunelu, w porównaniu do pociągu poruszającego się w wolnej przestrzeni [1]. Istnieje jednak sytuacja, w której przejazd tunelem wywołuje relatywnie niewielkie straty aerodynamiczne, a nawet może zadziałać na korzyść poruszającego się w nim pojazdu. W przypadku znacznego obniżenia ciśnienia w tunelu [17], gęstość ośrodka spada, a przez to spada wartość oporu aerodynamicznego. W tym przypadku maleje też wpływ „efektu strzykawki”, jednak nie da się go całkowicie wykluczyć, zwłaszcza przy ogromnych prędkościach np. sonicznych.

3.Zmiany oporu aerodynamicznego na przestrzeni lat

Na rysunku 5 przedstawiono jak zmieniała się wartość współczynnika oporu aerodynamicznego komercyjnych samochodów osobowych na przestrzeni lat.



Rys. 5. Średni spadek wartości współczynnika oporu aerodynamicznego na przestrzeni lat [4].

W tabeli 1 pokazano minimalną osiągniętą w nowoczesnych, komercyjnych samochodach osobowych wartość współczynnika oporu aerodynamicznego.

Tabela 1. Współczynniki oporu aerodynamicznego dla wybranych pojazdów [11][15].

Model pojazdu	Współczynnik oporu aerodynamicznego
Nowoczesna szybka kolej	0.15-0.26
Mercedes-Benz S-Class	0.24
Tesla model S	0.24
Volkswagen XL1	0.189
Toyota Prius	0.25

Aktualna wartość współczynnika oporu aerodynamicznego autobusu wynosi $0,6 \pm 0,8$, a samochodu ciężarowego $0,8 \pm 1$ [13]. Pojazdy prototypowe, eksperymentalne i niekonwencjonalne mają oczywiście te współczynniki znacznie niższe.

Podsumowanie

Na przestrzeni lat wartość współczynnika oporu aerodynamicznego w samochodach osobowych spadła z 0,8 do średnio 0,25 [4]. Rekordowo niski współczynnik oporu aerodynamicznego został osiągnięty w modelu Volkswagen XL1 i wynosi 0.189 [15]. Pomimo postępu w dziedzinie minimalizowania wartości oporu aerodynamicznego w pojazdach, istnieje nadal duży potencjał do osiągania coraz lepszych wyników, które przyczynią się nie tylko do zmniejszenia zapotrzebowania energetycznego pojazdów, ale również do umożliwienia pojazdom poruszanie się w dużo wyższych zakresach prędkości. Przykładem może być wspomniana wcześniej szybka kolej poruszająca się w tubie z obniżonym ciśnieniem. Zauważalne obecnie rewolucyjne zmiany obejmują układy napędowe z rozwiązaniami hybrydowymi, elektrycznymi, a także z wykorzystaniem wodoru. Nowe i odnawiane koncepcje poruszania się w tunelach o obniżonym ciśnieniu [17], doprowadzą także do powstania nowych rozwiązań w zakresie aerodynamiki. Artykuł niniejszy zwraca uwagę na konieczność powrotu do podstaw wiedzy dotyczącej aerodynamiki i wykorzystaniu jej przy budowaniu pojazdów przyszłości.

Nowe pojazdy miejskie, środki transportu zbiorowego, kapsuły przemieszczane na znaczne odległości będą posiadały rozwiązania różniące się od obecnie znanych. Należy spodziewać się dalszego znacznego postępu w zakresie obniżania oporów aerodynamicznych wszelkiego rodzaju pojazdów.

Bibliografia:

1. Biswas P., Ponnanna N., Jain Apoorva, Aerodynamic Design and Optimisation of Maglev Trains, Graduate Project, Manipal University.

- Curry T., Liberman I., Hoffman A., Lowell D., Aerodynamic Drag & Rolling Resistance from Heavy-Duty Trucks: Summary of Available Technologies & Applicability to Chinese Truck's, M.J, October 2012
- Orellano A., Aerodynamic of High Speed Trains, Vehicle aerodynamic lecture, Stockholm, KTH, may 2010.
- Lajos T., Basic of vehicle aerodynamics, Budapest University of Technology and Economics, Department of Fluid Mechanics, 2002
- McCallen R., DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag through Joint Experiments and Computations, Work performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by the University of California, Lawrence Livermore National Laboratory under Contract W-7405-ENG-48.
- Wrzecioniarz P., Ambroszko W., Górniak A., Energy efficiency design of powertrain and body, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
- Nowak A., Praca magisterska, Podstawowe opory ruchu w pojazdach przyszłości, wykonana pod kierunkiem dr hab inż. Piotra Wrzecioniarza prof. nadzw. PW, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Maj 2016.
- Ambroszko W., Wrzecioniarz P., Postęp w budowie pojazdów w świetle opinii rzeczoznawczych. Praca zbiorowa., Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
- Browand F., Reducing Aerodynamic Drag and Fuel Consumption, Aerospace and Mechanical Engineering, Viterbi School of Engineering University of Southern California, for Global Climate and Energy Project Workshop on Advanced Transportation, October 2010-2011, Stanford University.
- Światowe trendy w ograniczaniu emisji samochodowej i ich wpływ na rozwój napędów pojazdów, paliw, olejów silnikowych i metod badawczych – znaczenie globalne nowych regulacji ograniczania emisji WLTP i RDE – podsumowanie 6th International Exhaust, „Przegląd techniczny”, 14.10.2018.
- Bahn AG, Heine Ch, Matschke G, The Influence of the Nose Shape of High Speed Trains on the Aerodynamic Coefficients.
- Wrzecioniarz P., Wstęp do metodologii projektowania samochodów oszczędnych. KONES 81, Wrocław-Rydzyna, 1981.
- http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html, May 2016
- <http://illumin.usc.edu/252/drag-reduction-the-pursuit-of-better-fuel-economy/>, May 2016.
- <http://motorburn.com/2014/01/12-of-the-most-aerodynamic-cars-in-production-right-now/>, May 2016
- <http://sciencelearn.org.nz/Science-Stories/Cycling-Aerodynamics/ Causes-of-aerodynamic-drag>, May 2016 .
- http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf, May 2016.
- https://www.google.pl/search?q=cab+extenders&client=opera&hs=GkH&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiOuYWQ1rvMAhVCWSwKHaVQBqgQ_AUIBygB&biw=1745&bih=882#imgrc=FfGSEgfn5ntnfM%3A, May 2016.
- https://www.google.pl/search?q=cab+extenders&client=opera&hs=GkH&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiOuYWQ1rvMAhVCWSwKHaVQBqgQ_AUIBygB&biw=1745&bih=882#tbm=isch&q=truck+skirt&imgrc=PyS_NV0-ckOubM%3A, May 2016.
- https://www.google.pl/search?q=cab+extenders&client=opera&hs=GkH&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiOuYWQ1rvMAhVCWSwKHaVQBqgQ_AUIByg

B&biw=1745&bih=882#bm=isch&q=truck+skirt&imgc=ZYU-H3ILKUcKIM%3A, May 2016.

Limitations of vehicle movement resistances: aerodynamic resistance

In the paper limitations and exemplary methods of aerodynamic drag force minimization in different kinds of vehicles are described. Changes of value of aerodynamic drag coefficient during years are presented. Conclusions about future possible new solutions in different kinds of vehicles are formulated.

Keywords: aerodynamic resistance, aerodynamic drag coefficient, cars, trucks, trains, Hyperloop.

Autorzy:

dr hab inż. **Piotr A. Wrzecioniarz** prof. nadzw. PWr – Politechnika Wroclawska, piotr.wrzecioniarz@pwr.edu.pl,
dr inż. **Wojciech Ambroszko** – Politechnika Wroclawska, wojciech.ambroszko@pwr.edu.pl,
mgr inż. **Aleksandra Pindel** – Politechnika Wroclawska, Aleksandra.pindel@pwr.edu.pl.