



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF

AERODYNAMICKÉ PARAMETRY NÁKLADNÍCH VOZIDEL

TRUCK AERODYNAMIC PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JOSEF ŠILAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. PETR HEJTMÁNEK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Josef Šilar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamické parametry nákladních vozidel

v anglickém jazyce:

Truck aerodynamic parameters

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoření souhrnného přehledu konstrukčních řešení pro optimalizaci aerodynamických parametrů nákladních vozidel, zejména aerodynamického koeficientu čelního odporu, které ovlivňují jízdní vlastnosti těchto vozidel.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis základních termínů z oblasti aerodynamiky motorových vozidel
2. Rešerše koeficientů aerodynamického odporu nákladních vozidel
3. Vytvoření přehledu konstrukčních prvků snižujících aerodynamický odpor nákladních vozidel
4. Porovnání aerodynamických parametrů nákladních a osobních vozidel

Seznam odborné literatury:

- [1] VLK, F. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6, Nakladatelství VLK, Brno 2000
- [2] HUCHO, W-H.: Aerodynamics of road Vehicles. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 07-680-0029-7.
- [3] KATZ, J.: Race Car Aerodynamics, 2006, ISBN 0-8376-0142-B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Hejtmánek


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 6.11.2012

L.S.



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je zachycení a popis termínů z oblasti aerodynamiky, za účelem pochopení problematiky aerodynamiky vozidel. Je zde vytvořen souhrnný přehled konstrukčních prvků snižujících aerodynamický odpor nákladních automobilů a metod zjišťování aerodynamických parametrů. Práce také zahrnuje rozdíl zmiňovaných parametrů u osobních a nákladních vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

vzdušný odpor, aerodynamika vozidel, nákladní vozidla, aerodynamické parametry

ABSTRACT

The main goal of this bachelor's work is to depict and describe terms from the aerodynamics field in order to understand the problem of aerodynamics of the vehicles. Here is created overall view of constructive elements that lower aerodynamic resistance of vehicles and methods of survey of aerodynamic parameters. The work also contain the difference of mentioned parameters of suburban and truck cars.

KEYWORDS

drag, aerodynamics of road vehicles, truck, aerodynamic parameters



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠILAR, J. *Aerodynamické parametry nákladních vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Hejtmánek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hejmánka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....
Josef Šilar



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Petru Hejtmánkovi za pomoc a vedení při tvorbě této bakalářské práce. Obzvláště si vážím jeho cenných rad, velké trpělivosti a hlavně ohromné podpory, kterou mi věnoval. Nemohu zapomenout poděkovat i mé rodině za morální a finanční podporu.



OBSAH

Úvod	9
1 Popis základních termínů z oblasti aerodynamiky	10
1.1 Tlakové pole	10
1.2 Proudnice	10
1.3 Mezní vrstva	11
1.4 Vzdušný odpor	11
1.4.1 Náporová rychlost	12
1.4.2 Měrná hmotnost	12
1.4.3 Čelní plocha	13
1.4.4 Součinitel odporu vzduchu	13
1.4.5 Odporová síla	13
1.4.6 Přítlak	14
1.4.7 Vztlak	14
1.4.8 Boční zatížení	14
2 Zjišťování aerodynamických parametrů	15
2.1 Aerodynamický tunel	15
2.1.1 Konstrukční provedení podlahy	15
2.1.2 Měřicí systémy	15
2.1.3 Konstrukční provedení aerodynamického tunelu	16
2.2 Numerické výpočty a simulace	18
3 Aerodynamika nákladních vozidel	19
3.1 Tahač	19
3.2 Mezera mezi kabinou a návěsem	20
3.3 Bok návěsu	20
3.4 Zadní část návěsu	20
3.5 Konstrukční prvky snižující aerodynamický odpor	20
3.5.1 Tahač	20
3.5.2 Mezera mezi kabinou a návěsem	24
3.5.3 Bok návěsu	25
3.5.4 Zadní část návěsu	27
4 Porovnání aerodynamických parametrů osobních a nákladních vozidel	32
Závěr	34
Seznam použitých zkratk a symbolů	37



ÚVOD

Aerodynamika je věda, která se zabývá prouděním vzduchu kolem těles. V dnešní době je při konstruování vozidel, a nejenom nich, jedním z hlavních hledisek, jelikož aerodynamický design má rozhodující vliv na spotřebu paliva, snížení škodlivin výfukových plynů a celkový vzhled vozidla.

U závodních automobilů se konstruktéři snažili navrhnout optimální tvar již před mnoha lety, především za účelem dosažení co největší rychlosti, stability a ovladatelnosti vozidla. V současné době se kladou nároky hlavně na snížení škodlivých výfukových plynů osobních vozidel. V souvislosti s tím, mnoho automobilek rozšiřuje svůj výrobní program o tzv. ekologické verze.

Nákladní vozidla, především v Americe, byla po dlouhá léta konstruovaná s cílem dosáhnout co největšího výkonu, aby převezla co největší náklad, bez ohledu na spotřebu paliva. Vše se změnilo poté, jakmile tento kontinent zasáhla vlna ropné krize. S postupem času přišli na to, že nejvíce pohonných hmot ušetří správným aerodynamickým designem a vhodnými konstrukčními prvky. Jelikož v Americe kamiony urazí při převozu nákladu někdy až tisíce kilometrů, většina konstrukčních prvků přišla právě odtamtud. Jedním z největších evropských závodů zabývajících se aerodynamikou nákladních vozidel je Mercedes-Benz, který svým novým modelem dokázal snížit vzdušný odpor až o 18% a spotřebu o 4,5%.



1 POPIS ZÁKLADNÍCH TERMÍNŮ Z OBLASTI AERODYNAMIKY

1.1 TLAKOVÉ POLE

Na povrchu vozidla se vzduch různě stlačuje, čímž dochází k vytvoření nerovnoměrného tlakového pole, způsobujícího silovou nerovnováhu. Vlastnosti tlakového pole vychází ze zákona Zachování energie - Bernoulliho rovnice, který rozděluje tlak na:

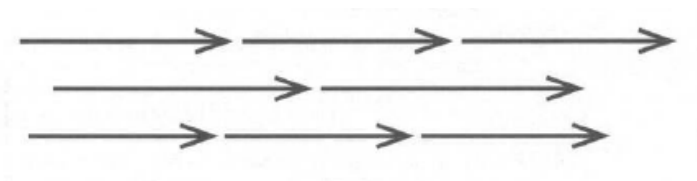
- Statický - odpovídá potenciální energii.
- Dynamický - odpovídá kinetické energii (spojený s pohybem vzduchu).
- Celkový - součet statického a dynamického, pokud neuvažujeme tření.

Průběh a velikost působícího tlaku se mění s rychlostí obtékání. Pokud je obtékáno nesymetrické těleso, proudění vzduchu kolem něj bude na každé straně jiné. Na straně vyšší rychlosti bude větší dynamický a menší statický tlak. [6], [8]

1.2 PROUDNICE

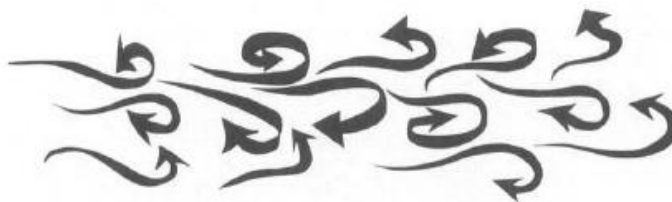
Proudnice je dráha vybrané částice obtékající látky, např. vzduchu. Proudnice se spojují do tzv. proudového svazku. Podle tvaru proudnic můžeme proudění rozdělit na [13]:

- Laminární (ustálené) – proudnice jsou přibližně rovnoběžné, jejich dráhy se vzájemně nekříží, částice se posouvají a nerotují.



Obr. 1 Laminární proudění [1]

- Turbulentní (vířivé) – proudnice se roztácejí a následně kříží.



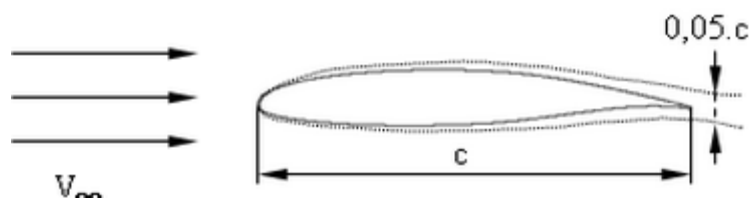
Obr. 2 Turbulentní proudění [1]

Také může nastat **odtržené proudění**, které neopisuje tvar karoserie a dochází k němu většinou v zadní části vozidla v místě, kde se odtrhává mezní vrstva. [6]



1.3 MEZNÍ VRSTVA

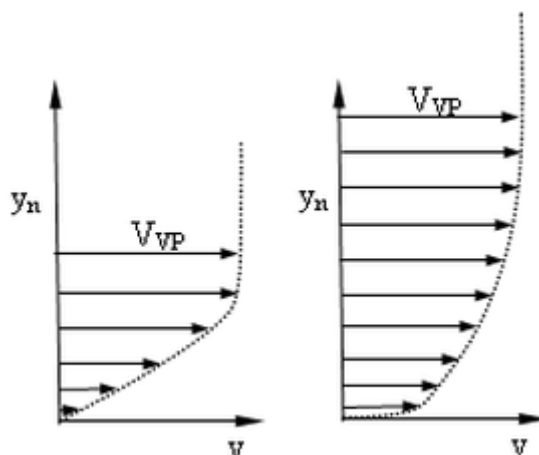
Je to oblast ovlivněná viskozitou vzduchu, která se projevuje ve velmi malé vzdálenosti obtékaného tělesa. Rychlost proudu na povrchu tělesa je nulová, ale mění se v závislosti na normálové vzdálenosti od povrchu. Proto byl zaveden tzv. rychlostní gradient, který je spojen se vznikem odporové síly. Ta vzniká třením vrstev tekutin o různé rychlosti a působí proti pohybu tělesa.



Obr. 3 Vznik mezní vrstvy při obtékání tělesa [8]

Mezní vrstva se mění ve směru tělesa. Mění se její tloušťka a také její neuspořádané proudění, které mezní vrstvu dělí na:

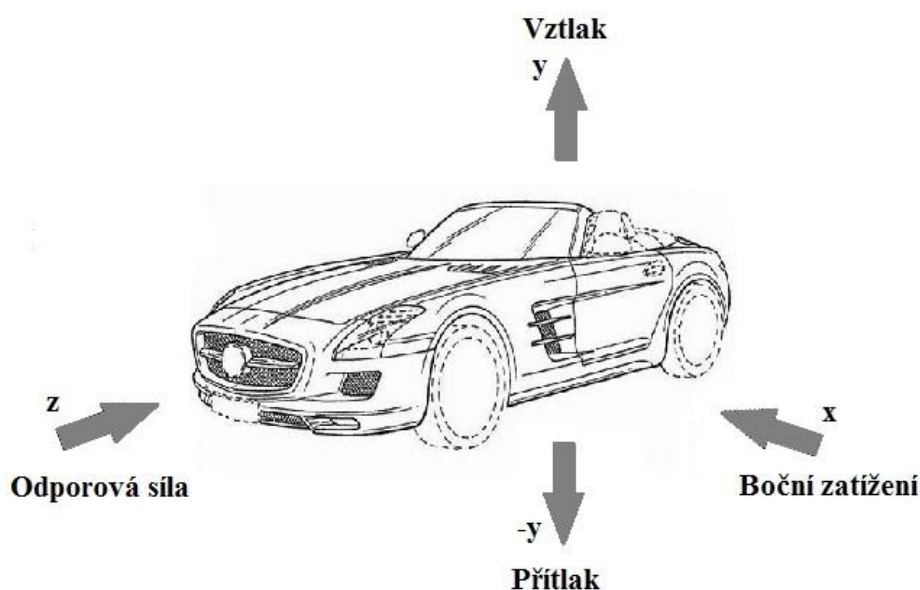
- Laminární - uspořádaný pohyb tekutiny, dochází pouze k malé výměně energií a hmot mezi vrstvami, vrstvy jsou několikanásobně menší než turbulentní.
- Turbulentní - náhodný pohyb tekutiny spojený s velkou výměnou energie a hmoty ve vertikálním směru mezi vrstvami. [8]



Obr. 4 Závislost normálové vzdálenosti od povrchu na rychlosti proudění [8]

1.4 VZDUŠNÝ ODPOR

Celkový vzdušný odpor (aerodynamická síla) je dán výslednicí aerodynamických tlaků a třecích sil, které působí na povrchu a okolo karoserie. Vozidlo musí část vzduchu protlačit pod, nad a také skrz karoserii (chladicí a větrací systémy). Obecně platí, že pod vozidlem je mírný přetlak, nad vozidlem velký podtlak, čímž dochází k víření vzduchu. [2]



Obr. 5 Silové působení na karoserii [20]

Celkový vzdušný odpor se určí ze vztahu [2]:

$$O_V = c_x \frac{\rho}{2} S_x v_r^2, \quad (1)$$

kde v_r je výsledná (náporová) rychlost proudění vzduchu kolem vozidla [m/s], S_x je čelní plocha vozidla [m²], ρ je měrná hmotnost vzduchu [kg/m³] a c_x je součinitel vzdušného odporu [-]. [2]

1.4.1 NÁPOROVÁ RYCHLOST

Náporová rychlost v_r je dána součtem dvou rychlostí [2]:

$$\vec{v}_r = \vec{v} + \vec{v}_v, \quad (2)$$

kde v je záporná rychlost pohybu vozidla (proudění vzduchu je vůči vozidlu relativní, což znamená, že vzduch je v klidu a vozidlo ním projíždí) [m/s] a v_v je rychlost větru [m/s]. [2]

Vozidlo pohybující se velkou průměrnou rychlostí se musí vyrovnávat s velkými aerodynamickými silami. Potřebná energie k překonání tohoto odporu roste s třetí mocninou, proto se snažíme upravit aerodynamiku vozidla. I přesto nejúčinnější způsob snížení spotřeby paliva je pomalejší jízda. [17]

1.4.2 MĚRNÁ HMOTNOST

Měrná hmotnost vzduchu ρ závisí na teplotě, tlaku a nadmořské výšce.

Určí se ze vztahu [2]:

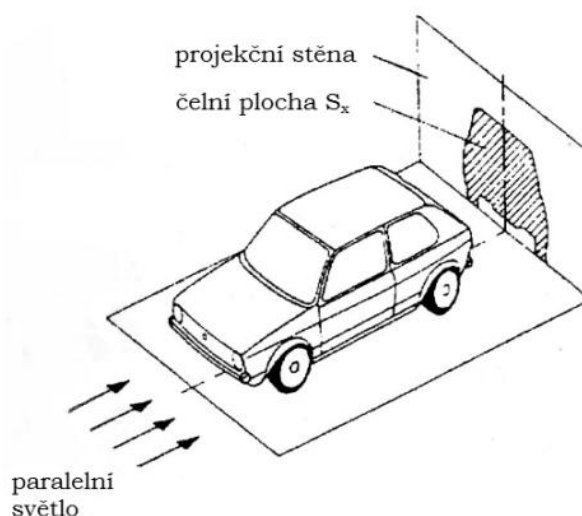


$$\rho = \frac{354 p}{(t + 273)}, \quad (3)$$

kde p je tlak vzduchu [bar], t je teplota vzduchu [°C].

1.4.3 ČELNÍ PLOCHA

Čelní plocha S_x je velice důležitý faktor. Obecně platí: čím větší plocha, tím větší odpor. Získává se čelní projekcí.



Obr. 6 Zjištění čelní plochy vozidla projekcí [2]

1.4.4 SOUČINITEL ODPORU VZDUCHU

Součinitel odporu vzduchu c_x závisí především na tvaru a velikosti vozidla. Vozidlo s malou čelní plochou může mít vyšší odpor než vozidlo s větší a naopak. Hodnoty c_x se zjišťují numerickými výpočty, počítačovou simulací a jeho skutečné hodnoty v aerodynamickém tunelu. V zahraniční literatuře se můžete setkat s označením součinitele odporu c_d , jako drag coefficient. [2]

1.4.5 ODPOROVÁ SÍLA

Směr síly je rovnoběžný se směrem pohybu vozidla. Vzniká tím, jak vozidlo proniká atmosférou. Čelní plocha vozidla má velký vliv na velikost odporové síly. Pro snížení se používají různé nástavby (kapotáže).



1.4.6 PŘÍTLAK

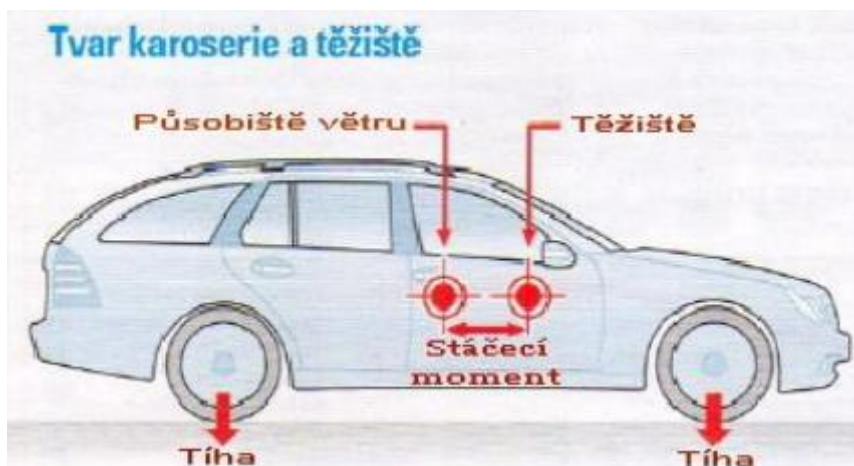
Směr přítlaku je dolů normálově vzhledem k vozovce. Je to síla, která se tvoří při jízdě vozidla, kdy na horní straně jeho vnějšího pláště je vyšší aerodynamický tlak než na straně spodní. Dochází k většímu zatížení pneumatik v oblasti dezénu s povrchem vozovky bez zvýšení hmotnosti vozidla. Větší zatížení pneumatik při vysoké rychlosti zlepšuje přilnavost, akceleraci, zatáčení, obecně jízdni vlastnosti vozidla.

1.4.7 VZTLAK

Směr vztlaku je nahoru normálově vzhledem k vozovce. Ovlivňuje schopnost řízení vozidla při vyšších rychlostech v opačném smyslu než přítlak. Vzduch proudící pod komponenty vozidla způsobuje turbulence. Toto nepříznivé proudění vzduchu přispívá ke snížení rychlosti vzduchu a tím nárůstu tlaku. Když je menší světlá výška, vzduch proudí v omezené míře a rychleji, což způsobuje snížení vztlaku. Naopak když světlá výška je větší, proudění vzduchu pod vozidlem se zvyšuje. [5]

1.4.8 BOČNÍ ZATÍŽENÍ

Vzniká působením bočního větru, který vytváří velký tlak na vozidlo, což může způsobit vybočení vozidla ze svého směru. Tím dochází ke zhoršení stability, bezpečnosti vozidla. Vliv bočního větru závisí především na tvaru, velikosti, těžišti vozidla a působišti větru. Působiště větru by mělo být v příčné úrovni těžiště. Čím větší je vzdálenost působiště a těžiště, tím větší vzniká stáčecí moment. [7]



Obr. 7 Vznik stáčecího momentu při působení bočního větru [7]



2 ZJIŠŤOVÁNÍ AERODYNAMICKÝCH PARAMETRŮ

Nejmodernější metody zjišťování aerodynamických parametrů vozidel (letadel, vlaků apod.) umožňují konstruktérům a návrhářům mnohem větší kreativitu, jelikož mohou analyzovat potřebné parametry na modelu bez toho, aniž by museli navržený prvek vyrobit.

Aerodynamické parametry se zjišťují:

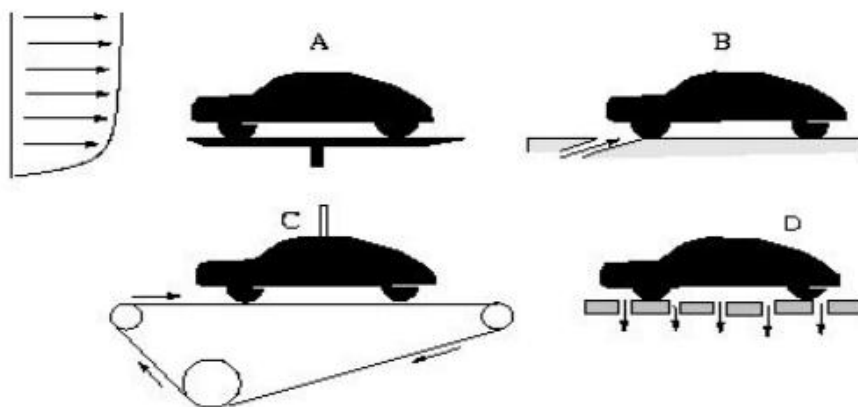
- V aerodynamickém tunelu.
- Pomocí numerických výpočtů a simulací.

2.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

V aerodynamickém tunelu se zjišťují skutečné hodnoty součinitele odporu c_x , součinitele vztlaku, tvaru rychlostního pole při obtékání vozidla a průběh statického tlaku na povrchu karoserie. Měření se provádí na skutečných vozidlech nebo na modelech v měřítku, ale to není tak přesné.

2.1.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ PODLAHY

Pro přiblížení reálných hodnot mezní vrstvy mezi podvozkem a vozovkou se používá pásový dopravník, který simuluje jízdu vozidla. Další způsob ovlivnění mezní vrstvy je odsávání vzduchu nebo tangenciální foukání vzduchu.



Obr. 8 Úprava podlahy A) bez úpravy, B) tangenciální foukání, C) pásový dopravník, D) odsávání vzduchu [3]

2.1.2 MĚŘÍCÍ SYSTÉMY

Různobarevné systémy LDA (Laser Doppler Anemometr) a žárový anemometr s 3D supportem - se používají pro měření rychlostních a turbulentních fluktuací.



Optická metoda PIV (Particle Image Velocymetry)

- je využívána pro měření rychlostního pole.

Snímače kol

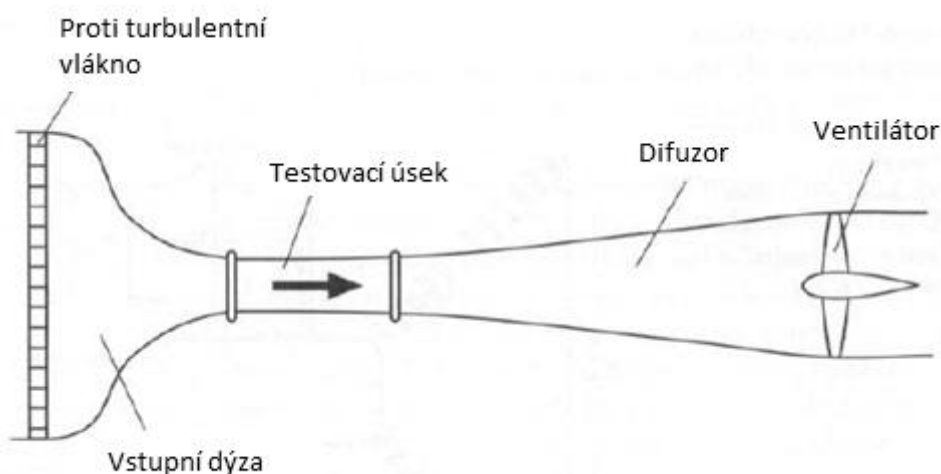
- měří reaktance a síly působící na vozidlo.

Metody vizualizace (barevné kouře apod.)

- slouží pro vizualizaci proudění vzduchu.

V aerodynamickém tunelu se provádí řada dalších měření než jen obtékání vozidla. Dají se testovat extrémní teplotní, povětrnostní a další podmínky. Kromě vozidel se testují vlaky, lokomotivy, autobusy, nákladní vozidla apod. [3]

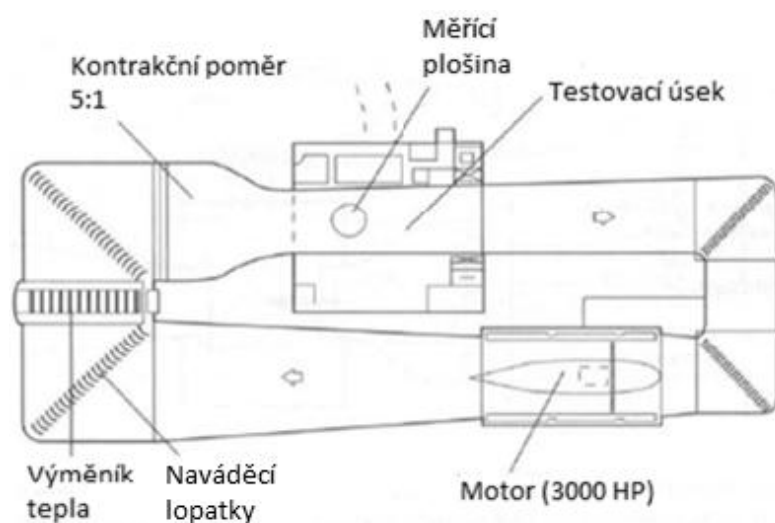
2.1.3 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ AERODYNAMICKÉHO TUNELU



Obr. 9 Schéma základního tunelu s otevřeným oběhem [1]

Všechny aerodynamické tunely mají tyto následující prvky. V základním aerodynamickém tunelu je vzduch vháněn ventilátorem. Jelikož hustota vzduchu je konstantní, nejvyšší rychlost proudění je v nejmenším průřezu, který se používá jako testovací úsek pro vozidla či modely. Testovací úseky mohou mít obdélníkový, kruhový, oválný nebo podobný průřez. Před testovacím úsekem je úsek vstupní dýzy, která usměrňuje proudění vzduchu do testovací části, aby se zvýšila rychlost (volného proudění) v testovací části. Poměr mezi vstupním a testovacím úsekem se nazývá vstupní kontrakční poměr. Větší kontrakční poměr obvykle vytváří lepší podmínky proudění. Samozřejmě větší kontrakční kužely jsou dražší a zabírají více místa. Velké protiturbulentní plátno na vstupu může být vyrobeno z malých voštinových elementů nebo z několika jednoduchých buněk (ok). Jejím cílem je snížit účinek větrných proudů a vyrovnat vtok tak, aby kvalita proudění za plátnem byla homogenní (laminární). Úsek za testovací částí se nazývá difuzor, který snižuje rychlost proudění před ventilátorem.

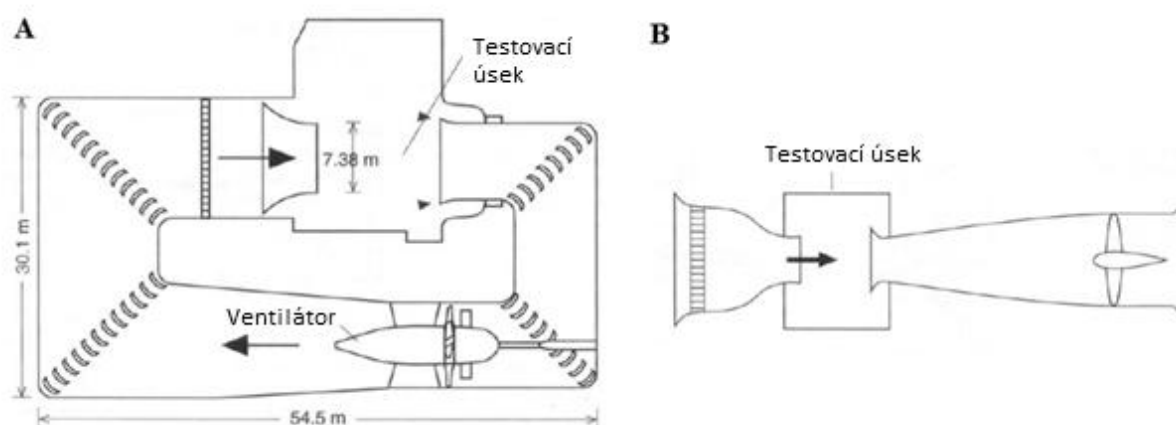
Hlavní rozdíly mezi tunelem s otevřeným nebo s uzavřeným okruhem, jsou v proudění vzduchu a tvaru testovacího úseku. Většina menších aerodynamických tunelů se často nazývá jako Otevřený oběžný tunel obr. 9. Nicméně je nelogické plynout vzduchem, proto se staví



Obr. 10 Aerodynamický tunel s uzavřeným oběhem [1]

zpětné potrubí, aby mohl vzduch cirkulovat. Ventilátor funguje pouze pro rozběhnutí vzduchu a pak už jen pro vyrovnání tření stěn a modelu. Tunel s uzavřeným okruhem je na obr. 10.

Testovací úsek může být uzavřeného typu, jak je na obr. 9 a 10, nebo otevřeného typu, jak je na obr. 11A). Tato konfigurace bývá často nazývána jako Göttingenský typ tunelu (po jednom z prvních aerodynamických tunelů, postaveném v Göttingenu, Německo). U otevřeného testovacího úseku působí vstupní kontrakční kužel jako tryska a model je umístěn v proudu vzduchu. Nejjednodušší otevřený tryskový tunel s otevřeným oběhem se často nazývá Eiffelův typ, jeho schéma je na obr. 11B).



Obr. 11 A) Tunel s otevřeným testovacím úsekem (Göttingenský typ), B) otevřený tryskový tunel (Eiffelův typ)[1]

TUNEL S OTEVŘENÝM OBĚHEM

Obecně platí, že tunely s otevřeným oběhem mají nižší náklady na výstavbu a není potřeba čištění vzduchu od kouře (pro vizualizaci proudění) nebo výfukových plynů (z motoru). Také při stálých podmínkách se nemění teplota během dlouhého testování (na rozdíl od tunelů



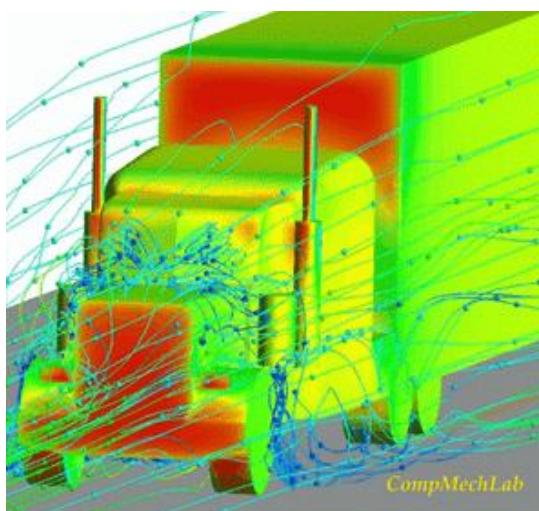
s uzavřeným oběhem). Tato konstrukce má dvě hlavní nevýhody. První je vliv okolních podmínek na volný proud toku. Pokud je tunel umístěn venku, pak vítr může mít velký vliv na kvalitu a rychlost v testovacím úseku. Kromě toho hluk z testovacího úseku, ventilátoru, pohonné jednotky a výstupní trysky může, především u větších tunelů, obtěžovat okolí. Také by mohlo dojít k zamrznutí techniky. Druhou nevýhodou otevřeného oběhu je, že je zapotřebí více energie než u tunelu s uzavřeným oběhem. U menších tunelů to lze vyřešit jejich umístěním do budovy.

TUNEL S UZAVŘENÝM OBĚHEM

Jelikož potřebují méně energie a nejsou citlivé na okolní vzduch, tak většina větších tunelů používá uzavřený oběh. Hlavní nevýhodou jsou vyšší náklady, hromadění kouře a růst teploty (způsobený třením) při dlouhém provozu, proto se instalují výměníky vzduchu. Výměníky jsou neustále otevřené, aby se mísil vnitřní vzduch s okolním. [1]

2.2 NUMERICKÉ VÝPOČTY A SIMULACE

Znalost chování proudění nám umožňuje předvídat možné problémy a negativní vlivy tekutin, nebo naopak maximálně využít vlivy pozitivní. Existují různé přístupy řešení. Jedním z nich je zjišťování chování proudění experimentálně, což je většinou velice náročné jak časově, tak finančně a někdy mohou být fyzikální jevy velice složité a tímto způsobem neřešitelné. Proto se v dnešní době velmi využívá simulace CFD (Computational Fluid Dynamics) neboli matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin, které řeší výše zmiňovanou problematiku při nižších pořizovacích nákladech. V praxi se většinou tyto dva přístupy kombinují. Jak již bylo řečeno využívání CFD výpočtů snižuje náklady jak na vývoj, výrobu, tak na samotný provoz. Díky tomu jsme schopni odhalit kritické oblasti proudění a provést příslušné změny před samotnou výrobou. Tím zvýšíme účinnost, kvalitu, životnost, bezpečnost, ale i dopad na životní prostředí. [14]



Obr. 12 CFD simulace kabiny tahače při rychlosti proudění 90 km/h [11]



3 AERODYNAMIKA NÁKLADNÍCH VOZIDEL

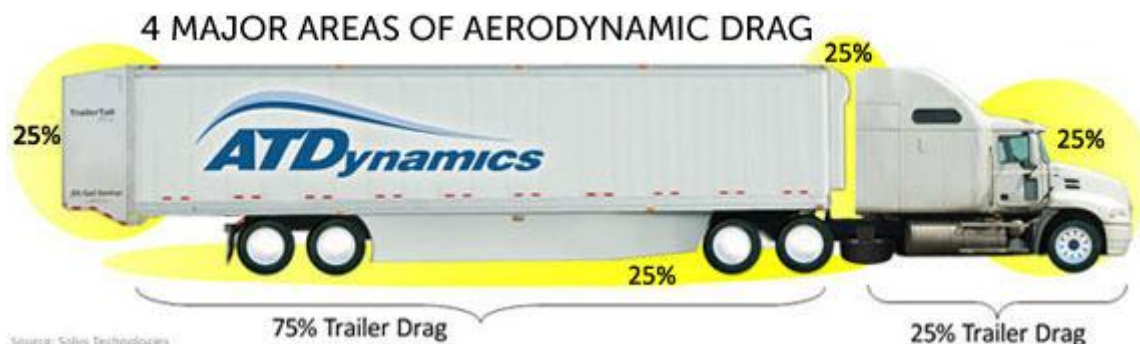
V dnešním ekonomickém prostředí spotřebitelská poptávka úspory paliva nákladních vozidel nebyla nikdy větší. Aerodynamický design má rozhodující vliv na jejich spotřebu paliva a snižování ztrát spojených s požadavkem na chlazení motorového prostoru. Při jízdě je nákladní vozidlo ovlivněno mnoha faktory (vzdušný odpor, přítlak, vztlak, boční zatížení), které jsou spojené s jeho konstrukcí (rozdíl výšek a velikost mezery mezi tahačem a návěsem, světlá výška podvozku a další).

Optimální aerodynamický design může přinést více výhod než jen nižší spotřebu a snížení emisí:

- Menší silniční ostřík (tj. lepší viditelnost pro ostatní řidiče),
- snížení znečištění nákladního vozidla (díky menšímu usazování nečistot),
- snížená citlivost na boční vítr (tudíž lepší řízení a stabilita vozidla),
- lepší bezpečnost (díky menšímu odporu),
- nižší hlučnost. [17], [15]

Hlavní oblasti nákladních vozidel ovlivněné aerodynamickým odporem jsou:

- tahač,
- mezera mezi kabinou a návěsem,
- bok/podvozek návěsu,
- zadní část návěsu. [18]



Obr. 13 Hlavní oblasti aerodynamického odporu [18]

3.1 TAHAČ

U tahače je velice důležitá čelní plocha, protože na ní vzniká největší část odporu. Proto se konstruktéři snaží navrhnout ideální tvar vozidla pro obtékání vzduchu. Významným prvkem aerodynamiky je i světlá výška podvozku. Testování v aerodynamickém tunelu ukázalo, že čím blíže je podvozek vozidla k zemi, tím lepší je koeficient vzdušného odporu, protože méně vzduchu je schopno téci pod podvozkem. Naopak čím větší je světlá výška, tím větší odpor a turbulence se tvoří pod podvozkem. Také se snažíme vyhnout ostrým hranám, které vytváří nepříznivé turbulentní proudění. Dalším základním pravidlem je výška kabiny, která by měla být stejná s výškou návěsu. Což je prakticky nemožné, protože tahač vozí různě vysoké návěsy, tudíž se to řeší použitím různých střešních kapotáží. [17], [5]



3.2 MEZERA MEZI KABINOU A NÁVĚSEM

Mezera mezi kabinou a návěsem by měla být co nejmenší. V případě tuhého návěsu lze mezeru téměř překlenout, ale u přípojných vozidel je problém s potřebným místem při zatáčení. Obecně platí: čím větší mezera, tím větší vzdušný odpor. [17]

3.3 BOK NÁVĚSU

Pro celkové snížení vzdušného odporu je bok návěsu velice důležitý především při bočním větru, protože narušuje proudění a velké množství vzduchu se dostane pod návěs, čímž vznikají velké turbulence. Také musí být správně navržené zástěrky tak, aby ostřikem kol neohrožovaly ostatní řidiče. [9]

3.4 ZADNÍ ČÁST NÁVĚSU

Nejen podvozek, ale i zadní část návěsu má velký podíl na vzdušném odporu nákladního vozidla, protože se za ním uzavírají proudnice. Ke snížení vzdušného odporu, a tedy ke zlepšení spotřeby, existuje několik zařízení, která se používají.

3.5 KONSTRUKČNÍ PRVKY SNIŽUJÍCÍ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Aerodynamické technologie snižují vzdušný odpor a zlepšují proudění vzduchu kolem celého vozidla. Mezi aerodynamické technologie patří např.: zmenšení mezery, které snižuje turbulence mezi tahačem a návěsem, boční křídla, která snižují vítr pod návěsem a zadní aerodynamické kryty, které snižují turbulence a pokles tlaku v zadní části návěsu. Použití aerodynamických krytů (kapotáží) v kombinaci s dalšími kryty (v některých případech stačí použít samotný kryt), zlepšuje spotřebu paliva a snižuje emise NOx. [19]

3.5.1 TAHAČ

ZAOBLENÉ HRANY

Úspora paliva: až 0,6 %

První předpoklad pro dobrou aerodynamiku kabiny jsou správně zaoblené hrany. Proto se navrhuje tak, aby umožňovaly kontinuální proudění vzduchu. Také zlepšují viditelnost řidiče a vzhled vozidla. Jsou-li hrany špatně zaobleny, mohou naopak vzdušný odpor zvýšit.

Pro zachování kontinuálního proudění musí mít hrany minimální poloměr 75 mm.



AERODYNAMICKÁ BOČNÍ ZRCÁTKA

Úspora paliva: až 0,3 %

Aerodynamická zrcátka musí mít takový tvar, aby docházelo k co možná nejmenšímu zpomalování proudu vzduchu. Ve srovnání s běžnými zrcátky zvyšují úsporu paliva až o 0,3 %. Tato zrcátka se používají u moderních nákladních automobilů již několik let. Řešení, jak nejvíce zvýšit úsporu paliva, je nahrazení bočních zrcátek kamerami, které mohou být zabudovány do karoserie, čímž se zmenší čelní plocha a tedy i vzdušný odpor. Kamery mohou poskytovat širší zorné pole na zadní straně a jsou vybaveny infračervenou technologií, díky které dokážou proniknout mlhou a deštěm. Tím se zlepšuje bezpečnost silničního provozu.

PŘÍDAVNÁ ZAŘÍZENÍ

Úspora paliva: -0,1 %

Přídavná zařízení jsou často montována k okraji střechy kabiny nákladních automobilů. Tím narušují tok vzduchu a zvyšují vzdušný odpor až o 0,1 %

Předměty jako jsou antény, světla a klaksony narušují proudění vzduchu, proto je snahou vyhnout se jejich použití.



Obr. 14 a) Zaoblené hrany, b) aerodynamická boční zrcátka, c) přídavná zařízení [9]

SPOILER

Úspora paliva: až 0,9 %

Spoiler je účinné prodloužení nárazníku tahače. Spoilery brání vzduchu v proudění podél podvozku a vedou vzduch po rovných plochách tj. boky a střecha tahače. Tím se snižuje odpor vzduchu a nesrovnalosti proudění pod podvozkem. Snížení koeficientu odporu vzduchu také závisí na podvozku vozidla. Pokud je hladký, spoiler bude mít úplně opačný účinek, protože se zvětší čelní plocha.



AERODYNAMICKÉ ZÁSTĚRKY

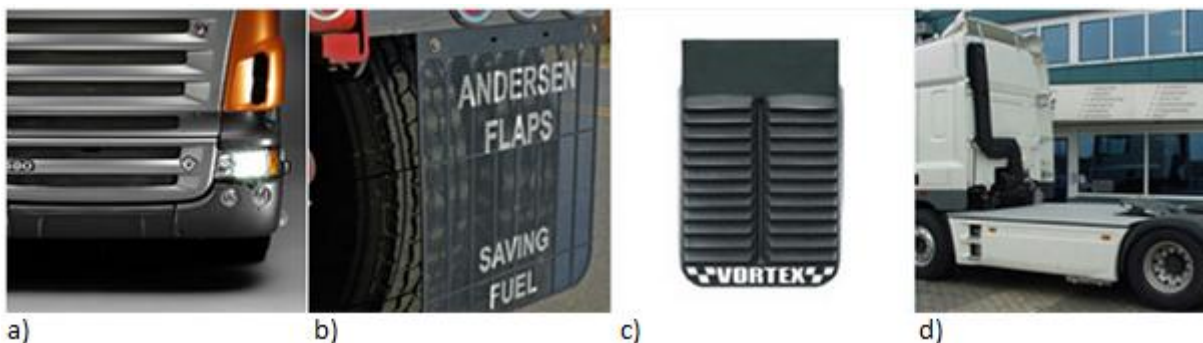
Úspora paliva: až 1,5 %

Eco-flaps a Vortex splash guards jsou proděravěné aerodynamické zástěrky, které nahrazují ty tradiční a umísťují se za kola. Umožňují, aby přibližně 75 % vzduchu jimi pronikalo, což má za následek snížení odporu vzduchu. Také zároveň snižují ostřík od kol.

BOČNÍ PANELY

Úspora paliva: až 0,7 %

Používají se k překlenutí mezery mezi přední a zadní nápravou tahače. Jelikož zabráňují vstupu vzduchu pod tahač, jsou užitečné především při působení bočního větru. Také zlepšují bezpečnost silničního provozu, protože snižují množství ostříku.



Obr. 15 a) Spoiler, b) Eco-flaps, c) Vortex splash guards, d) boční panel [9]

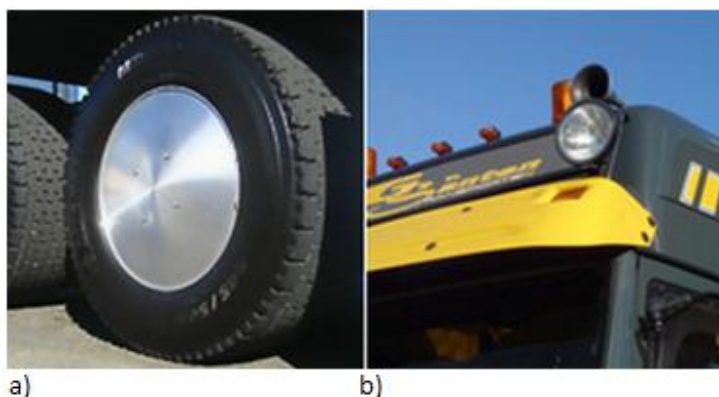
KRYTY KOL

ATDynamics kryty kol jsou jedním z nejrychlejších a nejjednodušších způsobů, jak ušetřit palivo kamionu. Usměrnějí proudění vzduchu kolem kol a tím snižují vzdušný odpor. Výrobci zatím nevydali přesné údaje o úspoře paliva, které lze dosáhnout. Nevýhodou krytů je bránění proudění vzduchu skrz disky a tedy zhoršení chlazení brzd.

SLUNEČNÍ CLONA

Úspora paliva: až 3 %

Hlavní funkcí sluneční clony je samozřejmě ochrana řidiče před oslňováním, ale může mít i funkci aerodynamickou. Její zaoblení umožňuje lepší proudění vzduchu přes ostrou střešní hranu tahače.



Obr. 16 a) Kryty kol, b) sluneční clona [9]

Minimální poloměr střešní čelní hrany je závislý na průměrné rychlosti vozidla. Obecně platí:

- Pro všechny rychlosti je nejlepší poloměr 150 mm. To platí zejména pro nákladní automobily, které jezdí při nízkých průměrných rychlostech.
- Pro rychlosti 80 km/h a vyšší je ideální poloměr 75 mm. To platí pro nákladní automobily jezdící na dálnicích.
- V ideálním případě by sluneční clona měla být postavena na střešní čelní hraně, aby jen minimálně narušovala proudění vzduchu a současně umožňovala kontinuální proudění vzduchu. [9]

STŘEŠNÍ KRYT

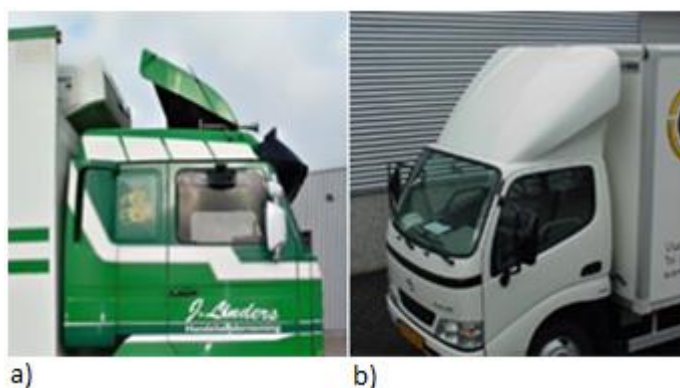
Úspora paliva: 4 až 6 %

Jedná se o trojrozměrný výlisek, který je připevněn na střechu tahače a stoupá směrem k návěsu. Po instalaci už není nastavitelný, takže je vhodný pro tahače, které vozí návěsy o stejné výšce. Střešní kryty (Cab roof fairings) jsou při působení bočního větru účinnější než deflektory, proto se deflektory dnes už tolik nepoužívají. [9], [4]

STŘEŠNÍ DEFLEKTOR

Úspora paliva: 2 až 4 %

Je nastavitelná plochá nebo zakřivená (dvourozměrná) deska, která je připevněna na střechu tahače a stoupá směrem k návěsu. Střešní deflektor zlepšuje proudění vzduchu přes mezeru mezi tahačem a návěsem. Je vhodný pro tahače, které vozí různě vysoké návěsy. [9], [4]



Obr. 17 a) Střešní deflektor, b) střešní kryt [9]

3.5.2 MEZERA MEZI KABINOU A NÁVĚSEM

VÝPLŇOVÝ PANEL PODVOZKU

Výplňový panel podvozku (Chassis filler panel) je velice užitečný pro nákladní automobily, které mají za kabinou velké mezery mezi jednotlivými díly podvozku. Brání proudění vzduchu částmi podvozku a nízkému tlaku pod podvozkem přitahovat velké množství vzduchu do mezery mezi tahačem a návěsem. Také usnadňuje přístup do zadní části kabiny a zlepšuje vzhled. Žádné přesné údaje o úspoře paliva zatím nejsou dostupné.

Instalace výplňového panelu zabraňuje turbulencím mezi nosníky podvozku a snižuje množství nečistot.

LÍMEC SE STŘEŠNÍM KRYTEM

Úspora paliva: až 8 %

Límeček se střešním krytem (Collar with roof fairings) se používá pro minimalizování nebo v ideálním případě překlenutí mezery. U vozidel s odpruženou kabinou to není možné. Naopak u vozidel s neodpruženou kabinou je vhodné mezeru úplně zaplnit, což se řeší použitím tzv. límce spojeného se střešním krytem. Stejně jako střešní kryt, tak i límeček snižuje vzdušný odpor ve všech úhlech proudění a zlepšuje stabilitu a vzhled vozidla. Tento prvek se používá u vozidel s pevným návěsem.

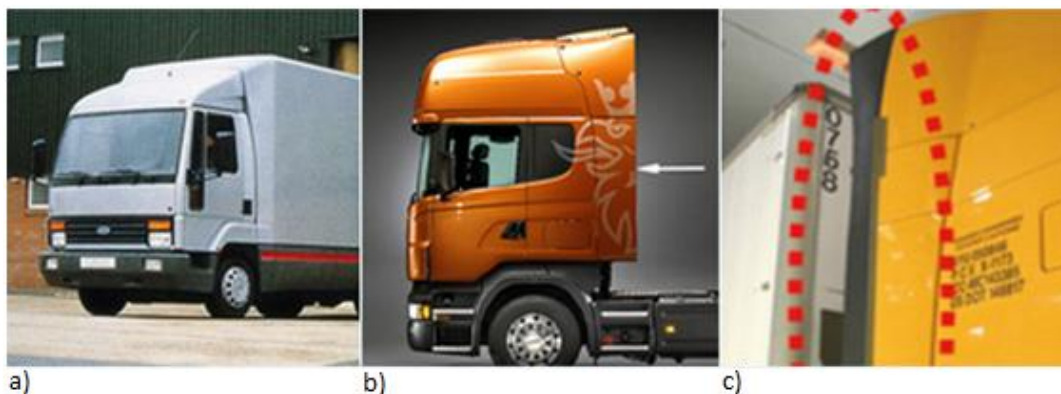
BOČNÍ PANELE Tahače

Úspora paliva: až 0,7 %

Přípojná vozidla mají často velkou mezeru mezi kabinou a návěsem, z důvodu potřebného místa pro zatáčení, ale ta vytváří velký vzdušný odpor. Boční panely se montují na kabinu tak, aby se co nejvíce zmenšila mezeru a proud vzduchu byl veden kolem ní. Jsou velice účinné při působení bočního větru, protože zabraňují vstupu vzduchu do prostoru mezi kabinou a návěsem. Jelikož přípojná vozidla jsou omezená tím, že nemůžou úplně vyplnit zmiňovanou



mezeru, existují gumové pásy, umožňující namontování k zadní straně panelů. Další způsob našla společnost Iveco, která vyvinula koncept nafukovacího límce, čímž se zcela vyplňuje prostor mezi tahačem a návěsem. Výhoda ohebných materiálů a nafukovacích konstrukcí je, že nikterak neomezují vozidlo.



Obr. 18 a) Límec se střešní kapotáží, b) boční panel, c) gumový pás [9]

ODVZDUŠŇOVACÍ ZÁKLADNA (BASE BLEED)

Vliv volného prostoru mezi kabinou a návěsem u přípojného vozidla může být snížen také tím, že se do ní fouká vzduch. To může být provedeno foukáním vzduchu přes celou zadní část kabiny, při nízké rychlosti, skrz porézní materiál. Poslední testy ukázaly možnou vyšší účinnost této technologie než bočních panelů tahače. Stále se řeší otázka praktického použití základny, zda náklady na foukání vzduchu nebudou větší než úspora energie. [9]

3.5.3 BOK NÁVĚSU

BOČNÍ KŘÍDLA

Úspora paliva: 4 až 7 %



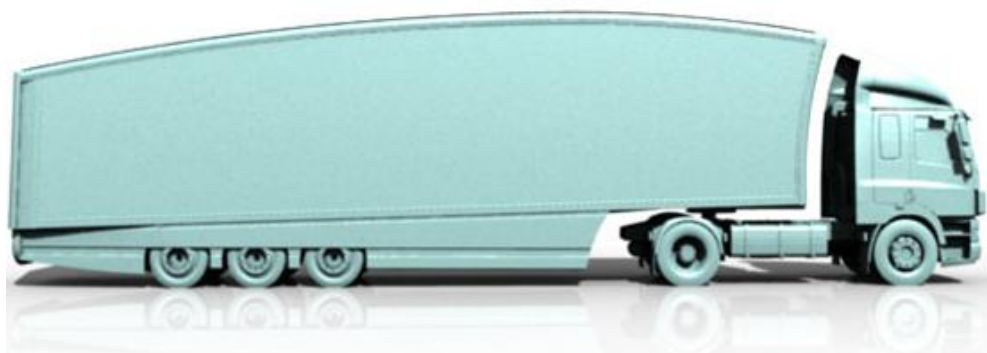
Obr. 19 Boční křídla [16]



Boční křídla (Side wings) jsou desky protáhlé až blízko k zemi, které se montují na strany návěsu. Jejich aerodynamický design významně snižuje proudy vzduchu kolem a pod návěsem. Tím je minimalizován i odpor vzduchu. Kromě úspory paliva poskytují návěsu lepší stabilitu při bočním větru, a také bylo dokázáno, že snižují ostřík pneumatik, který může způsobit problémy s viditelností ostatním řidičům. [9], [16]

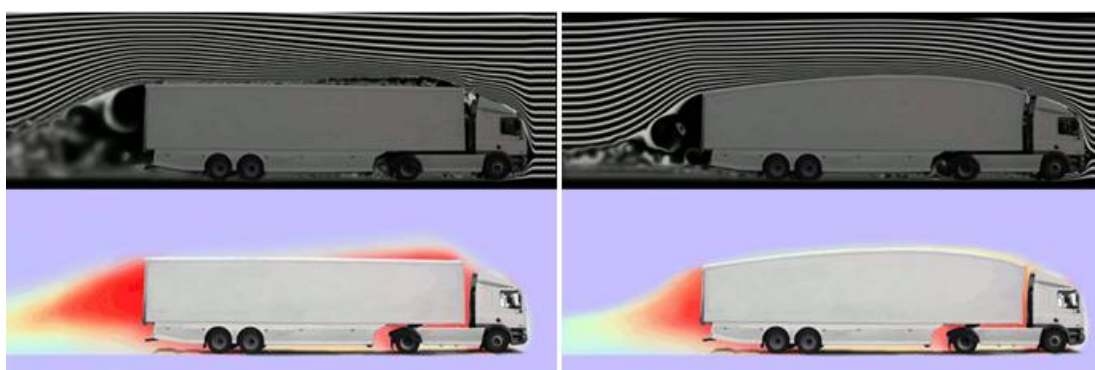
KAPKOVITÉ NÁVĚSY

Úspora paliva: až 10 %



Obr. 20 Kapkovitý návěs [12]

Kapkovité návěsy (Teardrop trailer) připomínají svým aerodynamickým tvarem profil slzy a zvětšují nákladový prostor. Střešní tahače je speciálně navržena tak, že se tvarem plynule napojuje na návěs a hrany jsou optimálně zaobleny pro zlepšení proudění vzduchu kolem vozidla. Kapkovitý tvar návěsu snižuje emise CO₂ o 20 % ve srovnání se standardním tvarem. Marks & Spencer se stala první společností na světě, která použila tento nový typ návěsu vyvinutý a vyrobený společností Don-Bur. [12]



Obr. 21 Srovnání průběhu proudnic klasického návěsu (vlevo) s kapkovitým návěsem (vpravo) [10]



AERODYNAMICKÉ ZÁSTĚRKY

Úspora paliva: 0,3l/100km

Další technologií snižující vzdušný odpor podvozku návěsu jsou aerodynamické zástěrky, které testovala společnost SAE (Society of Automotive Engineers - profesní sdružení odborníků z oblasti leteckého, automobilového a dopravního průmyslu).



Obr. 22 Aerodynamické zástěrky [9]

3.5.4 ZADNÍ ČÁST NÁVĚSU

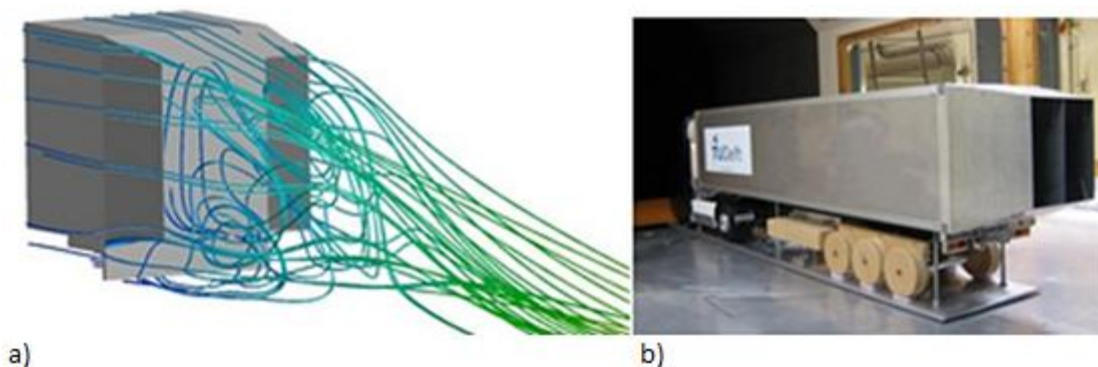
KONCE

Velice známý příklad tohoto návěsu je lodní konec (boat tail), který může být popsán jako zúžené prodloužení návěsu.

- **Simulace a testování ve vzdušném tunelu**

Nejdříve probíhaly simulace pomocí CFD, které ukázaly, že použitím lodního konce se snadno docílí snížení vzdušného odporu až o 12 %.

Testování ve vzdušném tunelu probíhalo kvůli zjištění skutečného vzdušného odporu, nutnosti dolního panelu, vlivu rozdílů sklonu koncových panelů, dutině panelu (otevřená, polootevřená, zavřená) a ohybu dolního panelu. Testy ukázaly, že nejlepším řešením je otevřený konec včetně dna. Touto konfigurací bylo potvrzeno simulované snížení vzdušného odporu a to o 12 %.



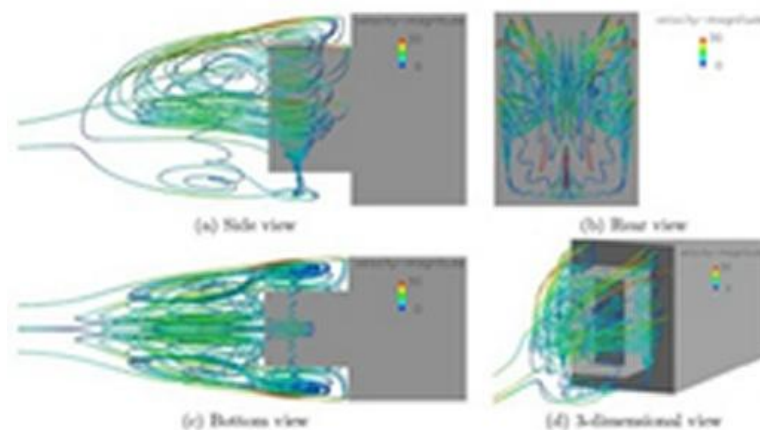
Obr. 23 Testování konce a) simulací, b) ve vzdušném tunelu [9]



STUPŇOVANÝ KONEC

Úspora paliva: až 10 %

Stupňovaný konec (Stepped tail) může být popsán jako aerodynamický doplněk obsahující čtyři obdélníkové desky, které se připevňují jistíci vložkami na konec návěsu.



Obr. 24 Simulace stupňovaného konce [9]

PEVNÝ KONEC

Úspora paliva: 2l/100km

V roce 2008 byl proveden první test pevného konce (Rigid tail). Pevný konec byl testován s různou délkou (2m, 1,5m a 1m). Testováním se ukázalo, že čím delší konec, tím lepší úspora paliva.



Obr. 25 Pevný konec [9]

SKLÁDACÍ KONEC (FOLDABLE TAIL)

Úspora paliva: 1,6l/100km

Je to konec, který se ručně připevní na zadní dveře tak, aby byl umožněn přístup do návěsu. Použití skládacího konce se ukázalo jako velice efektivní řešení.



Obr. 26 Skládací konec [9]

NAFUKOVACÍ KONEC (INFLATABLE TAIL)

Úspora paliva: 1l/100km

Je vyroben z pružného materiálu a nafouknut pomocí čerpadla do požadovaného tvaru.



Obr. 27 Nafukovací konec [9]

LOPATKY

Úspora paliva: 0,5l/100km

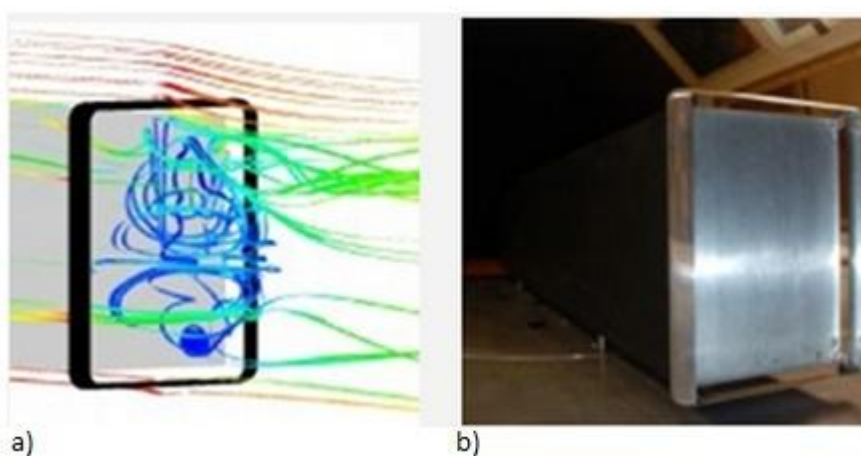
Alternativní způsob jak snížit celkový odpor mezi tahačem-návěsem je aplikace vodících lopatek (Vanes) v zadní části přívěsu. Tyto lopatky vyvinula Delfská univerzita.

- Simulace a testování ve vzdušném tunelu

S pomocí počítačové dynamiky tekutin CFD byla provedena analýza proudění vzduchu kolem lopatek v zadní části návěsu. Velkým problémem bylo najít optimální tvar, úhel náběhu a umístění lopatek (horní, spodní, boční) na stěnách návěsu.



Zkoušení ve vzdušném tunelu ukázalo, že nejlepším řešením je použití lopatek na všech stěnách návěsu. Tímto způsobem byl vzdušný odpor snížen až o 20%.



Obr. 28 Testování lopatek a) simulací, b) ve vzdušném tunelu [9]

Při testování návěsu pouze s horní lopatkou, na závodním okruhu, byla spotřeba oproti návěsu bez lopatek nižší o 0,5l/100km a s lopatkami na všech čtyřech stěnách byla ještě lepší.



Obr. 29 Návěs a) se čtyřmi lopatkami, b) s jednou lopatkou [9]

SYSTÉM PRO SNÍŽENÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU

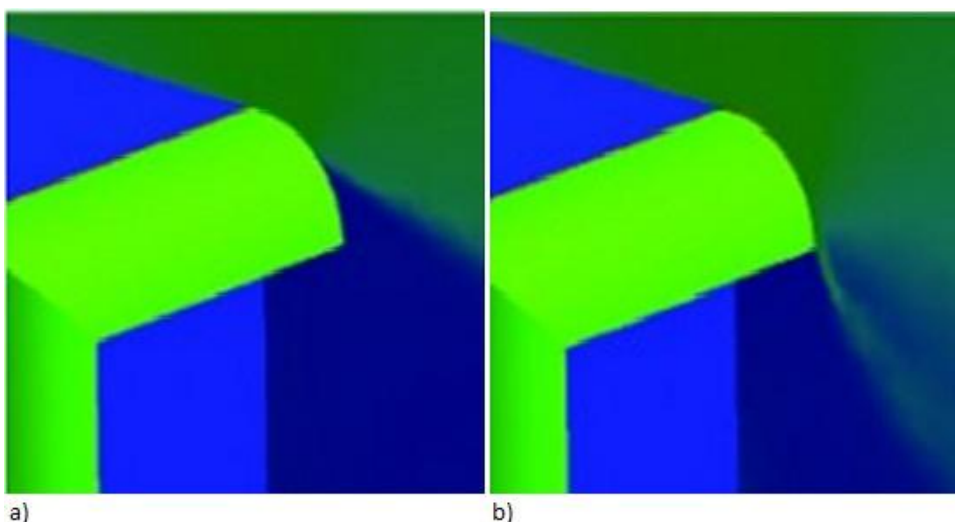
Úspora paliva: 0,23l/100km

Systém pro snížení aerodynamického odporu (System drag reduction) je zařízení umístěné na střeše konce návěsu, které snižuje vzdušný odpor.



Obr. 30 Systém pro snížení aerodynamického odporu [9]

AKTIVNÍ ŘÍZENÍ PROUDĚNÍ (ACTIVE FLOW CONTROL)



Obr. 31 a) Ofuková tryska není aktivována: přerušení proudění, b) Ofuková tryska je aktivní: kontinuální proudění [9]

Technologie aktivního řízení proudění (Active flow control) aktivně řídí tok vzduchu lokálně, pro snížení celkového vzdušného odporu. Ovládání mezní vrstvy pomocí sání anebo ofukování je jedním z nejznámějších příkladů aktivně řízeného proudění používaného proto, aby nedošlo k odtržení vrstvy vzduchu. Simulace se provádějí za účelem analyzovat vliv různých parametrů. Optimalizací složitých parametrů podílejících se na systému ofukování bylo docíleno snížení vzdušného odporu až o 20%.

Jedním z návrhů jak velice účinně snížit odpor vzduchu je použití pulzního foukání. Izraelská univerzita v Tel Avivu vytvořila kombinaci nepřetržitého odsávání mezní vrstvy spolu s pulzním foukáním, což mělo podobný účinek jako kontinuální foukání, ale mnohem efektivnější z hlediska spotřeby energie. Aktivní řízení toku je stále v rané fázi vývoje, protože výzkum musí plně pochopit různé mechanismy toků, ale do budoucna má aktivní řízení toku velký potenciál ke zlepšení vzdušného odporu u nákladních vozidel. [9]

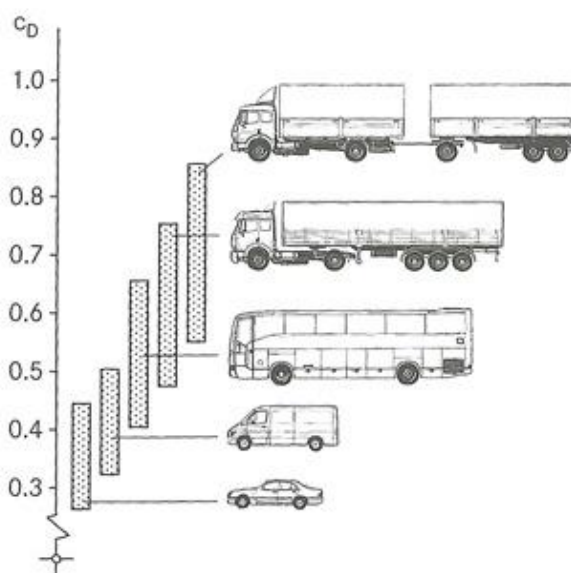


4 POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÝCH PARAMETRŮ OSOBNÍCH A NÁKLADNÍCH VOZIDEL

Jeden z největších rozdílů aerodynamiky osobních a nákladních vozidel je ve tvaru vozidla. Jelikož celkový vzdušný odpor závisí na čelní ploše, je jasné, že nákladní vozidla mají větší odpor. U osobních automobilů se konstruktéři snaží navrhnout tvar podobný tlustému leteckému profilu křídla. Takový profil má nejmenší součinitel vzdušného odporu. U nákladních vozidel je návrh optimálního tvaru mnohem složitější a sami konstruktéři se nemohou shodnout jaký je nejlepší. Proto se používají konstrukční prvky, které se snaží ideálně propojit kabinu s návěsem tak, aby minimalizovali vliv přechodu.

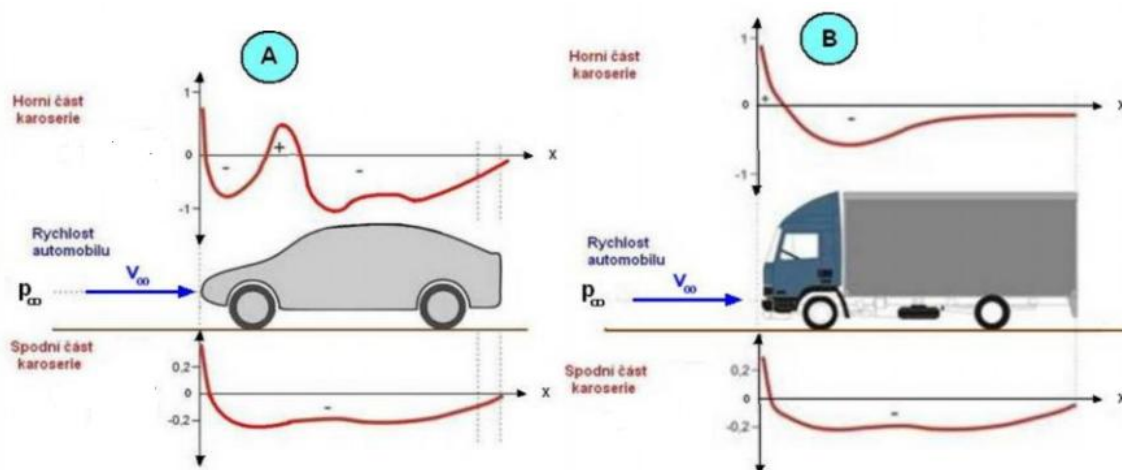
Tab. 1 Hodnoty součinitele odporu c_x a S_x [2]

Typ vozidla	c_x [-]	S_x [m ²]
osobní automobily	0,3 - 0,4	1,6 - 2,0
sportovní vozy	0,3 - 0,35	1,3 - 1,6
závodní vozy - nekrytá kola	0,4 - 0,6	0,7 - 1,3
závodní vozy - krytá kola	0,25 - 0,35	0,8 - 1,5
nákladní vozy - valník	0,8 - 1,0	4 - 7
nákladní vozy - s plachtou	0,6 - 0,8	5 - 8
nákladní vozy - s přívěsem	1,0 - 1,2	5 - 8
nákladní vozy - s kontejnerovým návěsem	1,0 - 1,2	9
autobusy	0,5 - 0,7	5 - 7



Obr. 32 Koeficient odporu C_x pro různé typy vozidel [17]

Porovnání rozložení tlaku v rovině procházející podélnou osou osobního a nákladního vozidla je uveden na obr. 28. Rozložení statického tlaku určuje celkovou velikost aerodynamické síly, kterou získáme integrací přes celou plochu karoserie. [3]



Obr. 33 Porovnání rozložení statického tlaku na povrch karoserie A) osobních, B) nákladních vozidel [3]



ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly vysvětleny základní aerodynamické parametry, související a zároveň ovlivňující jízdu vozidla. Jedním z nich je vzdušný odpor, který závisí na čelní ploše vozidla, koeficientu vzdušného odporu, rychlosti proudění a hustotě vzduchu. Z něhož vyplývá, že neoptimálnějším řešením pro snížení spotřeby paliva je co nejmenší čelní plocha vozu a pomalá jízda. Ve skutečnosti je však podstata a dopad aerodynamiky mnohem složitější. Dalším významným faktorem je působení tlaků a sil, což může zlepšit přilnavost a stabilitu vozidel. Měření výše zmíněných parametrů a zjišťování vlastností automobilů se provádí pomocí počítačových simulací a testováním ve vzdušném tunelu.

Nejvhodnější design osobních automobilů, z hlediska aerodynamiky, připomíná tvar tlustého leteckého profilu křídla, navrhnutý tak, aby při proudění kolem karoserie nedošlo k přerušení proudu vzduchu a vzniku turbulencí. U nákladních vozidel je tvar složitější, jelikož úzce souvisí s návěsem. Jejich nejvíce ovlivněná místa vzdušným odporem jsou čelní plocha tahače, mezera mezi kabinou a návěsem, podvozek a konec návěsu. Nejjednodušší a nejrychlejší metodou snížení odporu je odstranění přídavných zařízení (antény, střešní světla, klaksony), která narušují tok vzduchu. Dále aplikace konstrukčních prvků jednoduchých k montáži např.: nafukovací a skládací konec, deflektory, sluneční clona, aerodynamická zrcátka, zástěrky atd. Tato zařízení ovšem nemají až tak výrazný vliv na celkové snížení spotřeby paliva. Efektivnějším, ale z hlediska pořizovacích nákladů, dražším řešením je použití pevných konců, bočních panelů tahače, bočních křídel apod. Naprosto nejlepším řešením jsou tzv. kapkovité návěsy, které s instalací dalších konstrukčních prvků mohou snížit spotřebu pohonných hmot o více než 10% a navíc zvyšují nákladní prostor.

Konstrukční zařízení nejenže snižují spotřebu paliva, ale také emise, hlučnost, znečištění, citlivost na boční vítr a zvyšují bezpečnost vozidel. Díky těmto a mnoha dalším přínosům, které nám aerodynamika nabízí, by si zasloužila naši maximální pozornost.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8.
- [2] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství VLK, Brno 2000, ISBN 80-238-5273-6.
- [3] JANALÍK, J. *Obtékání a odpor těles* [online]. 2008. Ostrava: VŠB - technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>>. ISBN 978-80-248-1911-2.
- [4] *On the Road to a fuel-efficient Truck* [online]. Canada: Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2009- . [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://fleetsmart.nrcan.gc.ca/documents/PDF/trucking.pdf>>. ISBN 978-1-100-13115-3.
- [5] *Understanding Truck And SUV Aerodynamics* [online]. California (USA): Truckin' Magazine, 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.truckinweb.com/tech/body/0602tr_truck_and_suv_aerodynamics/viewall.html#ixzz2PaW75NOY>.
- [6] VANČURA, J. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 77 s.
- [7] ŽÁKOVÁ, M. *Vliv řízené zadní nápravy na stabilitu vozidla při bočním větru*, Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009, 82 s.
- [8] *aerodynamics* [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>.
- [9] Applications. *part20* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.part20.eu/en/applications/trailer>>.
- [10] Are Teardrop Semi Trailers the Future of Fuel Savings?. *Raney's blog* [online]. 2012, ©2010, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://blog.raneystruckparts.com/fuel-efficiency/are-teardrop-semi-trailers-the-future-of-fuel-savings>>.
- [11] CompMechLab ANSYS/LS-DYNA AVI-Gallery. *CompMechLab* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.eng.fea.ru/AVIGallery_CFD_Simulation_Truck_Trailer_Airflow_33.html>.
- [12] M&S Cuts Carbon With Teardrop Trailers. *Don-Bur* [online]. 2007, ©2012, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.donbur.co.uk/eng/news/archives/060913_mands_teardrop_trailer.php#.UY6r6rUUTur>.
- [13] SAJDL, J. Aerodynamika. *Autolexicon.net* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://cs.autolexicon.net/articles/aerodynamika>>.



- [14] SOUČKOVÁ, N; KOLÁŘ, P; TUČEK, A. Simulace proudění tekutin pomocí CFD. *CAD.cz* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>>.
- [15] Striving for Efficiency. *Exa* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.exa.com/aerodynamic-efficiency-commercial-vehicle.html>>.
- [16] TOOREN, M. Aerodynamic Heavy-Duty Truck Trailer Cuts Fuel Consumption and Emissions By Up to 15%. *Green Car Congress* [online]. 2008, ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.greencarcongress.com/2008/04/aerodynamic-hea.html>>.
- [17] TOOREN, M. How Aerodynamic Saves Fuel. *v-flap* [online]. ©2009-2010, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.vflap.com/content/HowAerodynamicSavesFuel.html>>.
- [18] Tractor-trailer aerodynamics. *atdynamics* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.atdynamics.com/aero.htm>>.
- [19] Verified Aerodynamic Technologies. *epa* [online]. ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.epa.gov/smartway/technology/aerodynamics.htm>>.
- [20] ŽEMLIČKA, M. Are Mercedes-Benz SLS AMG Roadster se předčasně odhalil. *Novinky.cz* [online]. 2010, ©2013, [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.novinky.cz/auto/194442-mercedes-benz-sls-amg-roadster-se-predcasne-odhalil.html>>.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[m]	délka obtékaného tělesa
$c_x = c_d$	[-]	součinitel vzdušného odporu
O_v	[N]	celková aerodynamická síla
p	[bar]	tlak
P_∞	[bar]	statický tlak
S_x	[m ⁻²]	čelní plocha
t	[°C]	teplota
v	[ms ⁻¹]	rychlost vozidla
V_∞	[ms ⁻¹]	rychlost volného proudu
v_r	[ms ⁻¹]	rychlost proudění
v_v	[ms ⁻¹]	rychlost větru
V_{VP}	[ms ⁻¹]	rychlost vnějšího proudu
y_n	[m]	normálová vzdálenost
ρ	[kgm ⁻³]	hustota
NO_x		směs oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO ₂