

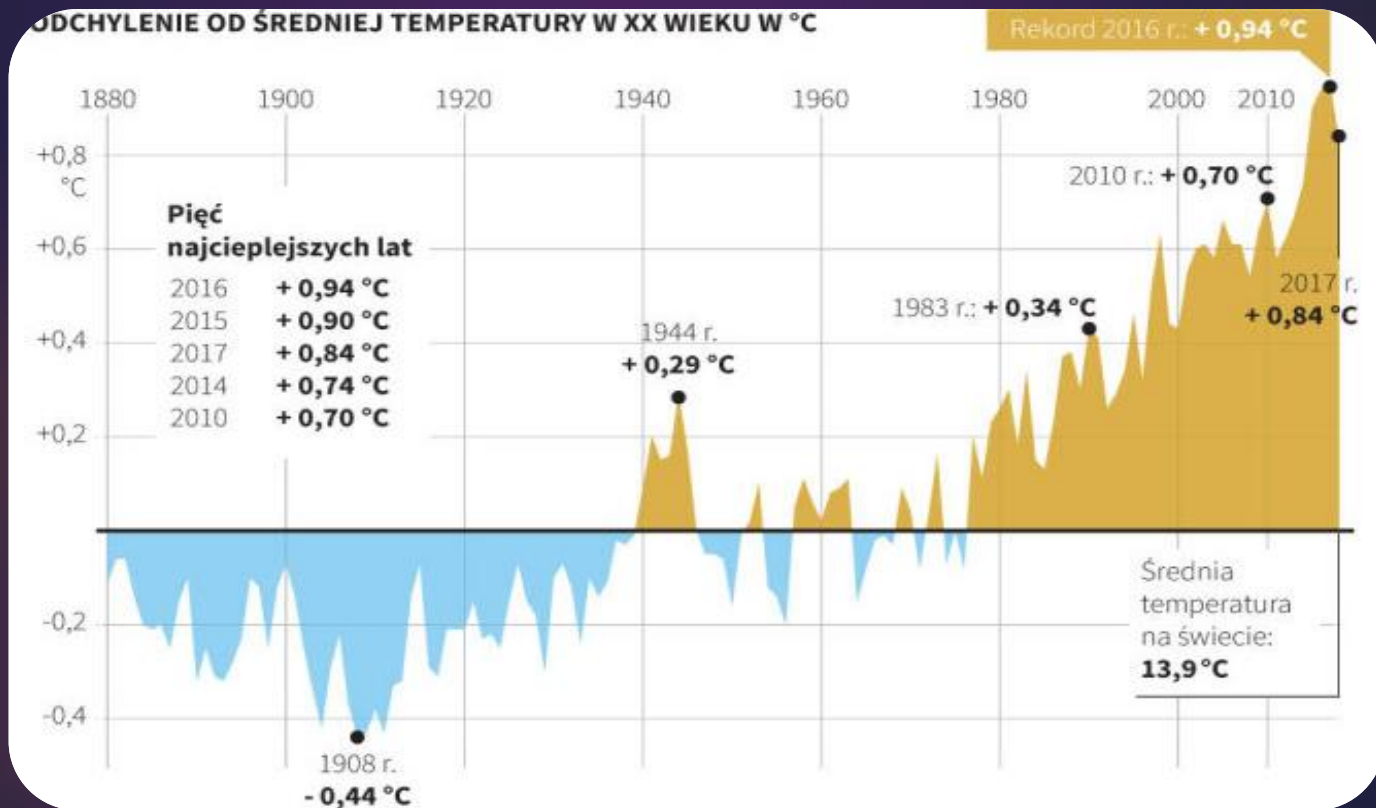


Aerodynamika pojazdów o urwistym kształcie nadwozia



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIE PALIWA

W związku ze stale obserwowanym wzrostem średniej temperatury na powierzchni planety i ryzykiem nastąpienia nieodwracalnych zmian klimatu, ograniczenie emisji CO₂ wynikającej z działalności człowieka jest jednym z kluczowych kierunków działań obecnej polityki klimatycznej.

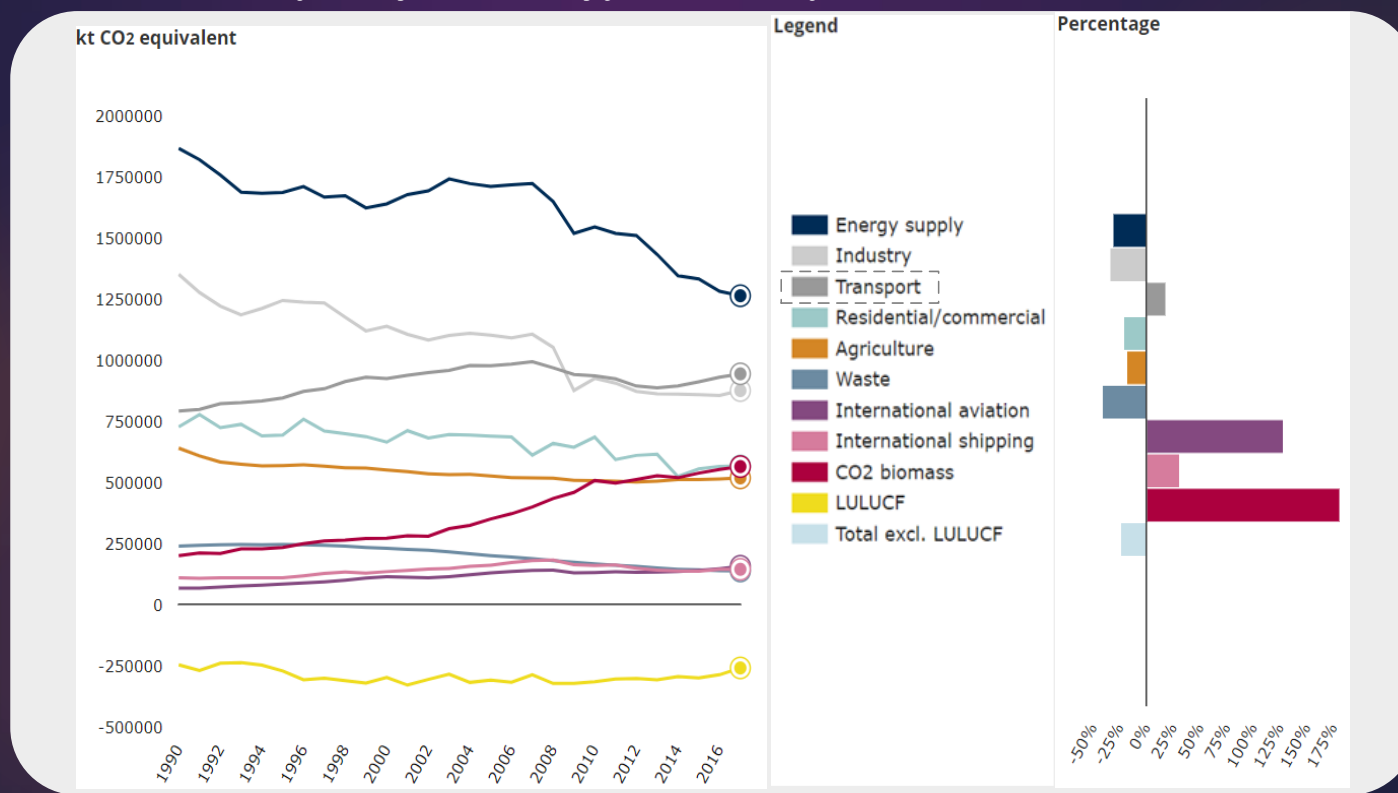


Zmiana średniej temperatury na powierzchni planety w latach 1880-2020, NOAA.



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIĘ PALIWA

Ogólnie rozumiany transport jest obecnie odpowiedzialny za 21,7% całkowitej emisji CO₂ w Unii Europejskiej. Ponad 98% samochodów ciężarowych w UE napędzanych jest silnikami spalinowymi zasilanymi olejem napędowym i pomimo ciągłej poprawy efektywności zużycia paliwa, poziom emisji CO₂ z roku na rok wykazuje tendencję wzrostową.



Zmiana emisji CO₂ na przestrzeni lat 1990-2016 z podziałem na sektory, ACEA.



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIE PALIWA

Spalenie 1 litra oleju napędowego powoduje powstanie 2640 gramów CO₂, co w przypadku współczesnego zestawu ciągnik siodłowy – naczepa poruszającego się z prędkością 90 km/h prowadzi do emisji około 82,8 kg CO₂ na każde pokonane 100 km. We współczesnych samochodach ciężarowych, w zależności od cyklu jazdy, opór aerodynamiczny jest odpowiedzialny za 40% do 60% ogółu zużywanego paliwa, a tym samym ma bezpośredni wpływ na poziom emisji CO₂. Poza aspektem ekologicznym związanym z ograniczeniem emisji CO₂, ograniczenie zużycia paliwa pociąga za sobą również zmniejszenie poziomu emisji wszystkich pozostałych szkodliwych substancji, takich jak węglowodory, tlenki azotu, tlenki siarki, sadza i inne substancje stałe oraz ciężkie związki organiczne w fazie ciekłej, częściowo zamiennie określane jako cząstki stałe PM. Jest to niezwykle istotny czynnik gdyż WHO (World Health Organization) szacuje, że każdego roku około 7 milionów ludzi umiera z powodu zanieczyszczenia powietrza. Coraz bardziej surowe normy dotyczące ograniczenia emisji spalin stanowią nieustanne wyzwanie dla konstruktorów, szczególnie w sektorze pojazdów dostawczych, ciężarowych i autobusów. Zgodnie z danymi ACEA (European Automobile Manufacturers' Association), poza rozwojem napędów jedynym z głównych kierunków rozwoju tego sektora, prowadzącym do zmniejszenia zapotrzebowania na energię napędową pojazdu, a tym samym ograniczenia emisji CO₂ jest rozwój aerodynamiki.



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIE PALIWA

Rosnące ceny paliw, stale zmniejszające się naturalne zasoby ropy naftowej oraz coraz bardziej rygorystyczne normy dotyczące emisji spalin prowadzą do coraz silniejszego uwzględniania aerodynamiki pojazdów, w tym również pojazdów użytkowych takich jak autobusy i samochody ciężarowe. Bez względu na to z jaką prędkością porusza się dany pojazd, zawsze część mocy napędowej pojazdu zostaje utracona na pokonanie oporów aerodynamicznych, które bezpośrednio przekładają się na zużycie paliwa.

Siła oporu aerodynamicznego pojazdu zależy głównie od rozkładu ciśnień na powierzchni opływającego pojazdu (tzw. opór ciśnieniowy), sił tarcia (opór tarcia powierzchniowego wywołany lepkością) oraz oporu indukowanego, który wynika z istnienia za pojazdem trójwymiarowych struktur wirowych.

Siłę oporu aerodynamicznego pojazdu można ogólnie przedstawić za pomocą równania:

$$F_x = \frac{1}{2} V^2 \rho A c_D$$

gdzie:

A – powierzchnia czołowa pojazdu [m²],

ρ – gęstość powietrza [kg/m³],

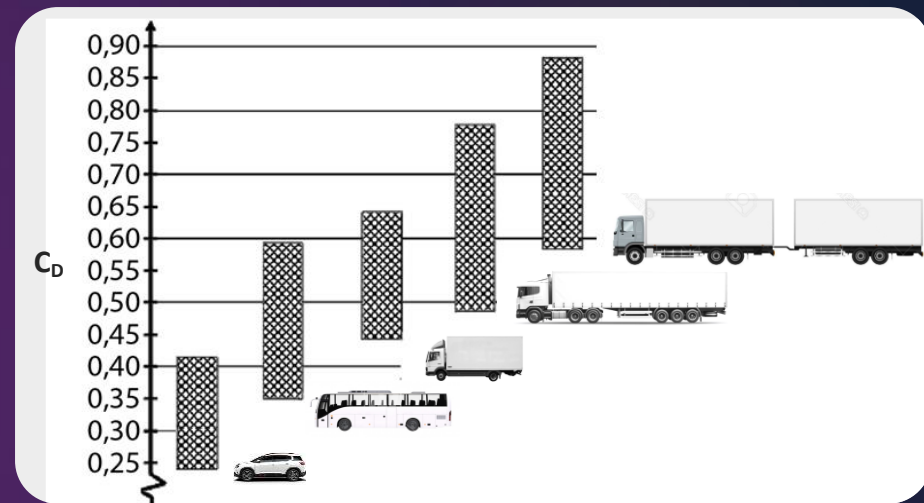
V – prędkość pojazdu [m/s],

c_D – współczynnik oporu aerodynamicznego.



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIĘ PALIWA

Współczynnik oporu aerodynamicznego jest wyznaczany doświadczalnie, a jego wartość zależy od geometrii pojazdu i określa jego doskonałość aerodynamiczną. Im niższa wartość współczynnika oporu, tym niższa wartość siły oporu aerodynamicznego. Samochody użytkowe charakteryzuje duży rozrzut wartości współczynnika oporu, co bezpośrednio wynika z różnorodności ich konstrukcji i przeznaczenia. W porównaniu do samochodów osobowych, autobusy osiągają półtorakrotnie, a zespoły pojazdów i ciągniki siodłowe nawet dwukrotnie wyższą wartość c_D .



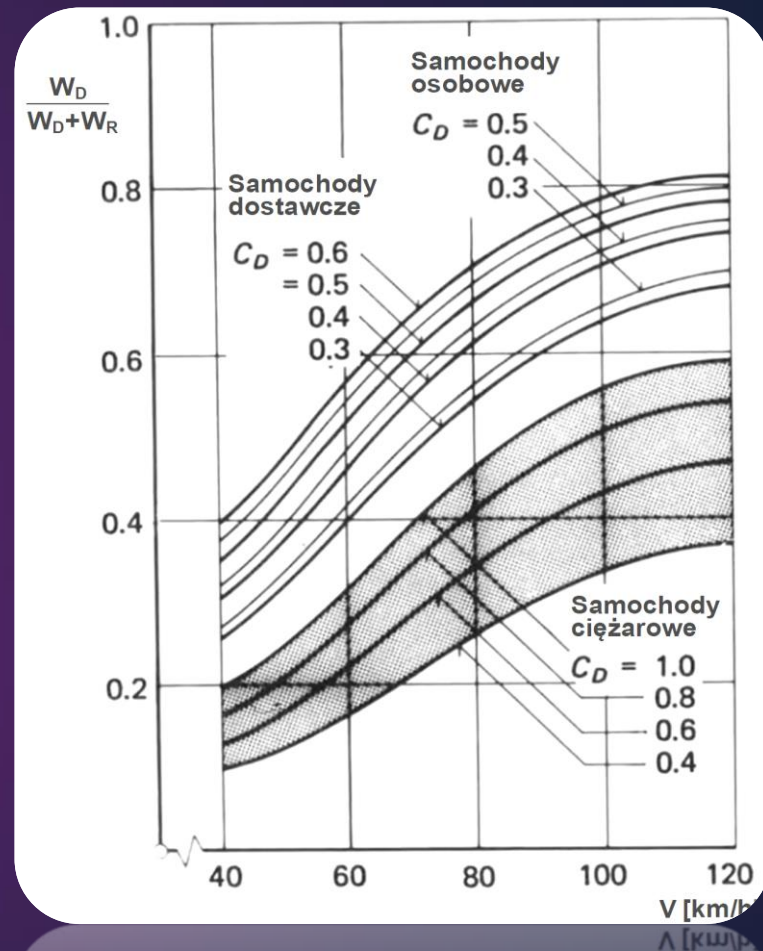
Zakresy wartości współczynników oporu aerodynamicznego współczesnych pojazdów, W. H. Hucho.



OPÓR AERODYNAMICZNY JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA ZUŻYCIE PALIWA

Podczas jazdy ze stałą prędkością po nawierzchni płaskiej (bez zmian wysokości), całkowity opór ruchu pojazdu składa się z oporu powietrza i oporu toczenia. Wzajemny udział tych oporów jest uzależniony od prędkości pojazdu.

Przy założeniu stałej prędkości na poziomie 90 km/h, opór aerodynamiczny współczesnych zestawów pojazdów ciągnik siodłowy - naczepa sięga 45% całkowitych oporów ruchu, a w przypadku samochodów dostawczych nawet 65%. Z badań przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych przez MAN Truck & Bus AG wynika, że dla prędkości średniej 88 km/h na 15-kilometrowym odcinku autostrady Berlin – Hamburg, ze wszystkich oporów samochodu ciężarowego opór aerodynamiczny miał największy wpływ na zużycie paliwa. Po uwzględnieniu oporów wynikających z przyśpieszania, zużycia energii przez systemy pokładowe, strat mechanicznych w układzie napędowym, oporów związanych ze zmianą wysokości i toczenia, opór aerodynamiczny był odpowiedzialny za 37% zużywanego paliwa. Bez względu jednak na to z jaką prędkością porusza się dany pojazd, opór aerodynamiczny zawsze ma bezpośredni wpływ na poziom zużycia paliwa i jest szczególnie istotny przy dużych prędkościach przejazdowych.

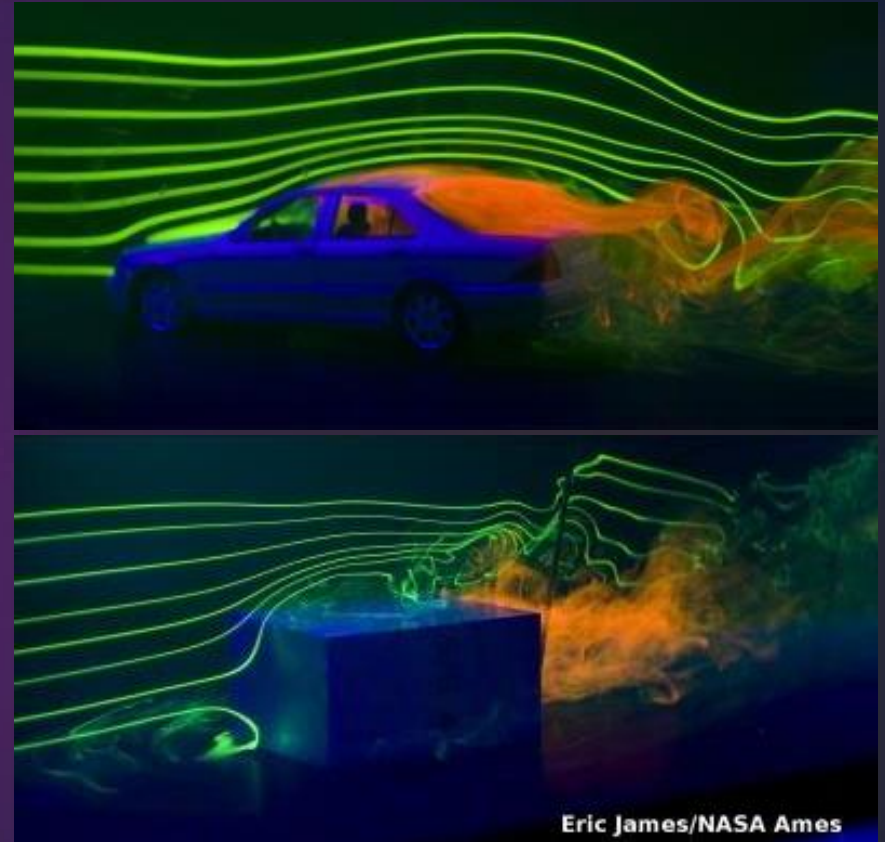


Udział oporu powietrza W_D w całkowitym oporze W_D+W_R samochodów, Jessen L. J., Emmelmann H. J.



CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU OPORU INDYKOWANEGO

Podczas ruchu pojazdu, prędkość powietrza w poszczególnych strefach nadwozia, ulega nieustannym zmianom. Powietrze nie zawsze podąża za kształtem ciała, co powoduje powstawanie niestabilnych obszarów oraz zjawiska oderwania przepływu. Obszary te są szczególnie widoczne w śladzie aerodynamicznym za poruszającym się pojazdami o tzw. „wertykalnym” lub „pełnym” zakończeniu tylnej części nadwozia.

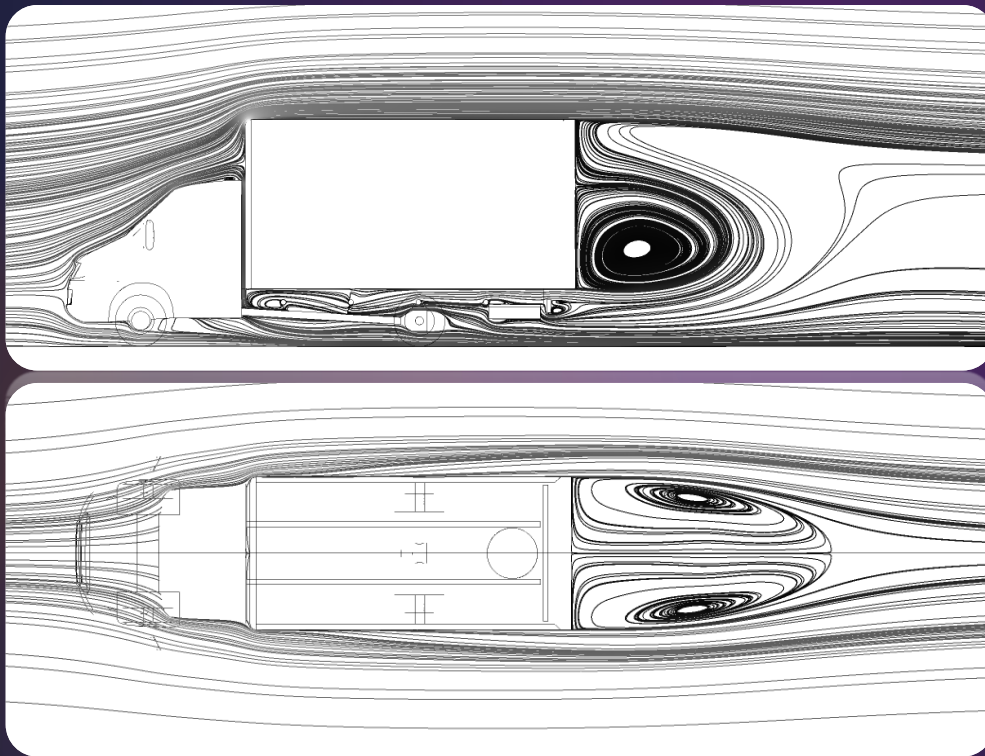


Przykłady stref wirowych za opływającymi obiektami o różnej geometrii, NASA.

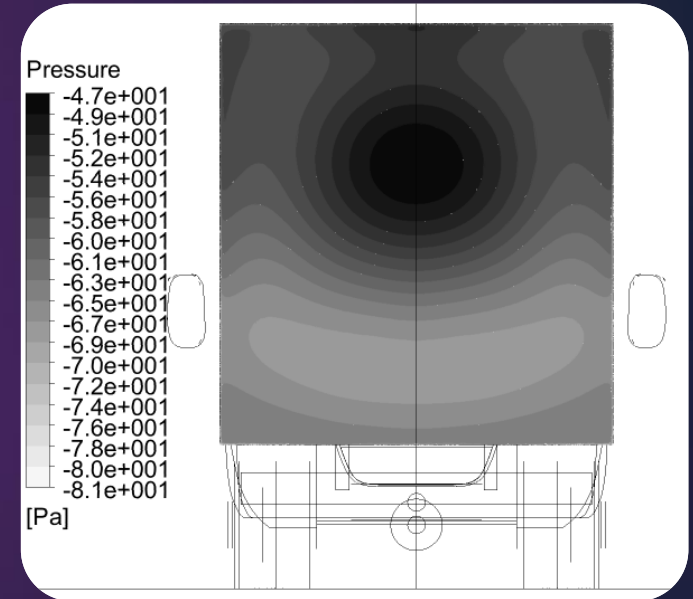


CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU OPORU INDYKOWANEGO

Strefa obniżonego względem otoczenia ciśnienia jest wynikiem zjawisk trójwymiarowego oderwania przepływu i w połączeniu ze stosunkowo dużą powierzchnią tylną pojazdu, prowadzi do powstania jednego z głównych składników jego całkowitego oporu aerodynamicznego.



Rozkłady linii prędkości w otoczeniu samochodu ciężarowego z zabudową kontenerową



Rozkład ciśnienia statycznego na tylnej części nadwozia samochodu ciężarowego z zabudową kontenerową



CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU OPORU INDYKOWANEGO

Strefa obniżonego względem otoczenia ciśnienia jest wynikiem zjawisk trójwymiarowego oderwania przepływu i w połączeniu ze stosunkowo dużą powierzchnią tylną pojazdu, prowadzi do powstania jednego z głównych składników jego całkowitego oporu aerodynamicznego. Opór indukowany, wynikający ze strefy obniżonego ciśnienia za pojazdem, przy prędkości 90 km/h odpowiada za 25% całkowitego oporu aerodynamicznego zestawu ciągnik siodłowy – naczepa (przeгляд literatury). Zgodnie z danymi VECTO, narzędzia symulacyjnego opracowanego przez Komisję Europejską do określania emisji CO₂ i zużycia paliwa przez pojazdy o dużej ładowności, średnie zużycie paliwa współczesnych zestawów ciągnik siodłowy–naczepa w cyklu pozamiejskim wynosi 31,8l/100 km. Zgodnie z danymi firmy transportowej, z którą autorzy prowadzą współpracę, średnie spalanie 24 tonowego zestawu ciągnik siodłowy–naczepa, poruszającego się po płaskim terenie z pełnym załadunkiem i ze stałą prędkością 90km/h wynosi 28,5 l/100km. Jeśli przyjmiemy udział oporu aerodynamicznego w całkowitych oporach pojazdu na poziomie jedynie 37%, składowa oporu wynikająca ze strefy wirów za pojazdem będzie odpowiedzialna za zużycie 2,64 l/100 km.



Wpływ oporu indukowanego na zużycie paliwa.



CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU OPORU INDYKOWANEGO

W przypadku współczesnych samochodów dostawczych z zabudową kontenerową lub skrzyniową, opór indukowany odpowiada za blisko 30% ogółu oporu aerodynamicznego (badania własne), co w warunkach teoretycznych przekłada się na zużycie paliwa na poziomie 1,87 l/100 km.



Przebieg
100 000 km

Średnie zużycie paliwa
10 l/100 km

Opór indukowany
1,87 l/100 km

Strata paliwa
1 870 l

Wpływ oporu indukowanego na zużycie paliwa.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

Istnieje wiele metod ograniczania oporu aerodynamicznego pojazdów ale zarówno samochody dostawcze, ciężarowe, jak i autobusy należą do grupy tzw. pojazdów nieaerodynamicznych. Nadwozia tych pojazdów nie można poddawać znaczącym modyfikacjom, całkowicie zmieniającym kształt nadwozia np. poprzez znaczące wydłużone lub zaokrąglone tylnej części nadwozia, ponieważ oczekuje się od nich odpowiedniej funkcjonalności przy jednoczesnym zachowaniu gabarytów regulowanych przez prawo. Obecnie w celu ograniczenia oporu aerodynamicznego samochodów dostawczych, ciężarowych oraz autobusów stosuje się głównie modyfikacje w przedniej części nadwozia. Popularnym rozwiązaniem są deflektory powietrza, montowane w przedniej części kabiny ciągników siodłowych, których zadanie polega na ułatwieniu odpływu spiętrzonych molekuł powietrza na części czołowej pojazdu do jego strefy bocznej. Dużą popularnością cieszą się również owiewki – zazwyczaj montowane na dachu kabiny pojazdu, w którym zabudowa jest znacznie wyższa od wysokości kabiny. Coraz częściej stosuje się również rozwiązania zmniejszające opór powietrzny wynikający z wpływu ruchu kół na strumień opływającego pojazd powietrza oraz boczne osłony powietrzne.



Przykładowy deflektor powietrzny, stosowany seryjnie w ciągniku siodłowym Mercedes Actros.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

Jedną z ogólnych metod zapobiegania zjawisku oderwaniu przepływu za poruszającym się pojazdem jest specjalne kształtowanie nadwozia pojazdu w celu zapewnienia strudze opływającej pojazd czasu na ustabilizowanie ciśnienia, a tym samym wypełnienie „pustej” strefy za poruszającym się pojazdem.

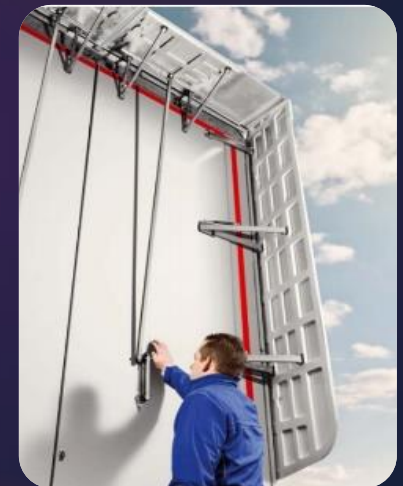
Takie rozwiązanie umożliwia cząsteczkom powietrza stopniowe wyrównywanie ciśnienia jednocześnie unikając gwałtownej pulsacji za pojazdem. Profilowanie tylnej części nadwozia w tzw. „ogon” jest od dawna widoczne w pojazdach sportowych, a od niedawna znajduje również coraz szersze zastosowanie w samochodach ciężarowych. W tym przypadku ogon stanowią rozkładane klapy, zamontowane na tylnej części naczepy lub zabudowy pojazdu. Jest to najbardziej popularna forma ograniczania oporu indukowanego, jednak skuteczność tej metody w ograniczaniu zużycia paliwa zawiera się w zakresie 1-5% na rynku Stanów Zjednoczonych oraz jedynie 1-3% na rynku europejskim, co jest skutkiem ograniczeń prawnych dotyczących długości dobudowywanych urządzeń aerodynamicznych.



Przykład „sztucznego” ogona dobudowanego do struktury istniejącej naczepy, TrailerTail.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH



System OptiFlow produkowany przez WABCO



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH



System SmartTail i WindTamer produkowane przez ATS LCC

METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH



Systemy firmy Aerodvolution, Booster-Tail (strona lewa), Booster-Tail GTX (środek) oraz Booster-Tail Inflatable (strona prawa).



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH



Rear Wing-System firmy Betterflow.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

Innym rozwiązaniem dostępnym obecnie na rynku, które w założeniu ma ograniczać opór indukowany, są zawirowywacze powietrza montowane w tylnej części nadwozia, tuż przed krawędzią, na której następuje oderwanie przepływu. Pomimo istnienia na rynku firm oferujących takie rozwiązania, badania naukowe wskazują na ich skuteczność w obniżaniu zużycia paliwa na poziomie poniżej 1%.



Zawirowywacze powietrza EcoFins



KONCEPCJE NACZEP PRZYSZŁOŚCI

Firma Daimler zaprezentowała koncepcję obejmującą modyfikacje istniejących naczep samochodów ciężarowych. Zespół inżynierów zapewnia, że dzięki poprawie aerodynamiki, całkowity opór powietrza naczepy został zmniejszony o 18%, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa o 4,5%. Podobny kierunek rozwoju naczep zaprezentowała firma Renault Trucks, w trakcie projektu badawczego OPTIFUEL LAB.



Modyfikacje aerodynamiczne naczepy Schmitz opracowane przez Daimler Trucks (strona lewa) oraz naczepa OPTIFUEL LAB (strona prawa).



KONCEPCJE NACZEP PRZYSZŁOŚCI

Inne podejście do konstrukcji naczep przedstawiła firma Don-Bur, prezentując naczepę Teardrop™. Zgodnie z danymi producenta, zmiana w podejściu do konstrukcji naczep pozwoli na oszczędność blisko 11% paliwa.

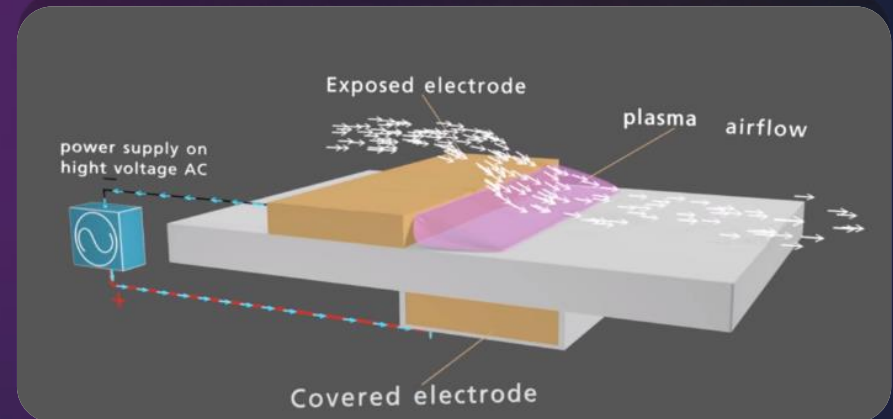


Naczepa Teardrop™ firmy Don-Bur.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

Próby ograniczenia oporu aerodynamicznego samochodów użytkowych są nieustannie podejmowane przez naukowców na całym świecie, czego efektem są liczne patenty i publikacje naukowe. Jednym z przykładów rozwiązań opracowanych w minionych latach jest Plasma Stream, opracowany na Uniwersytecie w Notre Dame. Rozwiązanie opierało się na wykorzystaniu generatora plazmy do kierowania strumieniem powietrza opływającego pojazd. Na dedykowanej stronie internetowej została umieszczona informacja o skuteczności w obniżaniu zużycia paliwa samochodów ciężarowych na poziomie 10%. Pomimo upływu ponad pięciu lat, brak jednak niezależnych wyników badań i doniesień o komercjalizacji.



System aktywnego sterowania przepływem Plasma Stream.



METODY OGRANICZANIA OPORU AREODYNAMICZNEGO POJAZDÓW UŻYTKOWYCH

Prace badawcze nad ograniczeniem oporu aerodynamicznego prowadzone są nieustannie przez naukowców i prywatne firmy na całym świecie. Pomimo istnienia na rynku urządzeń ograniczających opór aerodynamiczny samochodów ciężarowych, większość dostępnych rozwiązań dotyczy poprawy właściwości aerodynamicznych pojazdów w ich strefie czołowej i podwoziowej. Rynek rozwiązań ograniczających składową całkowitego oporu aerodynamicznego, wynikającą ze spadku ciśnienia za pojazdem jest mocno ograniczony i w zasadzie sprowadza się jedynie do kilku rozwiązań technologicznych o niskiej skuteczności. W związku z blisko 30% udziałem oporu indukowanego w całkowitym oporze aerodynamicznym pojazdu, zasadne jest dążenie do opracowania rozwiązania, które będzie skutecznie ograniczać tę składową oporu, a tym samym zapotrzebowanie na energię napędową i emisję CO₂. Należy również pamiętać, że niezależnie od rodzaju napędu, opór aerodynamiczny zawsze będzie mieć wpływ na poziom zużycia energii, niezbędnej do napędu pojazdu. Niezależnie więc od przyszłego kierunku rozwoju napędów, badania nad aerodynamiką pojazdów stanowią jedno z kluczowych zagadnień i wyzwań branży motoryzacyjnej.



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

Aerodynamika pojazdów o urwistym kształcie nadwozia

POLITECHNIKA LUBELSKA
**Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów
i Napędów Lotniczych**
prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker
mgr inż. Mateusz Paszko

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

