

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AERODYNAMIKA VOZIDEL

AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Markéta Mužíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Markéta Mužíková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Aerodynamika vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Historie aerodynamiky, odpor proti pohybu vozidla, aerodynamické tunely, měření prováděna v aerodynamických tunelech, počítačové simulace aerodynamiky. Základní aerodynamické výpočty. Zajímavé konstrukční řešení osobních a závodních vozidel.

Cíle bakalářské práce:

Základní rešerše vývoje aerodynamiky vozidel. Teoretické základy aerodynamiky. Příklady zajímavých konstrukčních řešení jak osobních a nákladních automobilů tak i závodních automobilů. Rešerše metod ověřování aerodynamických řešení pomocí výpočetní a experimentálních metod. Text práce v rozsahu 20 až 30 stran, obrázky, tabulky.

Seznam doporučené literatury:

KATZ, Joseph. 1995. Race Car Aerodynamics.: Design for Speed. 1. Cambridge: Bentley Publishers. ISBN 0-8376-0142-8.

HOUGHTON a CARPENTER. 2003. Aerodynamics for Engineering Students. 5. Oxford: Butterworth Heinemann. ISBN 0750651113.

ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. 2015. Thermodynamics an engineering approach. 8. New York: McGraw-Hill, 1115 s. ISBN 978-0-07-339817-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou aerodynamiky vozidel osobních, závodních, tak i nákladních. Na základní teoretické poznatky navazují jednotlivá řešení používaná v praxi u konkrétního typu vozidla. Pro vytvoření uceleného přehledu o tomto tématu je zde popsáno testování vozidel v aerodynamických tunelech a numerické modelování s využitím výpočetní techniky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika, automobil, aerodynamický tunel, CFD, proudění.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with aerodynamics of passenger cars, racing cars and trucks too. On the basic theoretical knowledge are connected various solutions used in the practice for a particular type of vehicle. To create a comprehensive overview of this issue is there described testing of vehicles in wind tunnels and numerical techniques with using computational systems.

KEYWORDS

Aerodynamics, automobile, wind tunnel, CFD, flow.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUŽÍKOVÁ, M. *Aerodynamika vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 51 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Aerodynamika vozidel vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. května 2017

.....
Markéta Mužíková

PODĚKOVÁNÍ

Velké díky patří vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále také mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 TEORETICKÝ ZÁKLAD.....	12
1.1 TERMODYNAMICKÉ VELIČINY	12
1.1.1 Hustota	12
1.1.2 Viskozita	12
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY PROUDĚNÍ PLYNU	12
1.2.1 Aerodynamické síly a momenty	12
1.2.2 Proudové pole a proudnice.....	15
1.2.3 Vzdušný odpor	15
1.2.4 Mezní vrstva.....	15
1.2.5 Proudění laminární a turbulentní.....	16
1.3 ROVNICE	18
1.3.1 Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity.....	18
1.3.2 Zákon zachování energie – Eulerova a Bernoulliho rovnice	19
2 HISTORICKÝ VÝVOJ	20
2.1 ZÁKLADNÍ TVARY.....	20
2.2 PROUDNICOVÉ TVARY	21
3 AERODYNAMIKA OSOBNÍCH VOZIDEL.....	24
3.1 HISTORICKÉ ÚPRAVY	24
3.2 NOVODOBÉ ÚPRAVY VOZŮ	24
3.2.1 Vliv jednotlivých typů karoserií na aerodynamiku vozu	24
3.2.2 Aerodynamické prvky	27
4 AERODYNAMIKA ZÁVODNÍCH VOZIDEL	29
4.1 ZÁVODNÍ VOZY SE ZAKRYTÝMI KOLY	29
4.2 ZÁVODNÍ VOZY S NEZAKRYTÝMI KOLY	31
5 AERODYNAMIKA NÁKLADNÍCH VOZIDEL	33
5.1 KONSTRUKCE NÁKLADNÍCH VOZIDEL VZHLEDEM K AERODYNAMICE.....	33
5.2 MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH VELIČIN	35
6 AERODYNAMICKÉ TUNELY	36
6.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL S OTEVŘENÝM OKRUHEM.....	37
6.2 AERODYNAMICKÝ TUNEL S UZAVŘENÝM OKRUHEM	38
6.3 DĚLENÍ TUNELŮ DLE TYPU TESTOVACÍ OBLASTI	39
6.4 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ.....	40
7 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ.....	41
7.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ V AERODYNAMICE.....	41
7.2 CFD ANALÝZA PROUDĚNÍ	41
7.2.1 Postup řešení CFD výpočtu.....	42
7.2.2 Modelování v praxi	43
ZÁVĚR	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	49
SEZNAM TABULEK	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	50
INDEXY	51

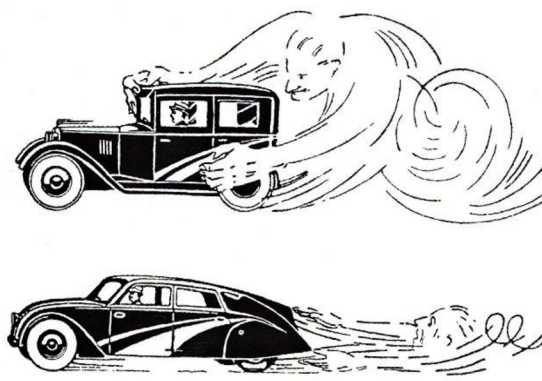
ÚVOD

Během desítek let jsme se stali svědky neuvěřitelných pokroků v automobilovém průmyslu. V dnešní době si neumíme každodenní život bez dopravních prostředků představit, avšak od prvních prototypů až k současné podobě vozů se událo mnoho zásadních změn, které ve velké míře souvisely právě i s aerodynamikou. Ačkoli lidé měli určité představy o mechanice tekutin několik století, teprve s příchodem motorizace vozidel mohli lépe chápat například proudění vzduchu a k největšímu pokroku došlo právě ve století minulém.

Konstruktéři své návrhy neustále zdokonalují a vozidla začala postupně dosahovat vyšších a vyšších rychlostí. U osobních automobilů hraje rychlost menší roli, zatímco u automobilů na závodním okruhu či trati, může rozhodovat o vítězství každá setina sekundy. Dalším důležitým aspektem, proč se zabývat do větší hloubky prouděním vzduchu kolem karoserie vozidel, je stabilita vozu. Ta je důležitá například při vyšších rychlostech, jízdě v zatáčkách či předjíždění. Z toho jednoznačně vyplývá její velký význam v otázce bezpečnosti na silnici. V neposlední řadě související klesající spotřeba šetří finanční prostředky. Se spotřebou si spojíme také emise, které se staly velmi diskutovaným tématem. Všechny tyto požadavky se musí skloubit do designového řešení, které bude i praktické a bude poskytovat pro daný účel vozu dostatečné pohodlí a prostor. I když se většinou s aerodynamikou setkáváme u osobních vozů, nesmíme opomenout existenci nákladních automobilů či autobusů, u kterých nad designem musí zvítězit funkční požadavky nebo například bezpečnost v případě autobusu.

Aerodynamika je velmi obsáhlý obor spojující techniku s přírodní vědou, a proto vyžaduje přijetí celé řady základních definic, názvosloví a matematických vyjádření. V minulosti se všechny předpoklady musely dokázat, pro specifické případy se používaly určité modely a ověření či vyvrácení hypotéz trvalo mnohem delší dobu. Dnes však využíváme v hojné míře testování v podobě aerodynamických tunelů na ověření předpokládaných hodnot, výpočtové modely či počítačové simulace, jenž ulehčí práci mnohým konstruktérům. S využitím počítačové techniky jsme schopni vypočítat výsledné aerodynamické působení s vysokou přesností a snadno návrhy konstruktérů optimalizovat pro dosažení spokojenosti na straně inženýrů i uživatelů.

Avšak abychom pochopili danou problematiku, je nutné se seznámit se základními pojmy a principy. Teprve pak přejdeme k aerodynamickým řešením daných automobilů.



Obr. 1 - Dobová reklama na aerodynamický automobil Tatra [1]

1 TEORETICKÝ ZÁKLAD

Aerodynamiku jako vědní fyzikální obor zařazujeme do mechaniky tekutin, respektive dynamiky. Přičemž se zabývá prouděním tekutin¹ kolem těles a silovými účinky tímto prouděním vyvolanými. Poznatků tohoto oboru využíváme především u konstrukce dopravních prostředků.

Proudění tekutin spjaté s vozidly můžeme rozdělit do dvou skupin, a to do vnější aerodynamiky, zabývající se prouděním kolem vozidla včetně jeho detailů, a do vnitřní aerodynamiky, týkající se proudění například skrz chladicí systém. Dále se budeme v této práci zabývat pouze vnější aerodynamikou.

1.1 Termodynamické veličiny

1.1.1 Hustota

U aerodynamiky uvažujeme většinou stlačitelné tekutiny – plyny, které na rozdíl od kapalin vyplňují celý prostor, v němž se nacházejí. Hustota plynu vyjadřuje rozložení hmotnosti v tomto prostoru. Závisí na místě a čase, v němž ji uvažujeme. V tekutinách závisí i na tlaku a teplotě. Značíme ji ρ a v případě, že hovoříme o suchém vzduchu za podmínek na úrovni hladiny moře ($p = 101 \text{ kPa}$ a $T = 288 \text{ K}$) má hodnotu $\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$ [2].

1.1.2 Viskozita

Viskozita neboli vazkost je způsobena třením molekul mezi částicemi tekutiny. Při proudění skutečné kapaliny udává poměr mezi gradientem rychlosti a tečným napětím v závislosti na vzdálenostech mezi sousedními vrstvami. V ideálním případě by byla viskozita nulová [2].

Zavádíme pojem dynamická vazkost η , uplatňující se ve vazkých napětích, která vznikají při smykové deformaci elementu tekutiny, kde se mění objem tekutiny, ale zachovává se současně jeho tvar. Rovněž zavádíme kinematickou vazkost ν .

Kinematickou a dynamickou viskozitu můžeme navzájem přepočítávat podle následující rovnice [2]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1)$$

1.2 Základní pojmy proudění plynu

Před tím, než se můžeme zabývat aerodynamikou v praxi, je nutné definovat několik základních pojmů, které poskytují přehled z vědeckého hlediska.

1.2.1 Aerodynamické síly a momenty

Vzduch proudící kolem karoserie se vychýlí ze své původní dráhy. Takovéto změny dráhy pak vedou následně i ke změnám rychlosti vzduchu. Také viskozita vzduchu vede

¹ Tekutina je souhrnný název pro kapaliny a plyny, v aerodynamice pracujeme většinou se stlačitelnými tekutinami – vzduchem, spaliny, vodní parou, či dalšími plyny.

k existenci nepatrných sil směřujících k omezení proudění. Je obvyklé aerodynamickou sílu a moment dělit do několika částí [3]:

- Vztlak

Je část síly působící směrem nahoru kolmo ke směru neovlivněného proudu vzduchu.

$$F_L = \frac{1}{2} c_L \rho w_\infty^2 A \quad (2)$$

- Aerodynamický odpor

Jedná se o složku síly působící proti směru pohybu, nebo ve stejném směru jako je pohyb neovlivněného proudu vzduchu. Tato síla je ta, která brání pohybu prostředku.

$$F_D = \frac{1}{2} c_D \rho w_\infty^2 A \quad (3)$$

- Boční síla větru

Složka síly navzájem kolmá se vztlakem a aerodynamickým odporem podél rozpětí bočního profilu, se nazývá boční síla větru.

$$F_Y = \frac{1}{2} c_Y \rho w_\infty^2 A \quad (4)$$

- Klopivý moment

Moment působící v tělese zahrnující vztlak a odpor.

$$M_X = \frac{1}{2} c_{MX} \rho w_\infty^2 A l \quad (5)$$

- Zatačivý moment

$$M_Z = \frac{1}{2} c_{MZ} \rho w_\infty^2 A l \quad (6)$$

- Klonivý moment

$$M_Y = \frac{1}{2} c_{MY} \rho w_\infty^2 A l \quad (7)$$

Tyto jednotlivé složky sil a momentů dohromady tvoří vektor výsledné síly působící na vozidlo. Pro zjištění výsledných silových účinků využíváme měření v aerodynamických tunelech. Pomocí měření dokážeme zjistit i aerodynamické koeficienty, pomocí nichž můžeme porovnávat karoserie vozidel z hlediska aerodynamiky.

Aerodynamické koeficienty

Aerodynamické koeficienty jsou bezrozměrné hodnoty, které zohledňují vliv působících sil.

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro vztlak}^2 \quad (8)$$

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro aerodynamický odpor} \quad (9)$$

$$c_Y = \frac{F_Y}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro boční sílu} \quad (10)$$

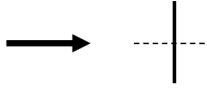
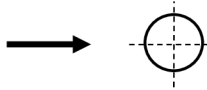
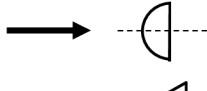


$$c_{M_x} = \frac{M_x}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro klopivý moment} \quad (11)$$

$$c_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro zatačivý moment} \quad (12)$$

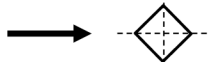
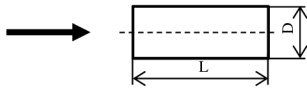
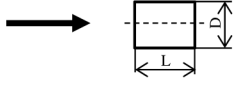
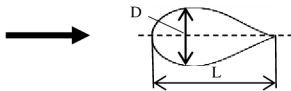
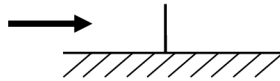
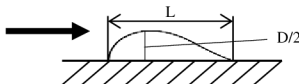
$$c_{M_y} = \frac{M_y}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A} \quad \text{pro klonivý moment} \quad (13)$$

Pro lepší představu o hodnotách koeficientů je zde uvedena následující tabulka.

Tab. 1 - Koeficienty aerodynamických odporů pro několik tvarů těles

Tvar	Nákres situace proudění	c_D
Kruhová deska		1,17
Koule		0,47
Polokoule		0,42
Kužel 60°		0,50
Krychle		1,05

² Při záporné hodnotě koeficientu se jedná o přitlak.

Krychle		0,80
Válec $L/D > 2$		0,82
Válec $L/D > 1$		1,15
Proudnicový tvar		0,04
Poloviční kruhovitá deska na zemi		1,19
Poloviční proudnicový tvar na zemi		0,09

1.2.2 Proudové pole a proudnice

Pojmu proudové pole využíváme při vyšetřování (jak kinematickém, tak i dynamickém) rovinného i prostorového proudění tekutiny. Skalární či vektorové pole je prostor, v němž každému bodu přísluší v určitém čase skalární nebo vektorová veličina. Orientované čáry pole, pro něž tečna v každém jejich bodě je nositelkou vektoru pole, nazýváme vektorovými čárami [3, 4].

V konkrétním případě rychlostního pole využívaného u aerodynamiky můžeme hovořit o proudových čarách známých pod rozšířenějším názvem proudnice. Každým bodem proudového pole prochází jen jedna proudnice a proudnice se navzájem neprotínají. Proudnice jsou imaginární čáry, ovšem dají se vizualizovat (viz kapitola 7).

1.2.3 Vzdušný odpor

Při jízdě vozidla se proud vzduchu rozdělí na proud proudící nad karoserií vozidla a na proud, který se protlačí mezi vozovkou a spodní částí karoserie. Za vozidlem dochází k víření proudnic, čímž vzniká odpor, který je označován jako vzdušný. Velikost vzdušného odporu je dána výslednicí normálových tlaků vzduchu na povrch karoserie a třecích sil, které působí v tečném směru proudění vzduchu kolem karoserie [3].

V příčné rovině vozidla dochází také k víření vzduchu, ale tento tlak není stejný jako v podélném směru. Říká se mu indukovaný vzdušný odpor a je součástí celkového vzdušného odporu. Do celkového vzdušného odporu uvažujeme také odpory procházející chladicím a větracím systémem a odpory vznikající třením a vířením vzduchu u kol vozidla [3].

1.2.4 Mezní vrstva

Při proudění vzduchu kolem vozu, za předpokladu, že se proud vzduchu nijak nerozdělí, jsou viskózní účinky vzduchu omezeny na tenké vrstvě o tloušťce několika milimetrů, které říkáme mezní vrstva. Nad touto vrstvou je proud nevazký. V mezní vrstvě se snižuje rychlost z hodnoty nevazkého vnějšího proudu na vnějším okraji mezní vrstvy až na nulu

na povrchu vozidla, kde tekutina – vzduch protéká bez prokluzu. Je-li proud v zadní části vozidla oddělen, mezní vrstva se rozptýlí a průtok se zcela řídí viskózními účinky. Tato oblast za vozem je poměrně významná v porovnání s celkovou délkou vozu. V určité vzdálenosti za vozem pak neexistuje rozdíl mezi „původním“ a ovlivněným proudem vzduchu [3].

Pojem mezní vrstvy je platný pouze pro velké hodnoty Reynoldsova čísla, pro které platí vztah [2]:

$$Re_l = \frac{w_\infty l}{\nu} > 10^4 \quad (14)$$

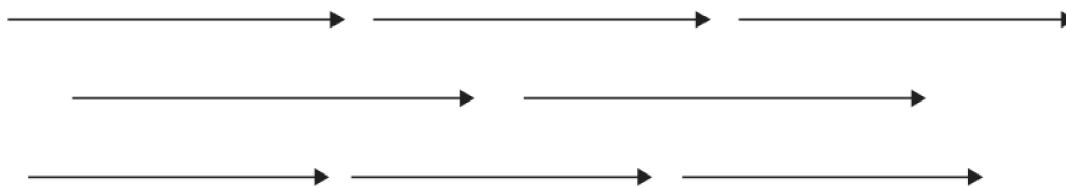
Při zahrnutí kinematické viskozity, rychlosti proudu vzduchu a charakteristické délky vozidla získáme bezrozměrné Reynoldsovo číslo, podle kterého můžeme posoudit charakter viskózního proudění kolem vozu. Tento charakter závisí dále i na tvaru vozidla. Různá Reynoldsova čísla mohou znamenat změny proudění i při předpokladu stejné geometrie vozidla. Pomocí tohoto čísla posuzujeme tedy, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní [2, 4].

1.2.5 Proudění laminární a turbulentní

Jak už bylo výše řečeno, proudění podle charakteru můžeme dělit na laminární a turbulentní. Toto rozdělení je dle hodnoty Reynoldsova čísla, ovšem nemůžeme uvažovat určitou hodnotu jako mezní, kde dochází ke změně typu proudění, neboť závisí na několika parametrech.

Laminární proudění

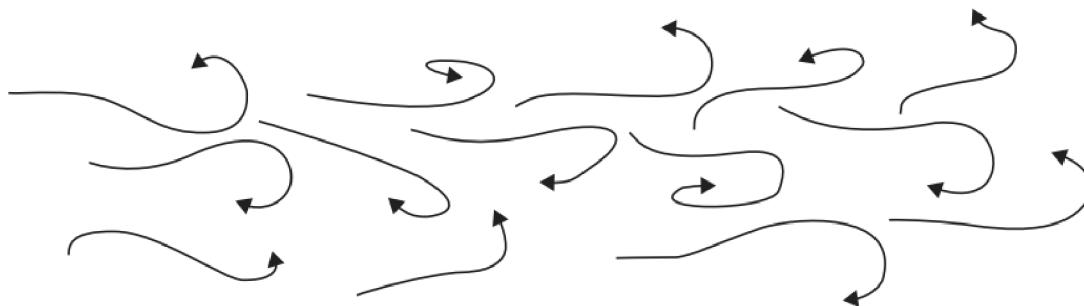
Proudění tekutiny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné, obr. 2, se nazývá laminární. Nedochozí zde k mísení tekutiny mezi jednotlivými vrstvami. Reynoldsovo číslo je menší než jeho kritická hodnota. Parametry proudu, jako jsou rychlost, směr a tlak, se mohou měnit, bod od bodu v proudu, ale ve všech bodech jsou konstantní v závislosti na čase. Setkáváme se s ním při nízkých rychlostech [3].



Obr. 2 - Schématické znázornění laminárního proudění

Turbulentní proudění

Turbulentní proudění se vyznačuje tím, že proudnice nejsou rovnoběžné, dochází k víření proudu, obr. 3, a mezi jednotlivými vrstvami látky se vyměňuje více energie a hmoty. Kinetická energie vírového pole se rozptýlí turbulentním vířením a dojde k nevratné přeměně na teplo způsobené třením. To vede k celkové ztrátě tlaku za vozem a odpovídající deficit kinetické energie je roven práci, která je potřebná k překonání tlakového odporu³. Parametry proudu se mění v závislosti na čase. Za vozem se tvoří dále úplav. K turbulentnímu proudění dochází při vyšších rychlostech, ale také při vysokých Reynoldsových číslech. Mezi jeho charakteristické znaky patří nahodilost a neperiodičnost [3, 5].



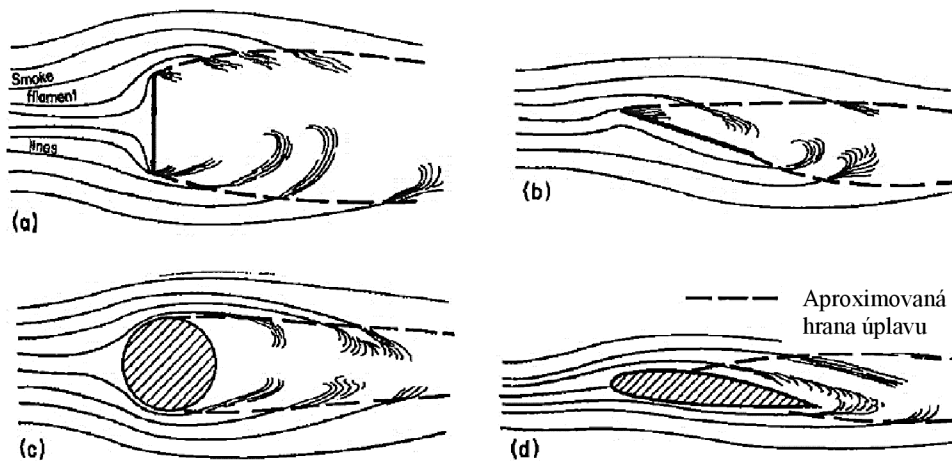
Obr. 3 - Schématické znázornění turbulentního proudění

Úplav

K pojům laminárního a turbulentního proudění patří i další z pojmů. Za každým subjektem pohybujícím se ve vzduchu se vyskytuje úplav. I když není viditelný, můžeme ho pocítit například, když kolem nás projíždí autobus. Tímto pojmem označujeme oblast proudu vzduchu za odtokovou hranou objektu – vozu. Jednodušeji řečeno se jedná o oblast, která vznikla odtržením mezní vrstvy od povrchu karoserie. Podstatnou roli zde sehrává tvar karoserie [6].

Úplav je negativní jev, proto se ho snažíme redukovat velikostí základní plochy. V případě odtržení mezní vrstvy u laminárního proudění je úplav větší, než je tomu v případě proudění turbulentního. Celkový odpor tělesa se projeví jako ztráta hybnosti a vzrůst energie v tomto úplavu. Ztráta hybnosti pak znamená snížení průměrné rychlosti proudění, zatímco zvýšení energie se projeví vířením v úplavu. Velikost a intenzita úplavu je tedy indikací profilového odporu tělesa. Obr. 4 nám pak dává srovnání šířek úplavů za některými profily [6].

³ Tlakový odpor je odpor, který je generován pomocí složek sil působících kolmo k povrchu na všech místech povrchu.



Obr. 4 - Chování kouřových částic v proudu kolem různých profilů [3]

- Plochá deska umístěná kolmo k proudu. V tomto případě úplav osciluje nahoru a dolů u několika cyklů za sekundu.
- Plochá deska v poměrně vysoké incidenci.
- Válec při nízké hodnotě Re .
- Profil křídla při mírné incidenci a při nízké hodnotě Re .

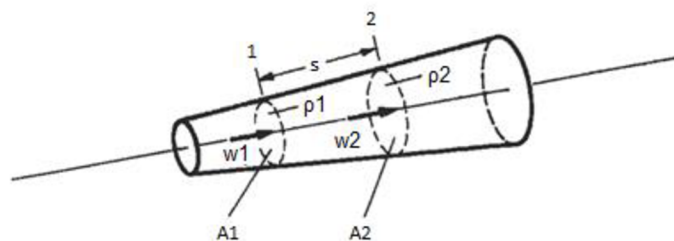
1.3 Rovnice

Ve všech reálných případech proudění se aplikují zákony zachování energie, hmoty a hybnosti. Stavová rovnice pak dokončí sadu rovnic potřebných k řešení neznámých parametrů proudění.

V historii se pro nedostatek informací používaly mnoha zjednodušení, jako například zanedbání vlivu viskozity tekutiny, či proudění pouze se stlačitelnou tekutinou, které měly za následek jisté nepřesnosti. S neustálým pokrokem aerodynamiky jako vědy se zakládaly nové teorie.

1.3.1 Zákon zachování hmotnosti - rovnice kontinuity

Tento zákon vyjadřuje přesvědčení, že hmota při klasických situacích nemůže být vytvořena či zničena. V případě ustáleného toku v proudové trubici, viz obr. 5, v průřezu 1 a 2, vzdálených od sebe o určitou vzdálenost s , naměříme v daném průřezu hustotu a rychlost proudu. Předpokládáme pak, že množství látky (vzduchu) je konstantní neboli průřezem 1 projde stejné množství hmoty jako průřezem číslo 2 [3, 7].



Obr. 5 - Proudová trubice [3]

V tom případě platí rovnice kontinuity, známá také jako zákon zachování hmotnosti

$$A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2, \quad (15)$$

kteřou můžeme přepsat do podoby základního vztahu:

$$\dot{m} = A \cdot w \cdot \rho = konst \quad (16)$$

1.3.2 Zákon zachování energie – Eulerova a Bernoulliho rovnice

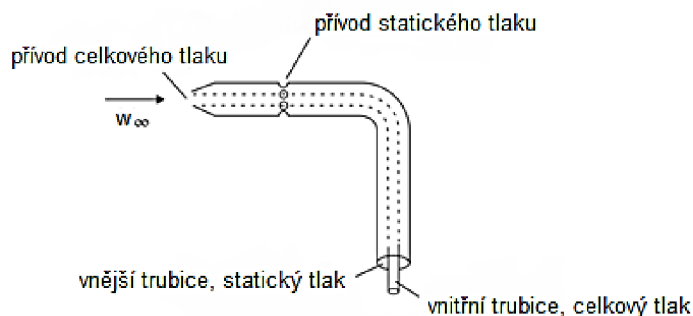
Základ mechaniky tekutin byl položen v 18. století, a to jedním z nejznámějších vědců Danielem Bernoullim, který spojil souvislosti několika veličin. Nicméně do této rovnice zasáhl později jeho přítel Leonhard Euler, který dal rovnici podobu, v jaké ji známe dnes [7].

Takzvaná Bernoulliho rovnice popisuje souvislost mezi rychlostí vzduchu a tlakem. Formulace může být použita na proudnice, přičemž podél jakéhokoli bodu proudnice je vztah mezi lokálním tlakem v klidovém stavu, hustotou a rychlostí dán tímto vztahem [8]:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} = konst \quad (17)$$

Hodnota konstanty není důležitá, protože rovnice pouze porovnává dané veličiny mezi dvěma body v proudu vzduchu. V nevazkém proudu je suma statických a dynamických tlaků konstantní podél proudnice. Tato rovnice poukazuje na fakt, že nízké tlaky znamenají vysoké místní rychlosti a naopak.

Princip Bernoulliho rovnice umožňuje měřit rychlost v bodě proudu jednoduchým měřením rozdílů tlaků. Přístroj využívající takového rozdílu se nazývá Pitotova trubice, jenž své pojmenování získal po francouzském inženýrovi Henrim Pitotovi. Původní účel, pro který byla Pitotova trubice určena, bylo měření říčních toků. Základní aparát Pitotovy trubice, který můžeme vidět na obr. 6, se skládá ze dvou soustředných trubek. Předpokládá se, že na špičce se rychlost zastaví. Proto na jeho špičce vnitřní trubka měří celkový tlak, který se zvyšuje v závislosti na zvyšování rychlosti proudění. Otvor obklopující vnější trubku měří tlak statický, ten by měl odpovídat nenarušenému proudění (v neko-nečnu), který není ovlivněn rychlostí vozidla. Hodnoty měřené přístrojem mohou být zobrazeny na displeji [3].



Obr. 6 - Pitotova trubice [7]

2 HISTORICKÝ VÝVOJ

Kdybychom měli určit, kdy přesně se začali lidé zabývat aerodynamickým tvarem, počátky tohoto zkoumání by byly ke konci 19. století. Dále pak historii aerodynamiky vozidel od 20. století můžeme rozdělit do čtyř základních fází.

Počáteční vývoj se zaměřoval výhradně na odpor vzduchu a problém s citlivostí bočního proudění vzduchu se pouze navyšoval s rostoucí rychlostí a nebyl brán na něho zřetel. Pozdější pokusy se zaměřovaly hlavně na usazování nečistot a vody na sklech a světlech.

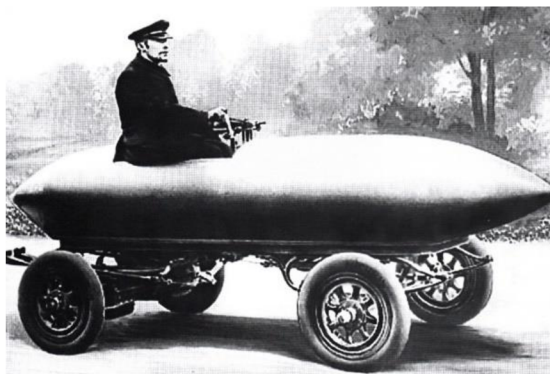
Následující etapa byla založena na dostupné literatuře. První naměřená data musí být považována za velmi nespolehlivá. Měření probíhala často ve špatných podmínkách (například v nejméně dosažitelných rychlostech), které mohly vést ke značným chybám. Většina dat pocházela z měření v aerodynamických tunelech, kde se testovalo na modelech, jež se značně lišily nejen kvalitou, ale i měřítky [7].

2.1 Základní tvary

V prvním období datujícího se od začátku 20. století byl zde pokus použit jako výchozí již známé proudnicové tvary z jiných odvětví – letectví, námořnictví atd. Inspirace vzducholodí či zadní částí lodě se ukázala nevhodná a neefektivní. Kvůli nízkým výkonům motorů a značně nekvalitním povrchům vozovky vozidla stále dosahovala nižších rychlostí, takže aerodynamický odpor hrál méně důležitou roli. Většina vozidel odvozených od základních tvarů měla jednu společnou chybu. Zanedbal se fakt, že proudění kolem karoserie není osově symetrické, když je automobil na vozovce a jsou na něm připevněny nápravy a kola [2].

Navzdory tomu tyto nové tvary znamenaly skvělý pokrok ve snížení odporu ve srovnání s kočáry. Za nejstarší automobil podle aerodynamických principů je považován elektricky poháněný vůz Camilla Jenatzyho⁴ – Jamais-Contente, který jako první překročil hranici 100 kilometrů za hodinu 29. dubna roku 1899, viz obr. 7. S tímto torpédovým tvarem a poměrem délky k průměru 4 bylo tělo karoserie samo o sobě proudnicové. Nezakrytá kola a řidič vedli ke značnému zvýšení odporu. Jenatzyho automobil se stal předchůdcem jednomístných závodních vozů, ačkoli karoserie byla umístěna spíše nad, než mezi koly [1, 2].

⁴ Camille Jenatzy (1868–1913) byl jednou z přelomových osobností automobilismu. Celkově třikrát překročil rychlostní rekord na světové úrovni. Ačkoliv studoval stavební inženýrství, jeho vášní byl motorsport. Prvního automobilového závodu se zúčastnil v listopadu roku 1898 s elektrickým automobilem pocházejícím z vlastní manufakturní výroby [9].



Obr. 7 - Vůz Jamais-Contente [1]

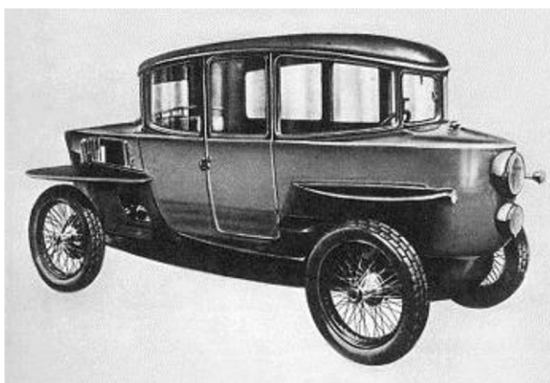
Tento rekord však byl po sedmi letech překonán americkým závodníkem Fredem Marriottem, a to rovnou rychlostí 205,5 km/h na závodním okruhu ve státě Florida [2].

Následníci Jenatzyho vozu byly více či méně proudnicového tvaru, často se zadním žebrem, které vylepšovalo stabilitu vozu. Dalším milníkem v historii aerodynamiky se stal Henry Seagrave se svým vozem zvaným „Golden Arrow“ (zlatý šíp), ten v roce 1929 dosáhl rychlosti 372,456 km/h [2].

2.2 Proudnicové tvary

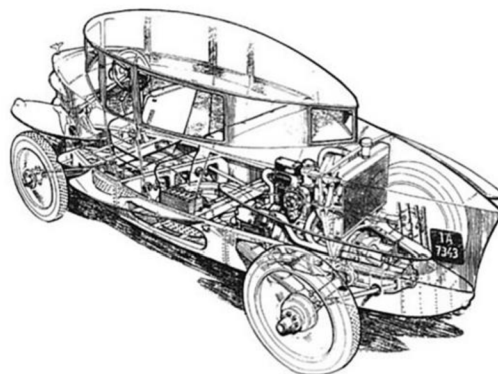
Analýza trakčního odporu, kterou se začali konstruktéři zabývat krátce po přelomu století, dala aerodynamice vozidel teoretický základ. Při sepsání tohoto základu se lidé často nechávali inspirovat přírodou, v níž si povšimli dokonalosti aerodynamických tvarů, jako například kapky vody či křídla ptáků.

Po první světové válce vzrostl počet proudnicových automobilů v mnoha místech. E. Rumpler, který se stal slavný díky jeho úspěšnému letadlu zvanému „Rumpler-Taube“ (Rumplerova holubice), také vyvinul několik vozidel kapkovitého designu. Nejslavnější vůz ním navržený je z roku 1924 viz obr. 8. Aby využil úzký prostor v zadní části vozu, rozhodl se pro uspořádání s motorem právě v tomto zúženém prostoru. Podle výsledků naměřených v tunelu u Rumplerova vozu hrál zásadní roli aerodynamický odpor, který se zvýšil díky nezakrytým kolům. Dle konstruktérových předpokladů by rozdíl v odporu byl až 50 %, kdyby tato kola byla zakrytá [2].



Obr. 8 - Rumplerův vůz z roku 1924 [10]

Vozy se tehdy konstruovaly podle dvou teorií, a to buď podle takzvané dvou-rozměrného, nebo tří-rozměrného obtékání vzduchu (viz obr. 9). Před druhou světovou válkou se takovéto dvou-rozměrné návrhy zrealizovaly i v závodním světě, ale jejich značnou nevýhodou bylo velké proudění pod karoserií. Co se týče druhého případu – troj-rozměrného proudění, setkali jsme se s ním poprvé v práci P. Jarayho. Ten ve své práci poprvé také zmínil „proudnicový automobil“. Přišel totiž na to, že sice dvou-rozměrné proudění dosahuje velmi příznivých hodnot, když je tento tvar volně ve vzduchu, ale tyto hodnoty nejsou vůbec přívětivé při „posazení“ vozu na zem. Na vylepšení hodnot se projeví návrhy karoserií s integrovanými koly. Časem se měnil i poměr délky vozu k výšce z původní hodnoty 4 na hodnotu pohybující se kolem 2, přičemž v dnešní době se průměrně pohybuje okolo 3 [1, 7, 11].



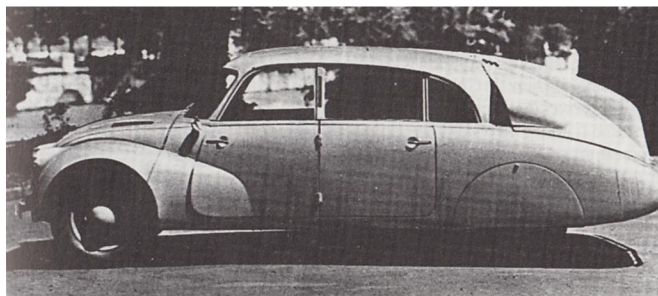
Obr. 9 - Vůz Tropfenwagen s koeficientem $c_D=0,28$ [7]

Ověření Jarayho hypotéz se uskutečnilo v tunelu na několika typech karoserií demonstrováných pomocí segmentů různých profilů. V roce 1935 sepsal tabulku pro jednotlivé typy karoserií na základě aerodynamických hledisek.

Několik Jarayho prototypů a návrhů bylo uskutečněno menšími výrobci automobilů v Evropě a ve Spojených státech. Tyto prototypy však nebyly snadno přijaty veřejností. Jejich tvar byl příliš kontroverzní a také sám Jaray měl ke zhotoveným vozům výhrady. Prototypy postavené různými značkami se takřka v ničem nelišily. Jaray však po několika letech přišel na další zlepšení týkající se užšího profilu vozu a svažující se zadní části, jež vedly ke snížení užité hodnoty vnitřního prostoru.

Za popularitou proudnicových vozů stálo i postavení sítě dálnic, dokud tuto éru Jarayho automobilů nepřerušila 2. světová válka. Jedním z populárních vozů, vycházejících z Jarayho principů s designem Hanse Ledwinky⁵, byla například Tatra 87, obr. 10. Zde byl motor umístěn v zadní části, tudíž se posunul prostor kabiny směrem dopředu a poskytoval větší komfort pro pasažéry. Model této Tatry v měřítku 1:5 byl testován v aerodynamickém tunelu v Berlíně s překvapivě výborným výsledkem hodnoty koeficientu $c_D=0,244$, přičemž vypočtená hodnota byla $c_D=0,31$ [11].

⁵ Hans Ledwinka (1878–1967) byl rakouský automobilový konstruktér, díky němuž se automobilka Tatra dostala z odbytové krize a stala se průkopníkem v tvorbě nových karoserií. V jeho šlépějích šli i synové. Několikrát byl oceněn inženýry u nás i ve své vlasti.



Obr. 10 - Tatra 87, design Hanse Ledwinky [2]

Dále do „hry“ vstoupil W. Klemperer, který se dostal se svým návrhem na neuvěřitelnou hodnotu koeficientu aerodynamického odporu 0,15 s nekompromisním designem. Jarray se tomuto rekordu snažil přiblížit, ale vždy navrhl velmi nepraktické řešení a tato hodnota byla pro něj nedosažitelná [11].

Nutno podotknout, že k těmto revolučním pokrokům nedocházelo jen na území Evropy, ale i například ve Spojených státech, kde na počátku 30. let působil v Michiganu W. E. Lay, který se také pokoušel o vytvoření aerodynamického vozidla. Tento vědec šel na to poněkud z jiné strany, a to tak, že zkoumal jednotlivé aerodynamické efekty zvlášť a snažil se krok po kroku modifikovat daný model karoserie. Jeho práce měla bohužel několik větších nedostatků, jež navyšovaly odpory vzduchu [2, 11].

Již známé výsledky a teorie využil pro svou práci další konstruktér W. Kamm. Ten spojil návrhy jeho kolegů a sestavil model kombinující dostatek prostoru pro hlavy pasažérů na zadních sedadlech a nízký koeficient c_D . První pasažéři se svezli v takovémto vozu v roce 1938 [2].

Ačkoli se aerodynamika vozidel zpočátku soustředila na odpor vzduchu za bezvětří (symetrické proudění vzduchu), problém s bočním větrem stejně jako s chlazením a větráním byl zjevný, jak poznamenal sám Klemperer na základě svých poznatků a měření.

Opravdové proudnicové tvary byly používány velmi sporadicky u většiny produkováných automobilů a potenciál návrhů těchto konstruktérů byl z části nevyužitý. Pokrok těchto automobilů byl přerušen válkou a jejich odkaz zůstal po ní jen v malé míře.

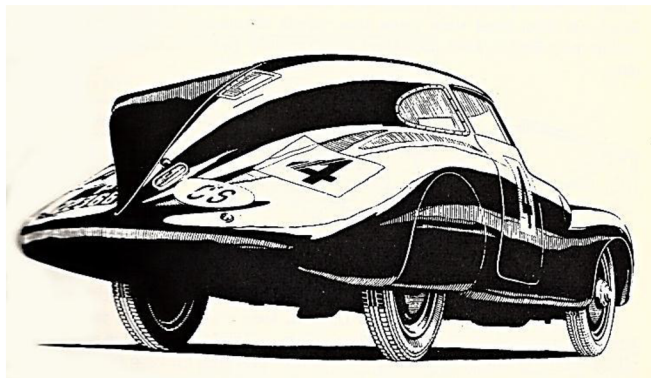
3 AERODYNAMIKA OSOBNÍCH VOZIDEL

Aerodynamiky u osobních vozidel si začali lidé všimnout, jakmile první z nich spatřila světlo světa. Nejdůležitějšími pak sledovali aerodynamický odpor a vztlak. Díky znalostem teoretických základů mohli popisovat konstrukční změny, které se provádějí na automobilech dodnes.

3.1 Historické úpravy

Ve chvíli, kdy se stal populární takzvaný proudnicový tvar karoserie, začali konstruktéři zvažovat na automobilu každý detail. Díky novému vnímání konstrukce se musel změnit nejen vzhled vozu, ale také uspořádání pohonné jednotky a dalších funkčních částí automobilu. Tyto opatření v důsledku znamenaly rovnoměrnější rozložení hmotnosti v automobilu a také samozřejmě zlepšily jízdní vlastnosti.

Mezi prvními změnami na karoserii se projevilo zmenšení plochy přední kapoty a prodloužení zadní části. Po prodloužení zadních partií zde bylo možné umístit pohonnou jednotku, tím snížit hluk v interiéru a vyhrát si se stylizací do „novodobých“ měřítek. S přemístěním pohonné jednotky došlo i k přemístění hnané nápravy. K nejpobulárnějším úpravám patřilo také zakrytování kol (viz obr. 11) – částečné nebo celé. Někdy tyto úpravy vypadaly přehnaně, avšak byly účelné [1, 11].



Obr. 11 - Jarayho karoserie se zakrytovanými koly [11]

Jednou z jednoduchých možností, jak měnit aerodynamiku vozu, se ukázalo nastavení světlé výšky podvozku a sklonu pomocí nastavení odpružení. Mezi prvními vozy s hydraulickým odpružením, u něhož nebylo toto konstrukční řešení navrženo primárně pro aerodynamiku vozu, byl Citroen DS (kolem roku 1960) [11].

3.2 Novodobé úpravy vozů

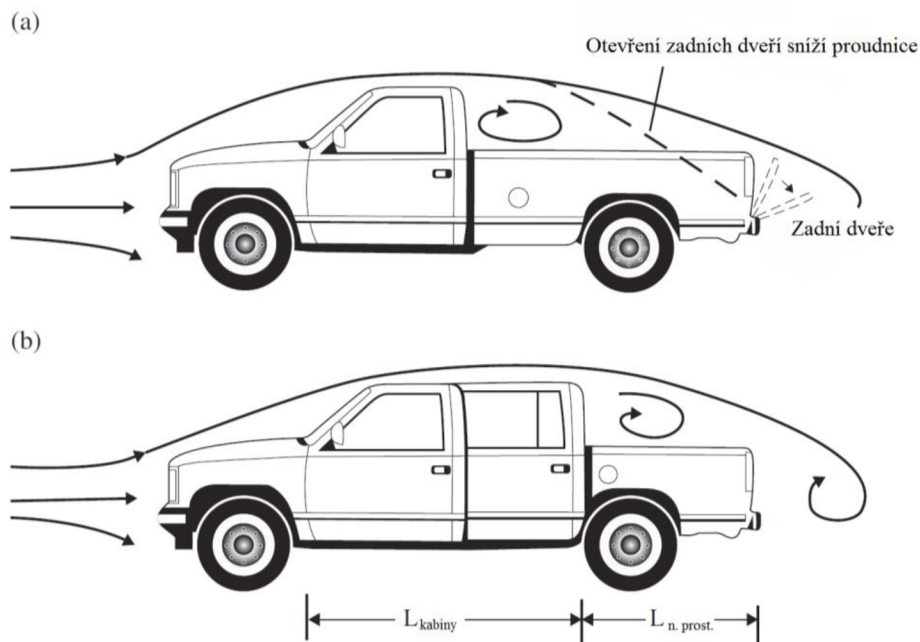
Abychom zlepšili v dnešní době jízdní vlastnosti vozů, případně spotřebu paliva, nemusíme zdaleka měnit celé konstrukční řešení vozu. Díky mnohaletým zkušenostem se již automobilky naučily základní řešení navrhovat s velmi dobrými výsledky. Rozdíly v aerodynamických parametrech jsou dnes minimální, proto stačí úpravy menšího charakteru.

3.2.1 Vliv jednotlivých typů karoserií na aerodynamiku vozu

Dnešní trh automobilů nabízí daleko větší množství typů karoserií, než tomu bylo ve století minulém. Data testovaná výrobcí jsou do jisté míry ovlivněná metodami měření nebo použitím statické polohy automobilu. V některých případech bude mít vůz s karoserií kombi lepší hodnoty než vůz s karoserií dobře zkonstruovaného hatchbacku či sedanu.

Typ automobilu SUV má robustnější karoserii, neboť primárně je určeno jako vozidlo užitkové se schopností jezdit v terénu. Robustnější tvary a relativně ostré hrany způsobí nejvyšší aerodynamický odpor ze všech osobních vozů.

Příkladem nepředvídatelnosti aerodynamiky jsou pick-upy. Tyto vozy byly primárně navrženy jako pracovní nástroj, čemuž odpovídá praktické uspořádání vozu. Existují verze krátké i delší, s jednoduchou nebo duální kabinou. Je ovšem zajímavé, že nižších hodnot aerodynamických odporů dosahují právě vozy s delším nakládacím prostorem a kratší kabinou pro posádku, přesně opačně, než by se dalo očekávat. Na obr. 12 vidíme proudění kolem karoserie typu pick-up s jednoduchou (obr. 12.a) a duální kabinou (obr. 12.b) [7].



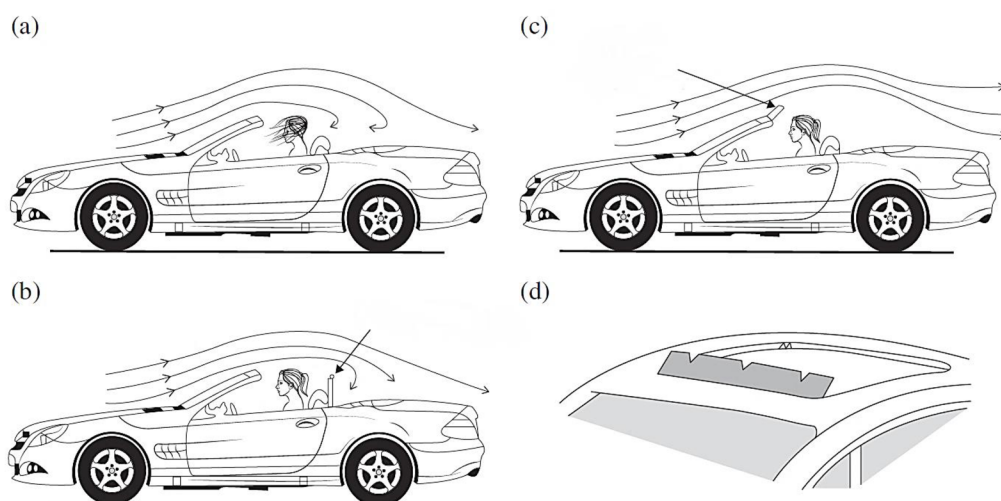
Obr. 12 - Schématické znázornění proudění kolem karoserie pick-upu [7]

Koeficienty c_D se pohybují u pick-upů mezi hodnotami 0,40 – 0,50. V následující tabulce 2 vidíme, jakým způsobem se hodnoty mění při snížení zadních dveří či zakrytí nákladního prostoru [7].

Tab. 2 – Přehled změn aerodynamického koeficientu c_D u pick-upů

	Základní hodnota	Snížení zadních dveří	Zakrytí nákladního prostoru
Jednoduchá kabina	0,483	+1,0 %	-7,0 %
Prodloužená verze kabiny	0,472	+1,8 %	-5,7 %

Jedním z typů vozů, u kterého aerodynamika vozu sehrává podstatnou roli je kabriolet. Komfort cestujících je vylepšován pomocí několika přídavných komponentů. U klasických karoserií vozidel také dochází i při nízkých rychlostech k „aerodynamickému třepání“ – kolísání tlaku kolem otevřených oken, střešním oknem a už i u těchto drobných změn cestující pocítují jisté nepohodlí. V případě kabrioletu, kde cestující nechrání střeška, se tudíž musí negativním vlivům proudění předejít. Jako příklad můžeme vidět obr. 13.a, kde je vidět obrácené proudění. V tomto případě nestabilní zpětný proud může foukat vlasy řidiče do obličeje, což naruší koncentraci, nebo odváť věci pryč z automobilu. Typickým řešením je pohyblivá přepážka či zadní větrná clona, která blokuje proudění v obou směrech (obr. 13.b). Tyto prvky mohou být ovládány automaticky – s rostoucí rychlostí se vysouvají, a naopak se zatáhnou při rychlostech nižších. Tyto clony – deflektory mohou být namontované i v horní části čelního skla, jak je znázorněno na obr. 13.c. Tímto se proud vzduchu přeměruje nad celou karoserií. Při nižších rychlostech se jedná o velice efektivní úpravu, ale při vyšších dochází k navýšení aerodynamického odporu. Obdobně se dá deflektor použít u střešního okna viz obr. 13.d [7].

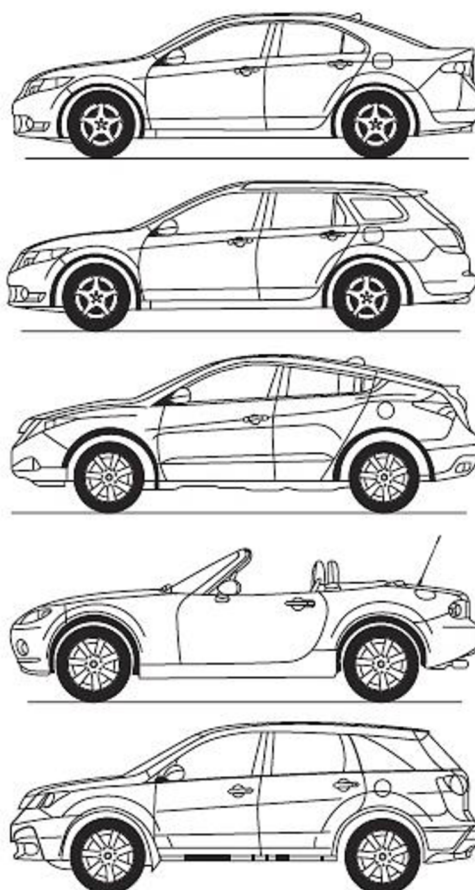


Obr. 13 - Použití deflektoru u kabrioletu [7]

Jednou ze zajímavostí je vliv otevření oken automobilu během jízdy. Pro lepší přehled je zde tab. 3, kde se nachází koeficient odporu c_D při jízdě se zavřenými okny a změnu tohoto koeficientu Δc_D způsobenou otevřenými okny u nejčastěji používaných tvarů karoserií (viz obr. 14) [7].

Tab. 3 - Typické koeficienty odporu pro několik typů karoserií

	C_D	ΔC_D
Sedan	0,32	~0,05
Kombi	0,30	~0,04
Hatchback	0,31	~0,03
Kabriolet	0,40	-
SUV	0,4 – 0,5	~0,06



Obr. 14 - Základní typy nejčastějších karoserií [7]

3.2.2 Aerodynamické prvky

Mezi úpravy používané u osobních automobilů můžeme zahrnout zakrytí nádrže zespoda automobilu, částečné zaslepení masky na přídi, zaslepení dalších štěrbin, úprava spoileru, přidání zadního křídla, ... I když se na první pohled zdá, že se jedná o banality, každá, ba i sebemenší úprava dokáže snížit aerodynamický odpor a tím i snížit například spotřebu.

Zakrytování podvozku je sice účinné, avšak podvozek nemusí být rovná plocha, stačí ho optimalizovat do správného tvaru. Prolisy na zadním nárazníku bývají často jen otázkou designu.

Spoiler⁶ (viz obr. 15) umístěný v zadní části vozu nad oknem, či jinak upravená tato část vozu, při vhodné konstrukci odvádí vzduch z karoserie vozu a brání nežádoucímu víření za vozem. Přítlačné křídlo dokonce mají sportovněji laděné vozy nastavené tak, že se vysune ze zádi karoserie až při překročení určité rychlosti.

⁶ Spoiler neboli přítlačné křídlo je aerodynamický a designový prvek používaný na automobilech, který zvyšuje přítlak k vozovce a zároveň zlepšuje ovladatelnost a stabilitu vozu.



Obr. 15 - Přítlačné křídlo Porsche GT3

Dále také znalost rozložení tlaků na karoserii dovoluje navrhnout vhodné umístění větracích otvorů, jak vstupních, tak výstupních. Vstupní se umístí do oblasti vyšších tlaků a výstupní pak do oblasti nižších tlaků.

Další z podstatných aerodynamických prvků jsou zpětná zrcátka (např. obr. 16). Ta ovlivní proudění vzduchu kolem vozu i odtékání vody za deště. Proto se musí tvar upravit, ale musí se dodržet zákony, které určují a upravují podmínky pro provoz na veřejných komunikacích.



Obr. 16 - Zpětné zrcátko BMW i8

Za jeden z nejpodstatnějších prvků, co se týče aerodynamiky automobilu, je považován difuzor. Díky lamelám se usměřňuje proudění vzduchu vytékající spod automobilu a vylepšuje přítlak zadní nápravy automobilu. Můžeme ho vidět v mnoha provedeních a podobách.

4 AERODYNAMIKA ZÁVODNÍCH VOZIDEL

Motorismus byl pravděpodobně inspirován lidskou soutěživostí, stejně tak jako každý jiný sport. Dokazování, kdo je lepší sportovec (řidič), nebo kdo má lepší technologii, láká fanoušky a postupem doby se z motorismu stal velký business. Závodit se začalo jak na uzavřených okruzích, tak i na silnicích. Dokonce některé prvky používané na závodních okruzích (soutěže NASCAR⁷, závody cestovních vozů atd.) jsou totožné s těmi, které můžeme vidět na sériově vyráběných osobních automobilech. Toto se ovšem nedá již říct o závodních prototypch automobilů určené například pro závody série Le Mans⁸.

4.1 Závodní vozy se zakrytými koly

Z aerodynamického úhlu pohledu, závodní automobily spoléhají na aerodynamický přítlak pro lepší adhezi pneumatik v zatáčkách, zrychlení, nebo i při jízdě na rovném úseku. Proto designéři a konstruktéři hledají žádoucí rovnováhu mezi předním a zadním přítlakem (z důvodu stability) se současně nízkou hodnotou aerodynamického odporu. Hlavním důvodem tohoto hledání rovnováhy je skutečnost, že při vyšších rychlostech je přítlak větší než hmotnost vozidla, takže odpružení vozu musí být velmi tuhé a zatáčení se zrychlením větším, než 3G znamenají pro řidiče ztrátu komfortu. Vyvážená jízda na okruhu s brzděním, optimálním zrychlením ze zatáček a zatáčením v optimálních podmínkách sníží čas potřebný na ujetí jednoho okruhu [7].

Prvním příkladem klasického závodního prototypu je vůz používaný při soutěži Le Mans viz obr. 17. Tento vůz představuje jeden z nejvíce aerodynamických designů vozu a je možné u něho dosahovat vysokých hodnot přítlaku. V rámci každoročních změn pravidel došlo k tomu, že musí být spodní část karoserie rovná. Samozřejmostí je viditelné použití zadního křídla. V zadní části je umístěn také směrový stabilizátor za účelem snížení vztlaku i pro případ nehody. Jeho vedlejší funkce je za normálních podmínek, kdy nedochází k vybočení, menší redukce aerodynamického odporu a vedlejší negativní efekt na vztlak zadního křídla. Součástí vozu jsou také výřezy nad zadními koly a boční vybrání, které jsou viditelné na vnitřní straně pravého kola. Tyto výřezy v zásadě snižují vztlak, ale přidávají na aerodynamickém odporu. Do předních blatníků mohou být vloženy větrací šterbiny. Pokud se tyto otvory správně umístí, mohou redukovat vztlak blatníku kola (nebo zvýšit přítlak vozu). Větrací otvory dokonce ovlivní i tok zesponu vozidla, například sníží vysoký tlak před kolem a tím ve skutečnosti zvýší rychlost pod přední částí automobilu [7].

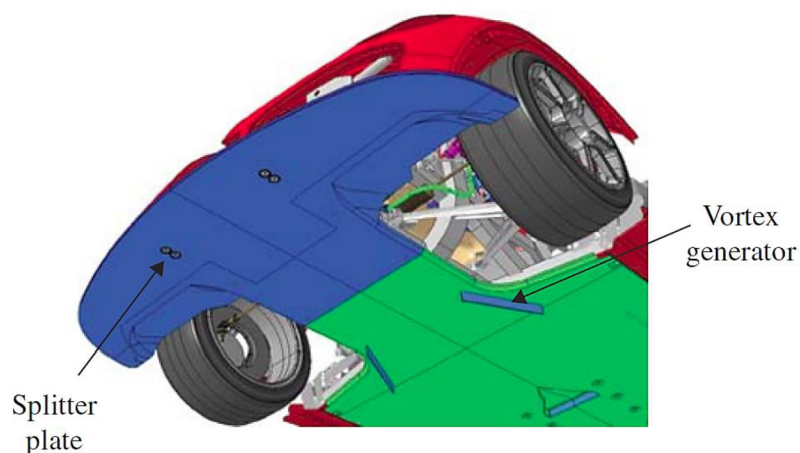
⁷ NASCAR je značkou, jenž stojí za řadou závodů v motorsportu v USA, přičemž se pod její vlajkou uskutečňuje víc jak 1500 různých závodů. Rodinný obchodní podnik byl založen v roce 1948 [12].

⁸ Na trati v Le Mans se koná proslulý závod 24 hodin Le Mans, ve kterém soutěží každoročně od roku 1923 sportovní prototypy automobilů a GT vozy.



Obr. 17 - Prototyp vozidla Le Mans Audi R 18 [7]

U vozidel, u nichž je přední spoiler tvarován do „tupého tvaru“ existuje určitý prostor, ve kterém se proudění rozděluje do několika proudů. V této oblasti se nachází vysoké tlaky. „Splitter plate“, znázorněno na obr. 18, je deska navržena tak, aby generovala přítláčnou sílu. Nachází se v přední části vozu za spoilerem. Kromě zmenšení oblasti vysokých tlaků podporuje i funkci spoileru. Tím se celkově generuje přítlak v přední oblasti vozidla, aniž by se vytvořil přebytečný a nežádoucí aerodynamický odpor. Tato deska by neměla být příliš dlouhá a vytažená před vozidlo, negenerovala by pak přítlak vozidla. U vozidel s proudnicově tvarovanou přední částí však postrádá jejich instalace smysl, není zde totiž dostatečný prostor s vyšším tlakem. Tento prvek se v odlišné podobě používá i u vozů s nezakrytými koly [7].



Obr. 18 - Splitter plate a vortex generator [7]

Na principu vířivého vztlaku na štíhlých křídlech fungují takzvané „dive plates“. Tento prvek je tvarován jako obrácené křídlo, umisťuje se do přední části vozu, a má také za úkol zvyšovat přítlak vozidla.

4.2 Závodní vozy s nezakrytými koly

Myšlenka závodních vozidel s nezakrytými koly se vynořila pravděpodobně již začátkem 20. století, kdy byl populární „cigaretový“ tvar karoserie považován za konfiguraci s nízkým odporem. Kola v této době byly docela úzká a konstruktéři je považovali za „nízko-odporové“.

O více než sto let později tyto automobily jsou stále součástí závodů, i přes to, že úlomky pneumatik odlétávají směrem vzhůru od lepkavé pneumatiky a je zde možnost odvalení se pneumatiky z jednoho vozu směrem přes druhý vůz. Důvodem proč se souťaže jako jsou F1 nebo Indy nestaly historií je hned několik, ale především inženýři přijímají tuto aerodynamickou výzvu s nadšením a vírou v pokoření stávajících rekordů [7].

Širší kola mají větší odpor než úzká, jak se dalo předpokládat. Důležitým poznatkem je testovat kola ne staticky, ale za rotace. Když kola rotují, tak šířka kola nemá takový vliv na odpor, protože rotace sníží odpor i vztlak. Za řádku let se konstruktéři naučili snížit čelní odpor kol pomocí krytů a dalších dílů na předním křídle [7].

Pro představu je zde tabulka 4 aerodynamických zatížení na automobil závodící v roce 2000 v soutěži Indy [7].

Tab. 4 - Aerodynamické zatížení různých částí u vozu Indy [7]

	C_L	C_D
Tělo karoserie	0,13	0,18
Kola	0,24	0,32
Přední křídlo	-0,95	0,12
Zadní křídlo	-1,15	0,29
Generátor vírů	-0,18	0,08
Winglet ⁹	-0,15	0,0
Zadní difuzor	-0,55	0,12
Celkově	-2,61	1,11

Generátor vírů (Vortex Generator), viz obr. 18, je také v trochu odlišné podobě používán u vozů Formule 1 (viz obr. 19). Hlavním důvodem k použití je ovlivnění úplavů kol předvídaných díky výpočtům. Díky této části jsou víry nasměrovány do spodní části karoserie, která je rovná. V tab. 5 nalezneme hodnoty koeficientů aerodynamického odporu c_D a vztlaku c_L pro různé části vozu Formule 1 [7, 13].

⁹ Winglet je trojúhelníkový díl umístěný před zadními koly. Zjistilo se, že je efektivní a snižuje odpor. Dále je to pak také součást umístěná na křídle letadla, usměrňující vzdušné víry [14].

Tab. 5 – Aerodynamické zatížení různých částí u vozu F1 (z roku 2006) [7]

	C_L	C_D
Horní karoserie	0,26	0,09
Spodní část karoserie, difuzor	-1,63	0,14
Přední křídlo	-0,89	0,18
Zadní křídlo	-0,78	0,26
Přední kola, zavěšení kol	0,01	0,10
Zadní kola, zavěšení kol	-0,06	0,17
Celkově	-3,09	0,94

U závodních vozů lze získat podstatné hodnoty přítlaku také vhodným směřováním toku proudu vzduchu pomocí „kanálků“ v podvozku (difuzérů) i bez většího vlivu na aerodynamický odpor. S ohledem na konstrukci a jízdní vlastnosti se světlá výška pohybuje mezi 50 a 100 milimetry. Těžší části vozu, jako je například převodovka, se umísťují co nejniž, ale nesmí do tohoto prostoru převodovky zasahovat kanálky pro odvod vzduchu. Z těchto omezení vyplývá podélný tvar kanálků namísto úhledného obráceného profilu křídla. Vzhledem k nízkému tlaku uvnitř těchto kanálků, vstupuje proud vzduchu z bočních stran vozidla (mezi předními a zadními koly) a vytváří silné koncentrované víry. Víry pak stabilizují proudění v podvozku. Aby se proudění odvádělo z podvozku lépe, montuje se zadní křídlo do velmi těsné vzdálenosti od konců kanálků [13].



Obr. 19 - Formule 1 Red Bull Racing 2017 [15]

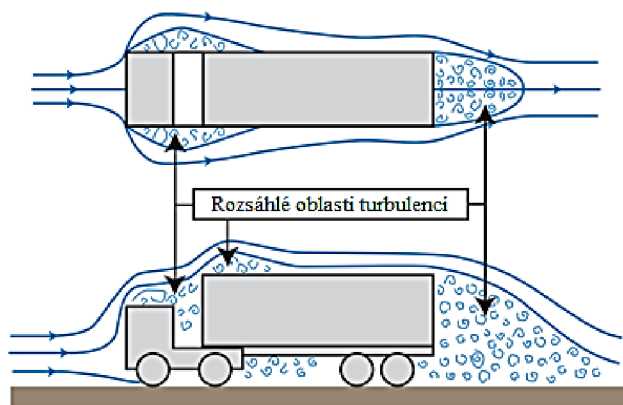
5 AERODYNAMIKA NÁKLADNÍCH VOZIDEL

Aerodynamikou nákladních vozidel se veřejnost zcela nezabývá, ale v posledních letech se z důvodu spalování paliva a ekonomických důvodů otevírá tato kapitola i u nich. Nákladní vozy se používají k přepravě mnohdy na velmi dlouhé vzdálenosti a přepravci mají snahu mít co nejnižší náklady. Snižování aerodynamického odporu u užitkových nákladních vozidel má mnoho výhod i pro ostatní účastníky silničního provozu a osoby bydlící v blízkosti tranzitních silnic. S lepší aerodynamikou se pojí snížení hluku, vyšší bezpečnost, lepší stabilita vozu a menší silniční ostřík. Redukcí a optimalizací aerodynamiky u tohoto typu vozidel se začalo zabývat v 70. a 80. letech 20. století, kdy došlo zároveň také k prvním změnám tvaru [16].

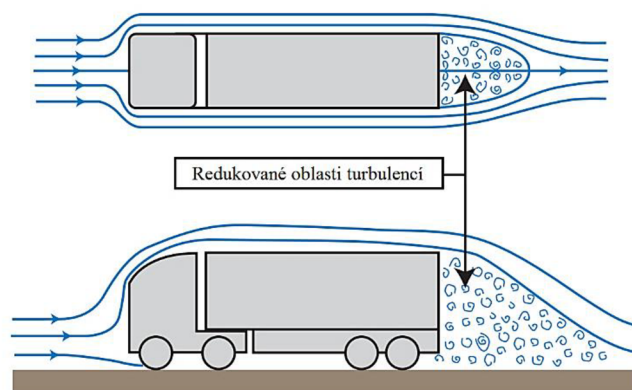
5.1 Konstrukce nákladních vozidel vzhledem k aerodynamice

Na rozdíl od osobního automobilu je tvar užitkového vozidla dán především nákladovým prostorem a funkcí – zda se jedná o klasický kamion, cisternu, valník, či jiný druh nákladního vozu. Převládají zde kvádrotvé tvary s ostrými hranami. Omezení zde udávají zákonné limity týkající se velikosti. Přesto zde zůstává malý prostor pro změny vedoucí k lepší aerodynamice, týkající se především přední části vozidla – tahače [2, 16].

Kabina tahače s dobrým designovým řešením má největší vliv na snížení odporu, jelikož na čelní ploše vzniká největší část aerodynamického odporu. Se zaoblenými hranami kabiny, viz obr. 21, je možné plynulejší proudění a například spotřeba paliva klesne až o 0,6 % na rozdíl od vozidla s hranatými tvary (viz obr. 20). Dalším prvkem, kterým můžeme upravit aerodynamiku vozu jsou zpětná zrcátka, čímž dochází k úpravě spotřeby až o 0,3 %. Záleží také na rozdílu výšky kabiny a výšky přívěsu. Obecně platí, že by měly být ideálně ve stejné rovině. Tato situace však ve většině případů nenastává [16].



Obr. 20 - Nákladní vozidlo s hranatými tvary [17]



Obr. 21 - Nákladní vozidlo se zaoblenými tvary [17]

Kromě hranatých (krabicových) tvarů má velký vliv na proudění mezera mezi kabinou a přívěsem. S rostoucí šířkou této mezery je viditelný mírný nárůst hodnoty aerodynamického odporu. Například u přípojných přívěsů je tato mezera nutná pro zatáčení. Když se nákladní vůz rozdělí teoreticky do třech částí – přívěsu, kabiny a podvozku, aerodynamické odpory jednotlivých částí jsou v poměru 4:3:2. Přívěs je nejvíce ovlivněn prouděním vzduchu, a to také díky bočnímu větru. Ten nelze zanedbat, neboť výrazně ovlivňuje stabilitu nákladních vozidel. Na přední hraně přívěsu se vytváří zpětný tok, jenž vede k vytváření turbulencí. Na horní části přívěsu se tvoří poměrně silná mezní vrstva. Samozřejmě také za nákladním vozidlem se tvoří úplav [2].

Různé druhy přívěsů lze kombinovat s různými druhy tahačů, a proto nelze občas vytvořit ideální aerodynamický odpor. Proto byly vyvinuty přídavné prvky, které se umísťují na kabiny. Některé z nich jsou hojně využívány i v praxi. Aerodynamický odpor nákladního vozu bez jakýchkoli dalších prvků se pohybuje mezi hodnotami 0,7 – 0,9. Po přidání prvků se tato hodnota sníží na 0,6 – 0,7 [17].

Mezi nejpoužívanější prvky patří střešní deflektor a střešní kryt, které uspoří přibližně 2–6 % paliva. Na boční straně vozu se pak zabráňuje proudění pomocí bočních panelů, generátorů vírů (vortex generator), nebo například gumovými pásy. Proudění z podvozku bývá usměrňováno pomocí aerodynamických zástěrek [17].

Na trhu s užitkovými vozy se objevují i různě tvarované přívěsy. Jedním z nich je kapkovitý návěs, jenž má nižší koeficient aerodynamického odporu c_D . Střecha kabiny plynule přechází na střechu návěsu. Známá je také úprava návěsu – zúžené prodloužení, které můžeme vidět na obr. 22 [16].



Obr. 22 - Zúžení zadní části návěsu [16]

Za oceánem ve Spojených státech jsou stále populární obrovské nákladní vozy, které byly v posledních letech také modernizovány a prošly designovou změnou z hranatých tvarů na proudnicové. Snížení spotřeby paliva je zde vyčísleno až na 30 %, což u vzdáleností, které musí ujet, znamená i velkou úsporu emisí. Na obr. 23 vidíme klasický i novější model s aerodynamickou kapotáží [16].



Obr. 23 - Styly amerických kamionů (klasický a proudnicový tvar) [16]

Pro užitkové automobily převážející náklad volně na nákladovém prostoru je důležité také umístění převáženého nákladu. Pokud umístíme náklad co nejbližší za kabinu, snížíme tím aerodynamický odpor [17].

5.2 Měření aerodynamických veličin

Pro zjištění aerodynamických parametrů se používají testování na silnici, okruhu, v tunelu či počítačových simulacích (CFD analýzy). Měření aerodynamických veličin v tunelech je u nákladních vozů daleko obtížnější kvůli větším rozměrům. Proto se nákladní vozidla testují většinou v měřítku – jako nejvhodnější se ukázalo měřítko 1:2,5, při kterém se podmínky proudění přibližují těm skutečným. Nejmenší měřítko, které se v tunelech používá je 1:8. Tunely nám poskytují veškeré potřebné informace a stabilní podmínky pro testování [2].

Při testování na silnicích či okruzích jsou „reálné“ vozy vystaveny atmosférickým podmínkám, které ovlivní výsledky měření, což se shledává neefektivní. Jako u všech ostatních vozů, se u nákladních a užitkových automobilů využívá CFD analýza (viz kapitola 7) [16].

6 AERODYNAMICKÉ TUNELY

Základní rámec studia vnějšího aerodynamického proudění byl položen na modelu statických objektů, kolem nichž se pohybují relativně částice proudícího vzduchu. Stejného principu využíváme také u aerodynamických tunelů, kde vozidlo je statickým objektem, zatímco vzduch proudí kolem něho.

Aerodynamické tunely nám poskytují zkušební podmínky, které musí být samozřejmě kontrolovány a v zásadě nezávisí na vnějších atmosférických podmínkách. Měřicí technika je také stacionární a není nutné ji přenášet. V základním aerodynamickém tunelu je vzduch generován pomocí jednoho nebo několika ventilátorů (ve většině tunelů jsou použity vysokotlaké nádrže nebo trysky). I když je základní myšlenka aerodynamických tunelů zcela jednoduchá, existuje mnoho konstrukčních řešení a s tím spojených problémů.

Aby naměřené veličiny odpovídaly skutečnosti, tak se během testování v tunelech musí vytvářet podmínky odpovídající těm, které nastávají během jízdy. Potřeba simulovat pohybující se zem (silnici) v tunelu komplikuje testování. Vytváří se zde mezní vrstva na podlaze i na voze v testovacím prostoru, což je nežádoucí. Ovlivnění naměřených výsledků se odvíjí od světlé výšky podvozku testovaného objektu, ale také od rychlosti, při které se měření odehrává. Pokud například testujeme nákladní automobil se světlou výškou podvozku 0,6 m při rychlosti 200 km/h, výsledky nejsou ovlivněny statickým pojetím testování. Avšak pokud se v tunelu testuje závodní automobil se světlou výškou podvozku v rozmezí 0,05 – 0,1 m, nelze si ovlivnění výsledků nevděčit. Pro vyřešení toho problému existuje několik technických řešení [13].

První možností, jak tomuto problému předejít, je zvednout vůz nad mezní vrstvu. Dále pak je nasnadě naklonit testovaný objekt mírně dopředu, podle toho, jak se zvětšuje tloušťka mezní vrstvy směrem k zadní části vozidla. S tímto řešením ovšem přichází další problémy způsobené například změnou úhlu sklonu vozidla, proto se tento přístup využívá zřídka. Další variantou je zavést ve zvýšené úrovni novou rovinu, na kterou vozidlo umístíme. Zde je základní myšlenkou vyhnout se oblasti s výraznější mezní vrstvou a umístit objekt na daleko tenčí mezní vrstvu (vzniklou pouze díky zvednuté rovině). Druhou nejjednodušší možností je umístění sání před vůz. Díky sacím otvorům se odstraní mezní vrstva a za nimi vzniká nová, která aby bylo měření efektivní, dosahuje přibližně 10 % původní tloušťky „staré“ mezní vrstvy. Tento přístup se vyskytuje často u tunelů, kde se testují vozidla v reálné velikosti. Modifikace metody je, když se sací otvory umístí i pod automobil. Ovšem toto modifikované řešení je nákladné. Nabízí se zde i řešení opačné, a to foukání proudění z těchto otvorů. Opět se jedná o efektivní, ale zároveň velice nákladnou metodu [13].

Posledním hojně využívaných řešením je pohyblivý pás simulující jízdu po silnici. Popularitu řešení získalo i přes několik nevýhod. Model je obvykle podporován bodcem umístěným na automobil, a ten ovlivňuje proudění. Druhým faktem je, že kola se pohybují po páse (v některých případech se jedná jen o úzké pruhy na kola) a otázkou zůstává, jak měřit zatížení, jenž na kola působí. Jako třetí problém se vnímá fakt, že sání umístěné pod vozem může u závodních vozů (ale i u prototypů, Indy atd.) vsát pás. Posledním problémem je vnímán limit v podobě rychlost pásu na 150 km/h, což je rychlost, kterou překročí v dnešní době hravě i osobní automobily. Nutno poznamenat, že již existují i výjimky v tomto parametru omezené na 250 km/h [13].

Do systému s pohyblivými pásy jsou vestavěny váhy, které slouží pro zjištění zatížení na každé kolo – respektive nápravu. Toto měření je nutné ke správnému vyhodnocení přítlaku vozidla. Váhy se umisťují izolovaně od podlahy tunelu, aby zaznamenávaly pouze zatížení odpovídající proudění [13].

Na značný progres tunelů měla vliv 1. světová válka, během níž v Evropě vzniklo mnoho konstrukčních návrhů. Další velký pokrok nastal v 80. letech díky závodním vozům. Také se dá říct, že se jedná o názorný příklad použití Bernoulliho rovnice – Pitotovy trubice, neboť mnoho aerodynamických tunelů měří rychlost ve zkušebním úseku trubkou směřující do proudu. Statický tlak se měří pomocí otvorů v podlaze nebo stropu (před modelem). Rozdíl tlaků mezi trubkami se měří pomocí vodního sloupce ve spojovacím potrubí (tomuto zařízení se říká manometr). Určitá rychlost totiž odpovídá určité výšce sloupce v trubce a rozdílu tlaků [7, 13].

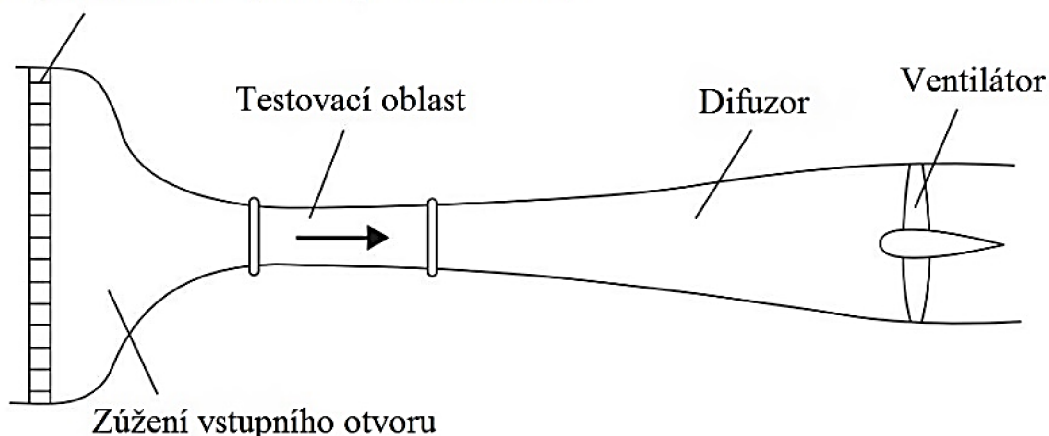
Základní rozdělení aerodynamických tunelů

- s otevřeným okruhem
- s uzavřeným okruhem

6.1 Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem

Nejjednodušší otevřený aerodynamický tunel můžeme vidět na obr. 24. První tunel tohoto typu byl navržen ve Spojených státech amerických bratry Wrightovými již v roce 1901. Jejich tunel se skládal z dřevěné krabice se čtvercovým skleněným průhledem v horní části. Ventilátor připásaný k motoru pak vyvinul proud vzduchu o rychlosti až 48 kilometrů za hodinu. To, co ovšem dělalo tento tunel unikátní, byly také jejich měřicí nástroje, které dokázaly měřit síly aerodynamického odporu a vztlaku tak, že bylo možné naměřené hodnoty použít pro výpočty [13, 18].

Usměrňovací síto (zamezuje turbulencím)



Obr. 24 - Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [7]

V případě tunelu s otevřeným okruhem je ventilátor umístěn směrem k zadní části difuzoru, jimž je veden proud vzduchu z testovací sekce. Velké kontrakce v přední části, obvykle s rovnacími plochami, urychlují proud v testovací sekci, kde je umístěn model. Testovací sekce může mít tvar obdélníkový, kruhový, oválný nebo podobného příčného

průřezu. Větší poměry kontrakcí mají obvykle za následek vyšší počet homogenních podmínek volného toku. Samozřejmě větší kontrakční kužely jsou dražší a také zabírají větší prostor.

Usměrňovací síto nebo voština, umístěné na vstupu tunelu má hlavní účel, který spočívá ve snížení vlivu vnějších větrných proudů a narovnáva proud přicházející do tunelu. Tímto se tedy zvyšuje kvalita proudění za účelem dosažení co největší rovnoměrnosti proudu. V rozšiřující se části za testovací sekci (difuzoru) se redukuje rychlost před ventilátorem. Pokud jsou okolní podmínky konstantní, pak teplota ve zkušebním úseku se ani během dlouhého testování nezmění, stejně jako je tomu u tunelu s uzavřeným okruhem [7].

Hlavní výhodou těchto tunelů se jeví nižší náklady na výstavbu. Je vhodné je použít i v případě, že se při vizualizaci proudění používá kouř. Výfukové plyny z motoru se společně s kouřem odvádějí z tunelu pryč. Na druhou stranu má i své nevýhody, a to, že hluk z testovací sekce, ventilátoru, řídicí jednotky a z výstupní trysky míří přímo ven. Druhým negativem je v případě umístění tunelu ve venkovních prostorech nebezpečí ovlivnění rychlosti a kvality proudění v testovacím prostoru větrem [7].

Většina tunelů využívající menších měřítek, je konstruována právě na tomto koncepčním řešení. Uplatnění nachází díky svým negativním stránkám například na univerzitách a pro další vzdělávací účely v místech, kde je lze umístit do dostatečně velkých interiérů, což zaručí dobré podmínky pro testování [7].

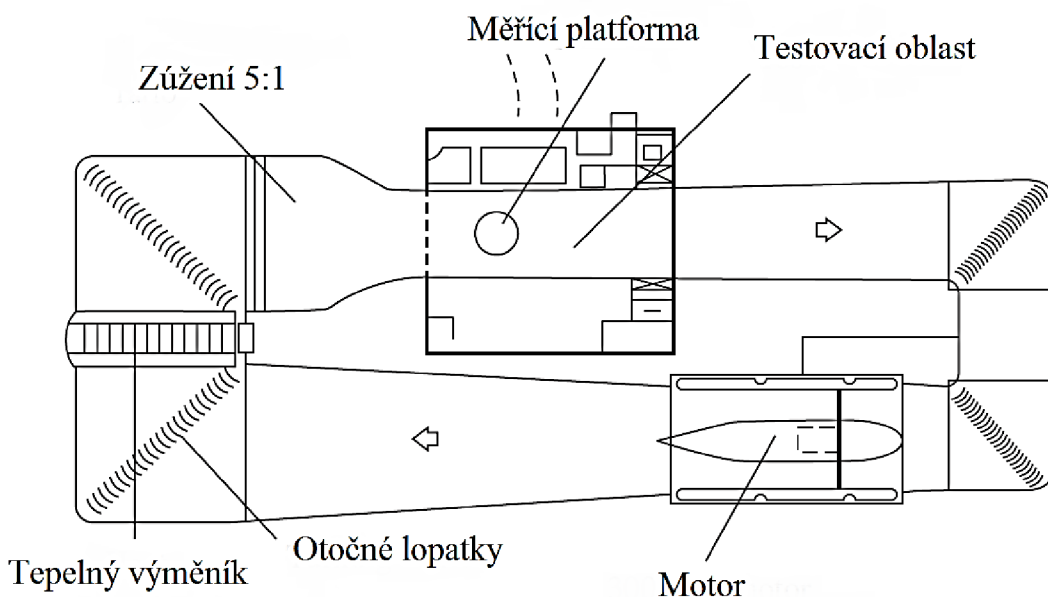
Avšak všechny automobilní (subsonické¹⁰) aerodynamické tunely se skládají z těchto výše popsaných základních částí, nejen tyto otevřené.

6.2 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem

Tento typ uzavřeného tunelu se z důvodu své energetické úspornosti používá častěji než tunel otevřený, i přes svou vyšší nákladnost. Obvykle je vybaven tepelným výměníkem pro udržení stabilních testovacích podmínek.

Primární rozdíl mezi tunelem s otevřeným a uzavřeným okruhem je samozřejmě v proudění vzduchu, další pak ve tvaru testovací sekce. Nicméně, aby se ušetřilo prouděním a energiemi, vybudovala se zde zpětná trubice pro cirkulaci vzduchu. Ventilátor tak pracuje pouze proti odporu vytvořeném díky tření na stěnách testovací oblasti a modelu. Mezi hlavní jeho výhody patří menší hlučnost. Negativně je ovšem vnímáno zvyšování teploty v důsledku tření, kvůli kterému je tunel vybaven tepelným výměníkem. Výměníky za účelem regulace teploty jsou trvale otevřené, probíhá zde výměna tepla s okolním vzduchem. Příklad aerodynamického tunelu můžeme vidět na následujícím obr. 25 [7, 13].

¹⁰ Subsonické aerodynamické tunely jsou takové, ve kterých je proudění dostatečně vysoké, aby se mohly projevit jeho účinky, avšak nedosáhne rychlosti zvuku.



Obr. 25 - Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem [13]

6.3 Dělení tunelů dle typu testovací oblasti

Testovací oblasti mohou být otevřené či uzavřené. Tunelům s otevřenou sekcí říkáme Eiffelův typ – podle Gustava Eiffela, který takovéto tunely stavěl kolem roku 1909. S otevřeným zkušebním úsekem se vstupní zužující se kužel chová jako tryska a model je vystaven proudu z této „trysky“. Nejjednodušší případ otevřené testovací sekce nacházíme u aerodynamického tunelu s otevřeným okruhem [7, 13].

Většina aerodynamických tunelů využívaných v automobilovém průmyslu je s otevřenou testovací oblastí, protože větší modely mohou být staticky připevněny a klade se za cíl eliminovat vliv stěn testovacího prostoru. Přístup k modelům je snazší a pomocí dlouhých sond se zde může vstříkovat kouř, aniž by se narušilo proudění. Také statický tlak vně trysky se mění daleko méně než v případě uzavřené testovací oblasti (kde se může měnit v podélném směru), a proto tyto měření považujeme za přesnější. Na druhou stranu, v otevřeném prostoru s tryskou dochází k tendenci jeho mísení s okolním vzduchem. Proto omezuje délku testovací sekce a je zapotřebí dodat větší energii ve srovnání s uzavřeným zkušebním úsekem. Další alternativou je například testovací oblast s drážkovanou stěnou (která se však v praxi vidí zřídka) nebo také zkušební oblast s adaptivní stěnou [13].

Příklad tunelu ve větším měřítku s uzavřenou testovací sekcí nalezneme například u automobilky BMW v Mnichově, Volvo v Göteborgu nebo také u Porsche ve Weissachu [13].

6.4 Vizualizace proudění

Kvalitativní informace o proudění lze získat pomocí zobrazovacích metod, protože za běžných podmínek je vzduch průhledný. Informace pomocí nich zjištěné mohou být použity jako diagnostický nástroj pro zlepšení designu vozidla.

Údaje lze získat na povrchu karoserie i mimo něj a mohou pomoci vysvětlit výsledky ze zátěžových testů. Experimentálních metod pro vyhodnocení dat v aerodynamických tunelech je známo několik.

První z nich je zřejmě metoda nejznámější, a to vizualizace pomocí kouře (viz obr. 26). Kouř je generován buďto tryskou do širších proudnic, nebo ze sond, jenž lze libovolně nasměrovat k dané zkoumané oblasti. Její oblíbenost ční ve své vizuální efektivitě, avšak její použití má své limity. Používá se zejména pro nižší rychlosti, a hlavně laminární proudění. Dále pak lze proudění vizualizovat nitkovou metodou. Nitky se připevní k povrchu modelu pro indikaci směru proudění. Méně známou experimentální metodou je použití mýdlových bublin plněných heliem. Princip se podobá kouřové metodě, proud těchto malých bublin tvoří proudnice, díky osvětlení se stanou ještě více viditelnými. Metoda s bublinami se používá také pro menší rychlosti. K oblíbeným způsobům vizualizace proudění patří i PIV (Particle Image Velocimetry) česky řečeno Integrovaná laserová anemometrie. Hlavní výhodou je, že touto metodou lze zkoumat větší plochu [7].



Obr. 26 - Kouřová metoda – Mercedes Benz AMG GT R [19]

7 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ

Rovnice dynamického proudění se nemůžou řešit analyticky jednotlivě, ale komplexně jako celek. Pokud zde byl předpoklad klasického přístupu řešení rovnic, docházelo ke značným zjednodušením, jež byla u některých přístupů povolena. Nicméně v posledních letech díky pokroku ve výpočetní technice se vyvinuly další numerické metody sloužící jako nástroj k vyřešení nelineárních fluidních dynamických rovnic [7].

7.1 Matematické modelování v aerodynamice

Pro svou složitost se výchozí soustavy rovnic zjednodušují pro danou konkrétní úlohu při použití určitých počátečních a okrajových podmínek. Bez zjednodušení se nedaří získávat ani numerické ani analytické řešení. Vytvářely se tak fyzikální modely zjednodušených tekutin i zjednodušeného pohybu tekutiny, v tomto případě se jedná o takzvanou fyzikální aproximaci. Tyto fyzikální modely se vytvářely už s předpokladem jistého přístupu se zahrnutím matematických úprav – tedy matematické aproximace. Tyto aproximace vedly k sestavení matematického modelu. Odchytky mezi výpočty a realitou spočívaly především v tom, jaký byl sestaven fyzikální model, matematická aproximace byla druhořadá a neměla na výsledné hodnoty velký vliv. Posouzení vhodnosti zvoleného modelu není vždy zcela možné. Každá provedená aproximace totiž může nejvýše dosáhnout výsledků exaktního řešení a s počtem provedených aproximací se snižuje pravděpodobnost, že budou výsledky odpovídat skutečnosti [4, 20].

Při matematickém modelování se vychází z několika zjednodušujících předpokladů [4]:

- a) konstituční vztahy charakterizující termofyzikální transportní vlastnosti tekutin (předpokládáme například tekutinu s vlastnostmi ideálního plynu¹¹)
- b) charakter a velikost změn v proudovém poli (vhodnost linearizace rovnic)
- c) řádový odhad významu jednotlivých členů v rovnicích (zanedbání méně významných členů ve výchozích rovnicích)

Pomocí matematického modelování jsou schopni výpočtáři vytvořit modely mnoha jevů týkajících se proudění. Běžnými jsou matematické modely turbulentního proudění, mezní vrstvy, úplavu a další, viz. kapitola 1.2. Ze všech těchto modelů nás nejvíce zajímá turbulence, pro niž je také známo hned několik modelů [4].

7.2 CFD analýza proudění

Pod zkratkou CFD se nalézá Computational Fluid Mechanics, což je metoda výpočetního charakteru, pomocí níž se modeluje dynamické proudění tekutin. Jedná se o poměrně dokonalý nástroj k predikci hodnot jako je aerodynamický odpor či vztlak. Zároveň slouží pro náročné vývojové úlohy – například vyšetření bočního větru [7, 18].

Numerické řešení má několik výhod. První z nich je možnost řešit rovnice, které nelze řešit analyticky. Tento proces začíná s numerickou aproximací pro dynamické rovnice tekutin. Další výhodou numerického přístupu je možnost nahradit nelineární parciální diferenciální rovnice souborem algebraických rovnic, které jsou obvykle řešeny ite-

¹¹ V aerodynamice se hovoří o ideální tekutině (plynu), pro kterou platí, že se řídí stavovou rovnicí, tekutina je nevazká a tepelně nevodivá a vnitřní energie je pouze funkcí teploty a měrné tepelné kapacity, jakožto konstanty, jsou na teplotě nezávislé [4].

račními metodami. K dispozici je velké množství metod pro aproximaci rovnic, generování sítí a metodiky řešení. Podstatná výhoda CFD je jistě rychlejší získání výsledných hodnot. Díky tomu je zde možnost flexibilně přizpůsobit tvary karoserie před tím, než se vyrobí model vozidla [7, 13].

Pro typické CFD výpočty neboli pro matematické modelování proudění, je nutné definovat oblast zkoumání, v němž je proudění středem zájmu. Kromě toho je nutné definovat počáteční a okrajové podmínky. Model, pro který tvoříme výpočty se importuje z jiného grafického softwaru do prostředí programu, jenž využívá CFD [7].

7.2.1 Postup řešení CFD výpočtu

Prvním krokem u řešení CFD analýzy je vytvořit model – trojrozměrnou geometrii v jednom ze specializovaných softwarů. V automobilním průmyslu se používá například CATIA, Creo či Pro/Engineer. Další krok spočívá v úpravě a zjednodušení geometrie.

Na takto vytvořené geometrii se vygeneruje síť neboli plochu testované oblasti rozdělíme na menší segmenty. Síť vytvořená u modelování je v dnešní době už velmi hustá, u trojrozměrného proudění používáme nejméně 4 neznámé v každém uzlu. Proto v každém bodě jsou vyžadovány také nejméně 4 rovnice. Proto soustava rovnic pro CFD řešení obsahuje rovnice popisující rychlostní pole – rovnice kontinuity (pojednávací o zákonu zachování hmotnosti) a rovnice pohybové (Navier-Stokesovy rovnice neboli rovnice zachování hybnosti), potažmo se k nim přidá rovnice zachování energie [8, 13].

Rovnice kontinuity pro nestacionární trojrozměrné proudění je používána ve tvaru:

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0 \quad (18)$$

Navier-Stokesovy rovnice pro trojrozměrné proudění pro směry x, y, z jsou:

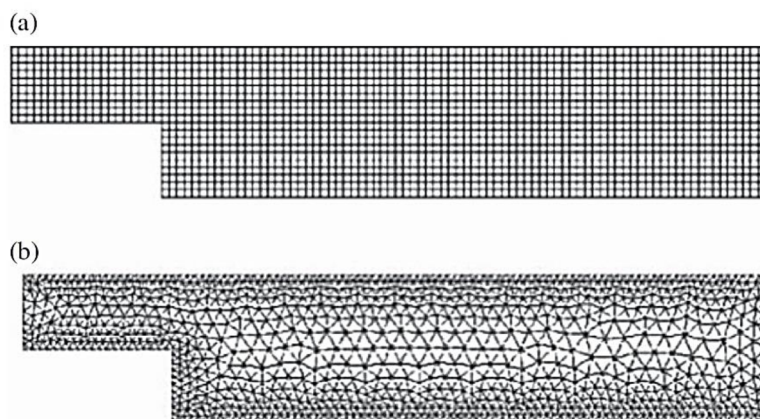
$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = \nu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x \quad (19.a)$$

$$\begin{aligned} w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_y}{\partial \tau} \\ = \nu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y \end{aligned} \quad (19.b)$$

$$\begin{aligned} \underbrace{w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z}}_{\text{stacionární setrvačné síly}} + \underbrace{\frac{\partial w_z}{\partial \tau}}_{\text{nestac. setrvačné síly}} = \\ = \underbrace{\nu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right)}_{\text{zrychlení třecích sil}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}}_{\text{zrychlení tlakových sil}} + \underbrace{g_z}_{\text{zrychlení gravitačních sil}} \end{aligned} \quad (19.c)$$

V poslední rovnici jsou schematicky vyznačeny členy rovnic. Na levé straně rovnic se nalézá člen představující zrychlení setrvačných sil – nejdříve stacionárních a dále nestacionárních. Na pravé straně rovnic se nachází zrychlení třecích sil, zrychlení tlakových sil a na posledním místě zrychlení gravitačních sil [8].

Síť může být strukturovaná (obr. 27 a)) nebo nestrukturovaná (obr. 27 b)). Strukturované síťe mají jasné „čisté“ uspořádání a diskretizace rovnice je zde jednodušší. Generování síťe vyžaduje určitou úroveň znalostí o řešení. V blízkosti předpokládaných rychlých změn proudění je zapotřebí vytvořit hustší síť. Díky jemnější síti bude řešení přesnější. Obecně se zde řídí pravidlem, že hustota síťe má být navýšena až do okamžiku, dokud se zdá řešení nezávislé na síti [7].

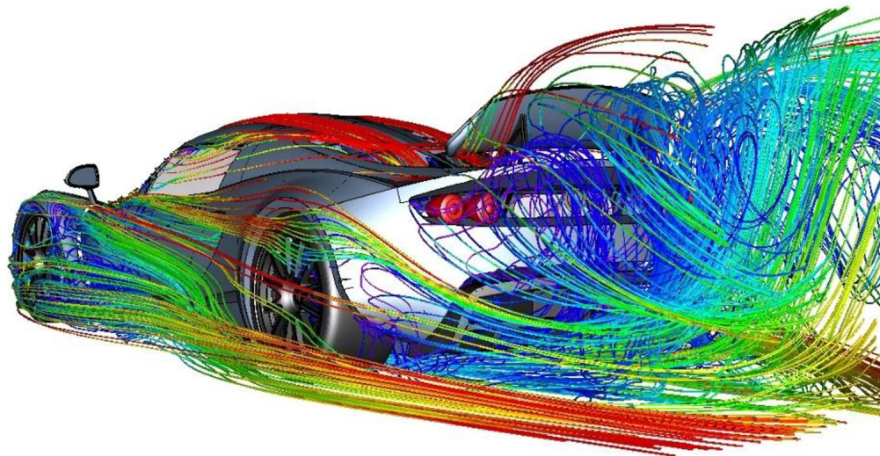


Obr. 27 - a) strukturovaná síť, b) nestrukturovaná síť [7]

Vygenerováním vhodné síťe se přesouvá postup k samotnému výpočtu. Jedním z používaných přístupů u CFD výpočtů je metoda síť (Finite Difference Method), jenž je zároveň metodou nejstarší. Další metodou je například metoda kontrolních objemů (Finite Volume Method) využívající integrálního tvaru rovnic a v neposlední řadě například metoda konečných prvků (Finite Element Method). Výpočtem však analýza většinou nekončí. Posledním krokem bývá vizualizace proudnic, zobrazení tlakových map nebo také tvorba obrázků rychlostních polí [7].

7.2.2 Modelování v praxi

Jak už bylo napsáno výše, jednou z nejvíce zkoumaných oblastí v CFD jsou turbulence. Aby konstruktéři mohli správně předvídat turbulentní chování, musí se opět zvolit vhodný model. Model RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) vychází z Reynoldsova průměrování Navier-Stokesových rovnic, poskytuje nám střední hodnoty veličin v čase. Zjednodušeným řešením Navier-Stokesových rovnic je metoda LES, řešící pouze velké víry. Kombinací těchto dvou metod je pak metoda DES (Detached Eddy Simulation), přičemž metodou RANS se řeší oblasti v okolí karoserie, zatímco metodou LES oblasti vzdálenější [21].



Obr. 28 - Hennessey Venom GT [22]

Mezi nejpoužívanější komerční softwary využívající CFD analýzu patří STAR-CCM+ od společnosti Siemens a dále softwary Fluent a CFX patří pod software ANSYS. Vizualizace numerickým modelováním slouží jako základ, avšak tyto výpočty se většinou neobejdou bez testování v aerodynamickém tunelu, které ověří dané hodnoty. Příklad vizuálního zobrazení proudění CFD můžeme vidět na obr. 28, na kterém je vůz Hennessey Venom GT, jenž drží světový rekord ve zrychlení na 300 kilometrů za hodinu za 13,63 sekund. Kromě testování nových vozidel či prototypů lze pomocí výpočetních metod diagnostikovat chyby u stávajících vozidel a následně je vylepšovat [7, 22].

Vzhledem k vysoké pořizovací ceně komerčních softwarů (řádově ve statisících), se stal populární takzvaný OpenFoam. Je to bezplatná forma testování, která dosahuje dokonce přesnějších výsledků než placené programy. Například v roce 2009 metodu založenou právě na OpenFoam předvedly automobilky Volkswagen, Seat a Audi. OpenFoam využívá metody DES. OpenFoam se prosadil díky svým benefitům – nejsou zde licenční poplatky, po technické stránce je na srovnatelné úrovni s komerčními softwary, možnost řešení „na míru“ [20].

ZÁVĚR

Aerodynamika má bohatou historii, i přesto, že větší prostor v lidském zkoumání jí byl poskytnut až ve druhé polovině minulého století. O její rozkvět se postaral především pokrok v letectví a poté v automobilovém průmyslu. Inspirace letadly byla zřejmá, přestože konstruktéři následovali ve svých pokusech splýnutí s přírodou a navrhovali vozidla proudnicových tvarů připomínající kapky.

Rostoucí ceny paliva přispěly ke snaze výrobců vozů snížit aerodynamický odpor, a tím snížit i spotřebu paliva. O úpravy vozidel nebyla nouze již před desítkami let, i když z úplně jiných důvodů. Ovšem změnil se i celkový přístup k samotné konstrukci vozu. Karoserie hladkých tvarů bez ostrých hran, snížení světlé výšky podvozku, zakrytování motoru a další změny se již staly automatickými. Samozřejmě u osobních vozidel se liší hodnoty aerodynamických veličin také podle účelu, ke kterému mají sloužit. Sportovněji laděné vozy svou podobou již mnohdy připomínají závodní speciály, zatímco užitkové vozy se vyrábí stále „krabicové“, aby bylo možné zajistit přepravu materiálu či více osob. Na trhu je dostupné nepřeborné množství „doplňků“ upravujících aerodynamiku vozu i bez větších zásahů do samotné karoserie.

U závodních vozů hraje aerodynamika zásadní roli. Každá ušetřená setina vteřiny se počítá, a proto týmy účastníci se motoristických soutěží do vývoje aerodynamiky vkládají hodně nadějí i financí. Mám ovšem za to, že komplikujícím činitelem jsou pro ně pravidla, jenž se neustále mění nelze tudíž jen vycházet ze zkušeností předešlých let, ale musí se provádět nové návrhy a nové testování každoročně.

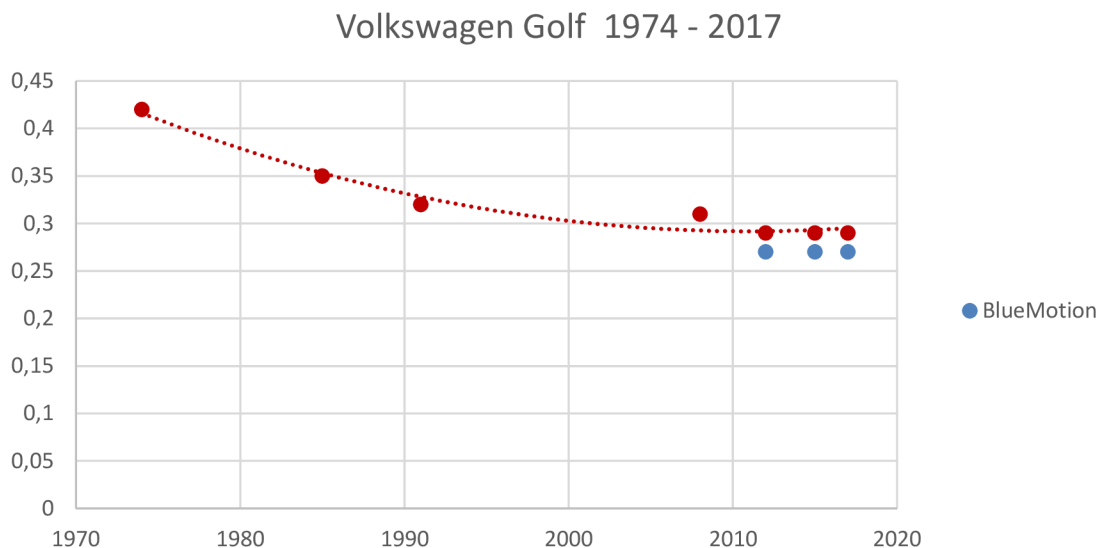
Trend šetření paliva na základě lepších aerodynamických vlastností nyní ovlivňuje i nákladní dopravu. Je pravdou, že jedna firma může za dobu pěti let ušetřit na naftě až desítky milionů korun, což není zrovna málo. Tudíž je vidět, že tato opatření mají smysl.

Testování v aerodynamickém tunelu je už denním chlebem pro automobilky a jejich testovací centra. Od dřevěné krabice jsme se posunuli až k technicky velmi povedenému a měřidly protkanému systému, z něhož vyhodnocujeme důležité aerodynamické parametry vozidel. S rozvojem počítačů došlo i k velkému pokroku u numerického modelování a CFD analýzy. Vhodným modelem s určitými počátečními a okrajovými podmínkami se simuluje prostředí bez možných chyb způsobených atmosférickými změnami. V posledních letech s vytvořením OpenFoam bezplatného softwaru se otevřely další možnosti ještě přesnějšího testování.

Bez vozidel si již dnes neumíme běžný život představit. Proto aerodynamika je stále aktuální téma s velkým potenciálem i do dalších desetiletí. Nejedná se jen o konstrukční disciplínu, ale o velmi obsáhlý obor spojující vědu, techniku i design. Za posledních sto let bylo překonáno mnoho rekordů. S úžasem lze také sledovat, jak k obrovskému pokroku došlo v designu i dosažení hodnot aerodynamických veličin. S každým dalším automobilem a jeho designem, drobnou změnou stávajícího vozu či vizionářským návrhem přichází nová výzva v podobě dosažení optimálního řešení s co nejlepší aerodynamikou.

Otevřenou otázkou zůstává, kde je hranice konstruktérských a technických možností. Vzhledem ke stávajícímu neustálému odhodlání se zlepšovat, předpokládám, že hodnoty aerodynamického odporu se budou v následujících letech s velkou pravděpodobností nadále snižovat a u běžných osobních automobilů atakovat hranici koeficientu 0,2. Na progresu se bude ruku v ruce podílet i zájem o alternativní pohony vozidel a ekologická stránka s nimi spojená. Pro příklad jsem si určila vůz Volkswagen Golf, který se vyrábí více než 40 let. Jak se vyvíjel koeficient aerodynamického odporu je vidět v následujícím grafu. Současná generace vozu má c_D 0,29, proto má predikce do následujících

10 let je, že lze očekávat další pokles koeficientu opět o setinu či dvě. Ekologičtější verze Golfu označená BlueMotion dosahuje hodnoty aerodynamického odporu 0,27.



Graf 1 - Vývoj koeficientu aerodynamického odporu u Volkswagen Golf [23]

Vývoj počítačové techniky zajisté přinese i další vývoj v oblasti testování. Zlepšují se výsledky díky přesnějším měřením, ale také hlavně zásluhou výkonnějších počítačů se ještě více upřesní numerické analýzy. Čím větší budou soubory dat, tím budou výsledky přesnější. Je možné, že umělá inteligence vyhodnotí nejen nejvhodnější metody, modely, ale i konkrétní nastavení CFD analýzy a lidský faktor nebude skoro zapotřebí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠUMAN-HREBLAY, Marián. *Aerodynamické automobily: československá osobní a sportovní vozidla s aerodynamickými karoseriemi*. Brno: CPress, 2013. *Autosalon (CPress)*. ISBN 978-80-264-0166-7.
- [2] EDITED BY WOLF-HEINRICH HUCHO. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. London: Butterworths, 1986. ISBN 0408014229.
- [3] E.L. HOUGHTON AND P.W. CARPENTER. *Aerodynamics for engineering students*. 5th ed. Oxford: Elsevier Science, 2002. ISBN 0750651113.
- [4] DVOŘÁK, Rudolf a Karel KOZEL. *Matematické modelování v aerodynamice*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01541-6.
- [5] Turbulence [online]. In: . [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbulentni.proudeni.pdf>
- [6] VLK, František. *Teorie vozidel: automobily*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1985.
- [7] KATZ, Joseph. *Automotive aerodynamics* [online]. 2016 [cit. 2017-02-11]. ISBN 978-111-9185-734.
- [8] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [9] *Racing Heroes - Camille Jenatzy*. Hemmings [online]. 2014 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.hemmings.com/blog/2014/02/04/racing-heroes-camille-jenatzy/>
- [10] *Autoevolution* [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/>
- [11] MACKERLE, Julius. *Automobil dneška a zítřka*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 360 s.
- [12] About Nascar. *Nascar* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.nascar.com/en_us/news-media/articles/about-nascar.html
- [13] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [14] *Winglet*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Winglet>
- [15] GALLERY: The F1 cars of 2017 at a glance. *Formula 1* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/features/2017/2/F1-cars-of-2017.html>
- [16] Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses: Technical Report. In: *Transport Canada* [online]. Canada [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: https://www.tc.gc.ca/media/documents/programs/AERODYNAMICS_REPORT-MAY_2012.pdf

- [17] Quick guide to Truck Aerodynamics. In: *The North East Freight Partnership* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.northeastfreightpartnership.info/bestpractice/Publications/Equipment%20and%20Systems/Quick%20Guide%20to%20Truck%20Aerodynamics.pdf>
- [18] The Wright Wind Tunnel. *Smithsonian National Air and Space Museum* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/fly/1901/wind.cfm>
- [19] *ForceGT* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.forcegt.com/news/first-look-mercedes-amg-gt-r/attachment/mercedes-amg-gt-r-wind-tunnel/>
- [20] SCHÜTZ, Thomas. Progress in CFD Validation in Aerodynamics Development. *ATZ worldwide eMagazine* [online]. 1106, **113**(6), 30-35 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1365/s38311-011-0064-x.
- [21] VLČEK, J. *Vliv turbulentního modelu na simulace proudění vzduchu v okolí průtokoměru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 67s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Soňa Šedivá, Ph. D.
- [22] *Lotus Enthusiast* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://lotusenthusiast.net/2009/09/hennessey-venom-gt-cfd-renderings.html>
- [23] Volkswagen: US Media Site [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://media.vw.com/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Dobová reklama na aerodynamický automobil Tatra [1].....	11
Obr. 2 - Schématické znázornění laminárního proudění	16
Obr. 3 - Schématické znázornění turbulentního proudění	17
Obr. 4 - Chování kouřových částic v proudu kolem různých profilů [3]	18
Obr. 5 - Proudová trubice [3].....	18
Obr. 6 - Pitotova trubice [7].....	19
Obr. 7 - Vůz Jamais-Contente [1].....	21
Obr. 8 - Rumplerův vůz z roku 1924 [10]	21
Obr. 9 - Vůz Tropfenwagen s koeficientem $c_D=0,28$ [7].....	22
Obr. 10 - Tatra 87, design Hanse Ledwinky [2]	23
Obr. 11 - Jarayho karoserie se zakrytovanými koly [11].....	24
Obr. 12 - Schématické znázornění proudění kolem karoserie pick-upu [7]	25
Obr. 13 - Použití deflektoru u kabrioletu [7]	26
Obr. 14 - Základní typy nejčastějších karoserií [7]	27
Obr. 15 - Přítlačné křídlo Porsche GT3	28
Obr. 16 - Zpětné zrcátko BMW i8	28
Obr. 17 - Prototyp vozidla Le Mans Audi R 18 [7]	30
Obr. 18 - Splitter plate a vortex generator [7].....	30
Obr. 19 - Formule 1 Red Bull Racing 2017 [15]	32
Obr. 20 - Nákladní vozidlo s hranatými tvary [17].....	33
Obr. 21 - Nákladní vozidlo se zaoblenými tvary [17]	34
Obr. 22 - Zúžení zadní části návěsu [16].....	34
Obr. 23 - Styly amerických kamionů (klasický a proudnicový tvar) [16].....	35
Obr. 24 - Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [7].....	37
Obr. 25 - Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem [13].....	39
Obr. 26 - Kouřová metoda – Mercedes Benz AMG GT R [19]	40
Obr. 27 - a) strukturovaná síť, b) nestrukturovaná síť [7]	43
Obr. 28 - Hennessey Venom GT [22].....	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Koeficienty aerodynamických odporů pro několik tvarů těles	14
Tab. 2 - Přehled změn aerodynamického koeficientu c_D u pick-upů.....	25
Tab. 3 - Typické koeficienty odporu pro několik typů karoserií	26
Tab. 4 - Aerodynamické zatížení různých částí u vozu Indy [7].....	31
Tab. 5 - Aerodynamické zatížení různých částí u vozu F1 (z roku 2006) [7]	32

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Veličina
A	[m ²]	Plocha
C _D	[-]	Koeficient aerodynamického odporu
C _L	[-]	Koeficient vztlaku
C _{MX}	[-]	Koeficient klopivého momentu
C _{MY}	[-]	Koeficient klonivého momentu
C _{MZ}	[-]	Koeficient zatáčivého momentu
C _Y	[-]	Koeficient boční síly větru
F _D	[N]	Síla aerodynamického odporu
F _L	[N]	Vztlaková síla
F _Y	[N]	Boční síla větru
g	[ms ⁻²]	Gravitační zrychlení
l	[m]	Délka
M _X	[Nm]	Klopivý moment
M _Y	[Nm]	Klonivý moment
M _Z	[Nm]	Zatáčivý moment
\dot{m}	[kgs ⁻¹]	Hmotnostní tok
p	[Pa]	Tlak
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
T	[K]	Teplota
w	[ms ⁻¹]	Rychlost
η	[Nsm ⁻²]	Dynamická viskozita
ν	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita
ρ	[kgm ⁻³]	Hustota
τ	[s]	Čas

Indexy

Stav	Symbol
Neovlivněný proud vzduchu	∞
Směr osy x	x
Směr osy y	y
Směr osy z	z

Zkratky

Zkratka	Význam
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes