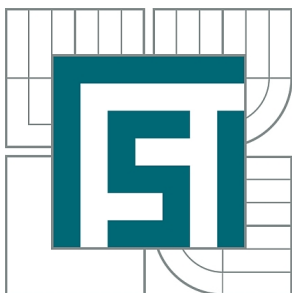


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AERODYNAMICKÉ TUNELY V OBLASTI AUTOMOBILNÍHO PRŮMYSLU

AERODYNAMIC WIND TUNNELS IN THE AUTOMOTIVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN HROMADA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN VANČURA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Hromada

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 tunely v oblasti automobilního průmyslu

v anglickém jazyce:

Aerodynamic Wind Tunnels in the Automotive

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvořte rešerši na téma využití aerodynamických tunelů v oblasti automobilového průmyslu

Cíle bakalářské práce:

- historie aerodynamických tunelů
- kategorizace aerodynamických tunelů
- konstrukční popis jednotlivých kategorií
- přehled současných aerodynamických tunelů s jejich parametry

Seznam odborné literatury:

W. H. Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles, 1998

J. Katz, Race car aerodynamics, 2006

J. D. Anderson, Fundamentals of aerodynamics

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vančura

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vypracování rešerše na téma aerodynamické tunely v oblasti automobilního průmyslu. V práci je popisován historický vývoj aerodynamických tunelů a jejich kategorizace. Dále jsou popsány jednotlivé části aerodynamického tunelu, způsoby jakými se v tunelech měří a problémy související se samotným měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamický tunel, aerodynamika, testovací prostor, proudění, velikost modelu

ABSTRACT

The aim of bachelor thesis is research themed the aerodynamics wind tunnels in the automotive. Thesis contains overview of historical evolution of wind tunnels and their categorization. Following chapter describes main parts of wind tunnel, ways of measurement in wind tunnels and problems during testing.

KEYWORDS

Wind tunnel, aerodynamics, test section, flow, model size



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HROMADA, M. Aerodynamické tunely v oblasti automobilního průmyslu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 27. května 2011

.....

Martin Hromada



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Vančurovi za poskytnutí potřebných rad, informací, podkladů a za bezproblémovou komunikaci při řešení této bakalářské práce.



OBSAH

Úvod	10
1 Historie aerodynamických tunelů	11
2 Rozdělení aerodynamických tunelů	13
2.1 Aerodynamické tunely s otevřeným okruhem	13
2.2 Aerodynamické tunely s uzavřeným okruhem	14
2.3 Sekce a oddíly aerodynamického tunelu	15
2.3.1 Testovací prostor	15
2.3.2 Další části aerodynamického tunelu	19
3 Měření v aerodynamickém tunelu	22
3.1 Přístroje používané pro měření	24
3.1.1 Měření vlastností proudu vzduchu	24
3.1.2 Aerodynamické váhy	25
3.2 Vizualizace proudění	27
4 Problémy při testování	29
4.1 Velikost modelu a korekce	29
4.1.1 Korekce	31
4.2 Simulace pohybu silnice	32
4.3 Montáž modelu a otáčení kol	37
Závěr	41
Použité informační zdroje	42
Seznam použitých zkratk a symbolů	44
Seznam příloh	45

Úvod

Aerodynamické tunely slouží k měření aerodynamického zatížení a ke zkoumání aerodynamických vlastností těles. V minulosti využíval aerodynamické tunely hlavně letecký průmysl, ale postupem času začala hrát aerodynamika významnou roli i u automobilů a proto se také automobily začaly v čím dál větší míře testovat a vyvíjet v aerodynamických tunelech.

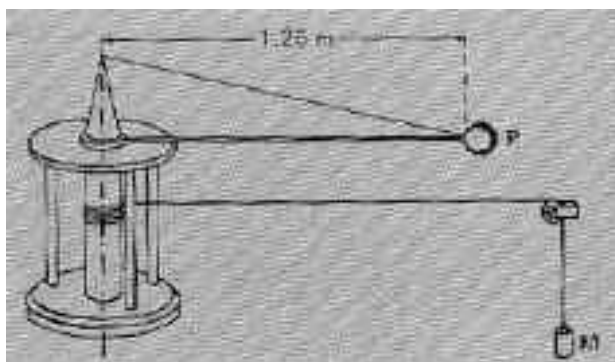
Existují dva hlavní druhy aerodynamických tunelů a to jsou s otevřeným, nebo s uzavřeným okruhem. Aerodynamické tunely s otevřeným okruhem jsou menší a jednodušší než tunely s uzavřeným okruhem, které se používají k testování automobilů nejčastěji. Každý aerodynamický tunel se skládá z několika základních částí. Popis jednotlivých částí a jejich funkcí je jedním z témat této práce. V aerodynamických tunelech se provádí několik druhů testování automobilů a používají se přitom různé měřicí přístroje a zařízení. Naměřená data z měřicích přístrojů jsou počítačově zpracována a s pomocí korekcí jsou z nich následně vyvozovány výsledky jednotlivých měření. Důležitá činnost prováděná v aerodynamických tunelech je vizualizace proudění. Zaměstnanci aerodynamického tunelu mohou různými způsoby zviditelnit proud vzduchu a zkoumat tak například obtékání vzduchu kolem vozidla a doladovat detaily karoserie. Při samotném testování je třeba také vyřešit několik problémů, které ve velké míře ovlivňují přesnost měření. Jeden z problémů je například zvolení velikosti testovaného modelu vzhledem k velikosti testovacího prostoru a jeho následné upevnění v aerodynamickém tunelu.



1 HISTORIE AERODYNAMICKÝCH TUNELŮ

Myšlenka sestavit aerodynamický tunel je velice stará. V počátcích badatelé využívali větru, nebo průvanu vanoucího jeskyněmi, kde byl připevněn zkoumaný předmět. Poté sami pohybovali zkoumaným předmětem v proudu vzduchu. Stále si však nevěděli rady s tím, jakým způsobem provádět měření, když se předmět pohybuje. Pokud ale něco neměřili, tak výsledky měření byly zatíženy velkou chybou vlivem turbulencí.

V rozmezí let 1707 až 1751 zkoumá Angličan Benjamin Robins aerodynamické vlastnosti různých předmětů. Používal přístroj (Obr. 1), kde se zkoumaný předmět upevněný na otočném rameni (na obr. označen jako P) pohybuje po kruhové dráze. Přístroj je poháněn pomocí lana a závaží a dosahuje rychlostí do 3m/s. Zkoumané předměty různých tvarů jsou různě nastaveny proudu vzduchu a Robins zkoumá jejich odpor a formuluje první teorii o vztahu tvaru, odporu, orientaci v prostoru a rychlosti pohybu zkoumaného předmětu. [7, 9]



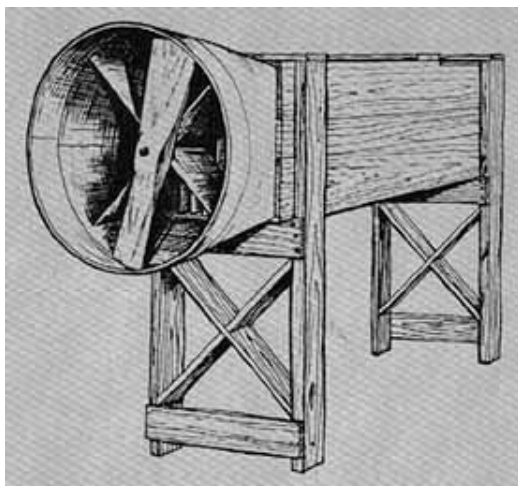
Obr. 1 Přístroj, na kterém Benjamin Robins zkoumá aerodynamické vlastnosti různých předmětů [9]

Roku 1871 Frank H. Wenham v Anglii konstruuje první aerodynamický tunel dlouhý 3,7m o průměru 0,45m. Parní stroj pohání ventilátor a ten vytváří proud vzduchu o rychlosti 65km/h. Frank H. Wenham montoval do tunelu předměty různých tvarů a měřil vztahové a odporové síly vytvářené proudem vzduchu obtékající předmět. Vznikají tedy aerodynamické tunely, kde zkoumaný předmět stojí na místě a proud vzduchu se pohybuje kolem něj. [10]

Osborne Reynolds roku 1883 na University of Manchester experimentálně dokázal, že obtékání dvou těles stejného tvaru, ale různé velikosti (reálné letadlo a zmenšený model letadla) je stejné, pokud vyjde stejně jím sestavený výraz. Výsledek tohoto vzorce se nazývá Reynoldsovo číslo. [7, 9]

Sir Hiram Maxim konstruuje v Anglii zkušební zařízení o průměru 20m (princip stejný jako Robins). Měří odpor, rychlost a vztlak. Dále staví aerodynamický tunel o průměru 1m a délce 4m. Vzduch v tunelu proudí až 80km/h a žene ho parní stroj. [7, 9]

V USA v roce 1901 bratři Wrightové sestavili aerodynamický tunel s průřezem 0,4 x 0,4m (Obr. 2). [7, 9]



Obr. 2 Aerodynamický tunel bratří Wrightů [9]

Do 1. světové války se vývoj aerodynamických tunelů odehrával zejména v Evropě. Dopředu ho hnaly zbrojní programy. Do té doby byly aerodynamické tunely hlavně využívány pro testování letadel, ale postupem času se aerodynamika začala pomalu dostávat i do automobilového průmyslu. Zakladatel automobilky Ferrari dokonce prohlásil, že aerodynamikou se zabývají ti, kteří neumí postavit silné motory. Tehdy ještě netušil, jak moc se mýlil. Netrvalo dlouho a roku 1934 spatřila světlo světa Tatra T77 (Obr. 3). První sériově vyráběný aerodynamický automobil na světě, vyvíjený v aerodynamickém tunelu. Díky součiniteli aerodynamického odporu o hodnotě $c_x = 0,21$, mohl vůz lehce dosáhnout a udržet maximální rychlost 145 km/h, a to s motorem o výkonu „pouhých“ 44 kW (pro srovnání Škoda Octavia z roku 2005 má součinitel aerodynamického odporu $c_x = 0,29$). Běžné vozy té doby k tomu potřebovaly motor o výkonu přes 75 kW. [11]



Obr. 3 Tatra T77 [12]

Postupem času se automobilový inženýři začali čím dál víc zabývat aerodynamikou osobních a zejména závodních vozů. To vysvětluje rychle rostoucí počet aerodynamických tunelů postavených pro automobilový průmysl a pro testování závodních vozů (většina aerodynamických tunelů pro závodní a automobilový průmysl byly postaveny po roce 1980).

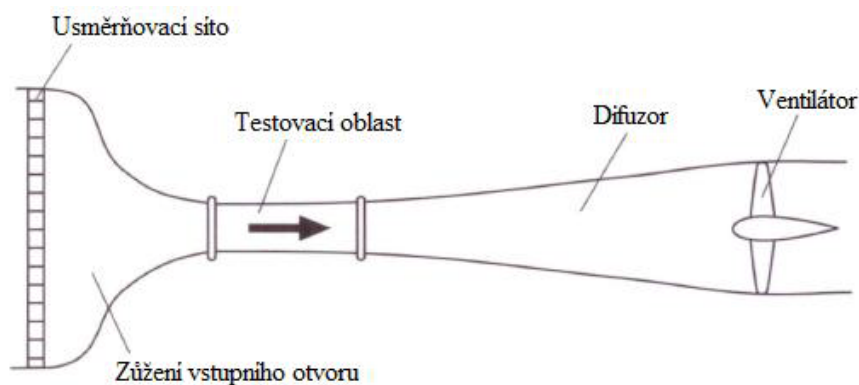


2 ROZDĚLENÍ AERODYNAMICKÝCH TUNELŮ

Základem každého aerodynamického tunelu je proud vzduchu, vytvářený obvykle pomocí ventilátoru (v některých aerodynamických tunelech jsou používány vysokotlaké nádoby). Vzhledem k tomu, že hustota vzduchu je téměř konstantní, je nejvyšší rychlost dosažena v nejmenším průřezu, který je používán jako zkušební úsek pro umístění skutečných vozidel nebo modelů. Všechny aerodynamické tunely se skládají z jednotlivých oddělení a částí, které budou popsány níže. Hlavní rozdíly jsou v otevřeném nebo uzavřeném proudění vzduchu a v různých tvarech testovacích úseků. [1]

2.1 AERODYNAMICKÉ TUNELY S OTEVŘENÝM OKRUHEM

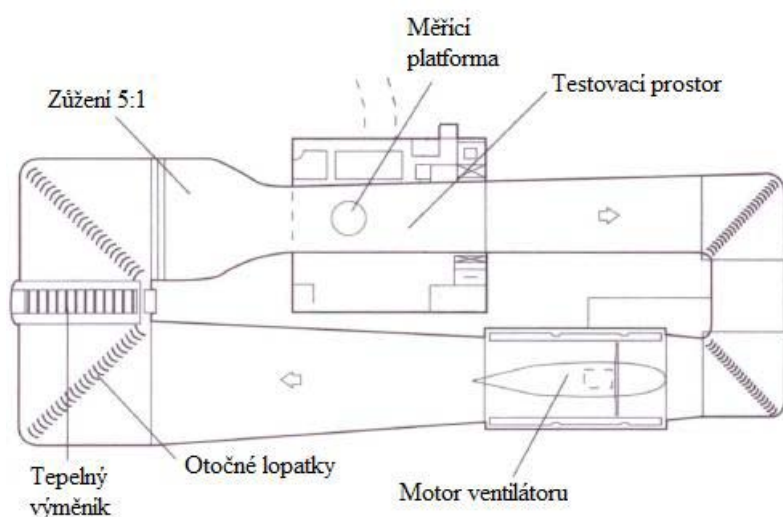
Nejjednodušší tunel s otevřeným okruhem je Eiffelův typ. Schematický popis tunelu tohoto typu je na Obr. 4. Obecně platí, že tunel s otevřeným okruhem bude mít nižší náklady na výstavbu. Dále je vhodnější pro použití látek, jako je kouř (pro vizualizaci proudění) nebo výfukové plyny z běžícího motoru (plyny se po opuštění tunelu nevrací zpět jako v uzavřeném okruhu). Také pokud jsou stále okolní podmínky, pak se teplota zkušebního úseku během testování nemění (jak v tunelu s uzavřeným okruhem). Existují ale dvě podstatné nevýhody tohoto typu tunelu. První z nich je vliv okolních podmínek na proudění. Je-li tunel umístěn venku, pak vítr může mít velký vliv na kvalitu a rychlost průtoku vzduchu ve zkušební části. Kromě toho hluk ventilátoru a jeho pohonné jednotky jde přímo ven a v případě většího aerodynamického tunelu to může vést až k porušení hlukových limitů. V důsledku odebírání vzduchu z okolního prostředí není vhodné umístění tunelu v chladných klimatických podmínkách (dosažení nežádoucích velice nízkých teplot). Druhá nevýhoda je větší energetická náročnost, než u velikostně ekvivalentního tunelu uzavřeného typu. V důsledku toho velký počet malých aerodynamických tunelů otevřeného typu lze nalézt na univerzitách a jiných vzdělávacích zařízeních, kde tím, že se tunel umístí ve vnitřních prostorách, nevýhody obvykle vymizí. [1]



Obr. 4 Eiffelův typ, nejjednodušší aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [1]

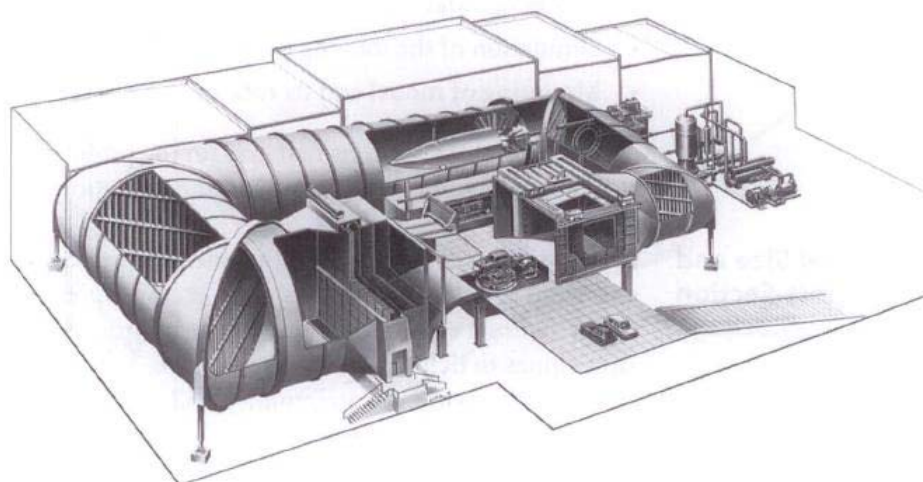
2.2 AERODYNAMICKÉ TUNELY S UZAVŘENÝM OKRUHEM

Díky menší energetické náročnosti a nezávislosti na okolních podmínkách jako vítr je většina velkých aerodynamických tunelů konstruována na základě tunelu s uzavřeným okruhem. Tyto aerodynamické tunely mohou mít horizontální nebo vertikální konstrukci (vertikální konstrukce zabírá méně místa). Mezi hlavní nevýhody této konstrukce patří relativně vyšší náklady na výstavbu. Dále je méně hlučný a podmínky proudění vzduchu lze jednoduše ovládat. Mezi další nevýhody patří hromadění kouře (pokud vzniká při testování) nebo hromadění teploty (v důsledku tření vzduchu o stěny tunelu) během dlouhého testování. Z toho důvodu je mnoho tunelů vybaveno vzduchovými výměníky, jak je znázorněno na Obr. 16. Výměníky na tomto obrázku jsou umístěny na obou stranách tunelu za ventilátorem. Tyto vzduchové výměníky jsou trvale otevřené a tak probíhá neustálá výměna vnitřního vzduchu s okolním vzduchem. Dalším řešením tohoto problému je použití výměníku tepla pro regulaci teploty Obr. 5. [1]



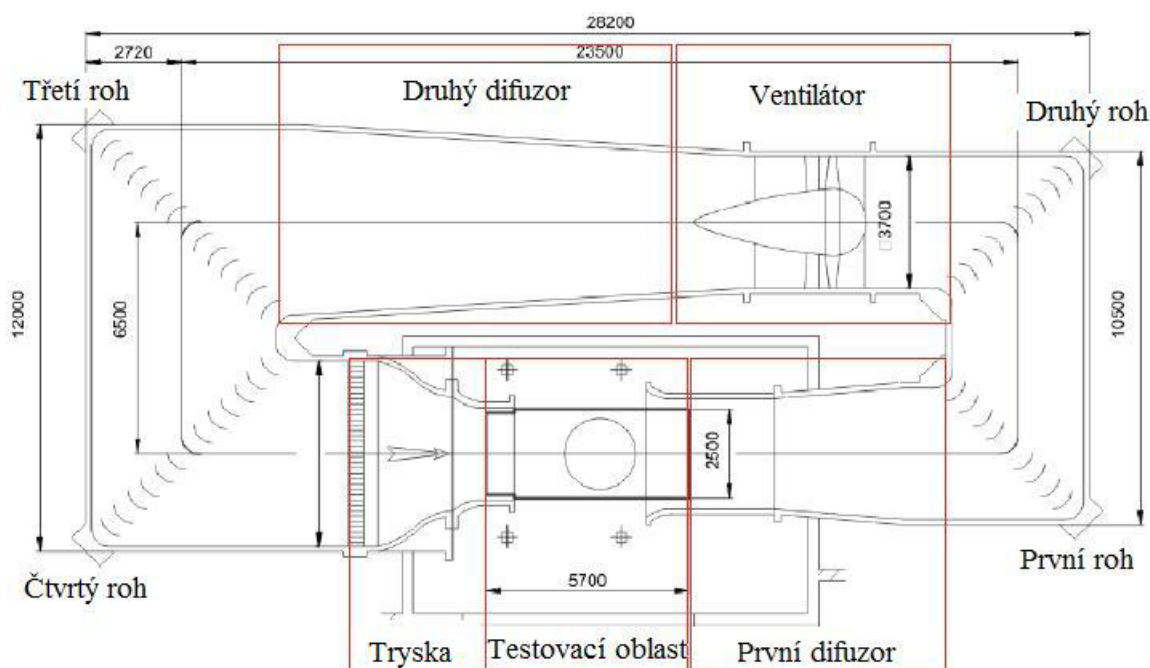
Obr. 5 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem a s tepelným výměníkem [1]

Nejlepším řešením z hlediska aerodynamiky je mít velký, uzavřený měřicí prostor, ale to je velmi nákladné a ne zrovna vhodné pro testování automobilů. Většina automobilových aerodynamických tunelů jsou tunely s uzavřeným okruhem a otevřeným měřicím prostorem. Například na Obr. 6 je pohled na aerodynamický tunel automobilky Volkswagen a ukazuje jak je to velké a složité zařízení, sloužící pro testování vozidel ve skutečné velikosti. Další jsou aerodynamické tunely testující modely ve velkém měřítku, ale s uzavřeným měřicím prostorem a drážkovanou stěnou, patří zde BMW v Mnichově, Volvo v Göteborgu, Porsche v Weissach a DNW v Emmeloord. [1]



Obr. 6 Aerodynamický tunel VW, Wolfsburg, Německo [1]

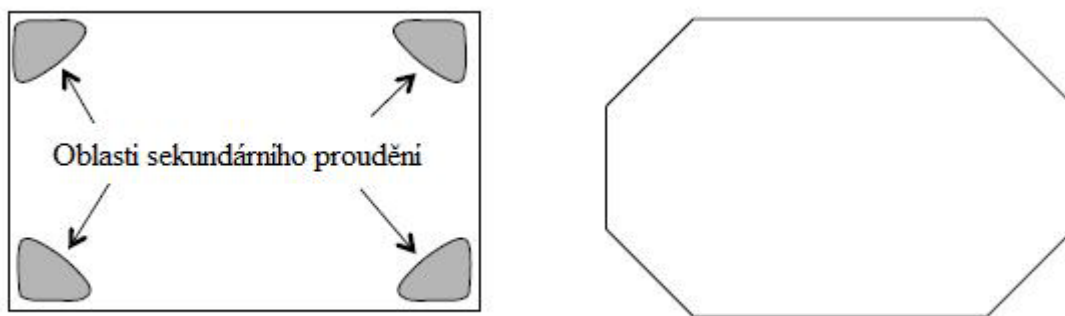
2.3 SEKCE A ODDÍLY AERODYNAMICKÉHO TUNELU



Obr. 7 Sekce a jednotlivé části aerodynamického tunelu [3]

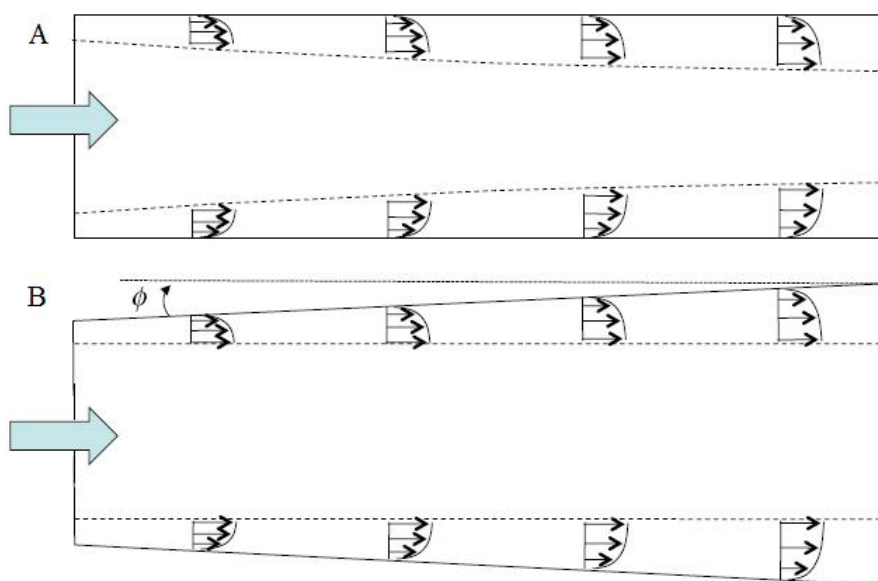
2.3.1 TESTOVACÍ PROSTOR

Testovací prostor může mít mnoho tvarů průřezů. Od kulatých přes eliptické, čtvercové, šestihranné až po obdélníkové. Tvar průřezu testovací oblasti také přímo ovlivňuje náklady na výstavbu tunelu a také výkon potřebný pro samotný provoz. Na druhou stranu nemá vliv na aerodynamické ztráty v tunelu. Nejběžnější tvar průřezu testovací oblasti je buď obdélníkový, nebo osmiboký. Osmiboký tvar průřezu se používá k eliminování sekundárního proudění vzduchu v rozích, jak je znázorněno na Obr. 8. [1, 3]



Obr. 8 Obdélníkový a osmiboký tvar průřezu testovacího prostoru [3]

Při bočním pohledu na testovací prostor zjistíme, že není zcela rovný. Je to z toho důvodu, že s rostoucí vzdáleností testovacího prostoru roste i mezní vrstva a snižuje se efektivní plocha pro měření a zvyšuje se rychlost a naopak se snižuje statický tlak (Obr. 9A). Využívá se tedy toho, že se testovací prostor s rostoucí vzdáleností nepatrně rozšiřuje. Nejběžnější úhel rozšíření bývá $0,5^\circ$, jak je znázorněno na Obr. 9B. [3]

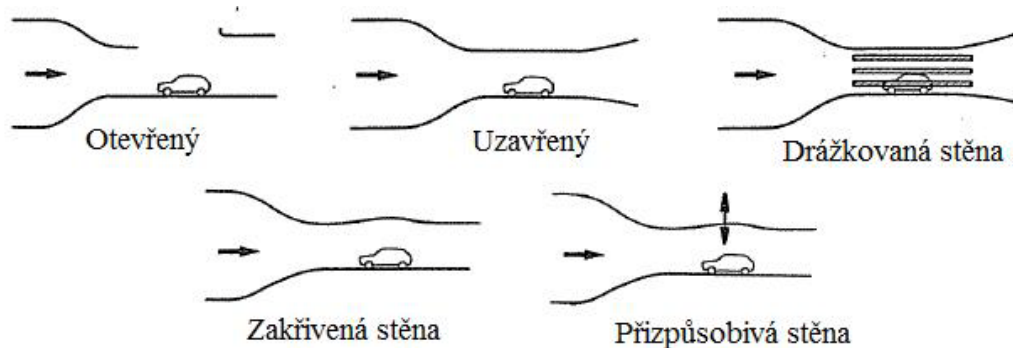


Obr. 9 Boční pohled na rovný a rozšiřující se testovací prostor a znázornění mezních vrstev [3]

Délka testovacího prostoru je obvykle jedno až dvounásobek velikosti hlavního rozměru. Čili testovací prostor obdélníkového tvaru o rozměrech 3m x 2m bude mít délku 3m až 6m. Z důvodu velkých aerodynamických ztrát by měl být testovací prostor co nejkratší. Dále pak musí být v testovacím prostoru okna, dobré osvětlení a také otvory pro průchod kabelů a jiných věcí potřebných pro měření. [3]

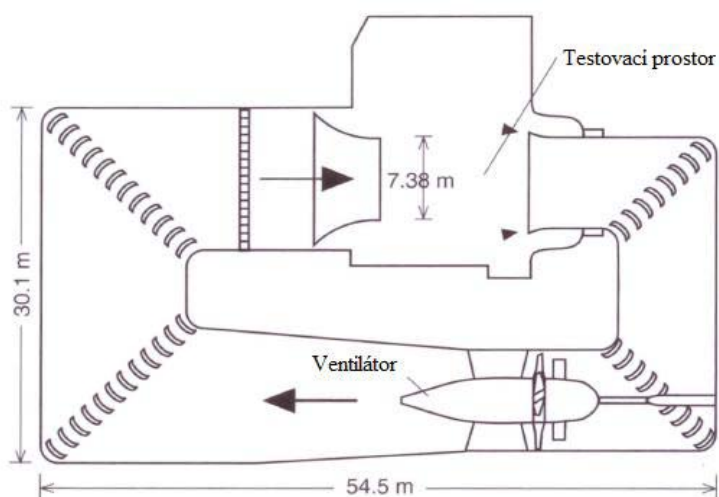


Existuje několik typů testovacích prostorů (Obr. 10). Všechny až na uzavřený testovací prostor (Obr. 16) se snaží nějakým způsobem eliminovat ucpávání, což je problém, který je podrobněji rozebrán později.



Obr. 10 Druhy testovacích prostorů v aerodynamickém tunelu [6]

Velké množství automobilových aerodynamických tunelů mají otevřený testovací prostor (Obr. 11). Lze tedy připevnit větší modely a ovlivnění měření vlivem stěn v testovací oblasti není tak velké. Také přístupnost je mnohem jednodušší, modely a provozovatelé aerodynamického tunelu jsou skryti mimo dosah proudu vzduchu. S pomocí dlouhé sondy se aplikuje kouř v blízkosti modelu, abychom byli schopni pozorovat obtékání vzduchu kolem něj. Také statický tlak mimo trysku se mnohem méně liší než v případě uzavřeného testovacího prostoru (kde bývá podélná změna tlaku) a proto se měření považují za přesnější. Na druhé straně proud vzduchu v otevřeném prostoru má tendenci se rozptýlit a smíchat se s okolním vzduchem, a proto otevřený zkušební prostor je délkově omezen (bývá kratší) a je potřeba většího výkonu k pohonu vzduchu v porovnání s uzavřeným zkušebním prostorem. Aerodynamický tunel s uzavřeným testovacím prostorem je na Obr. 5 a na Obr. 4. [1]



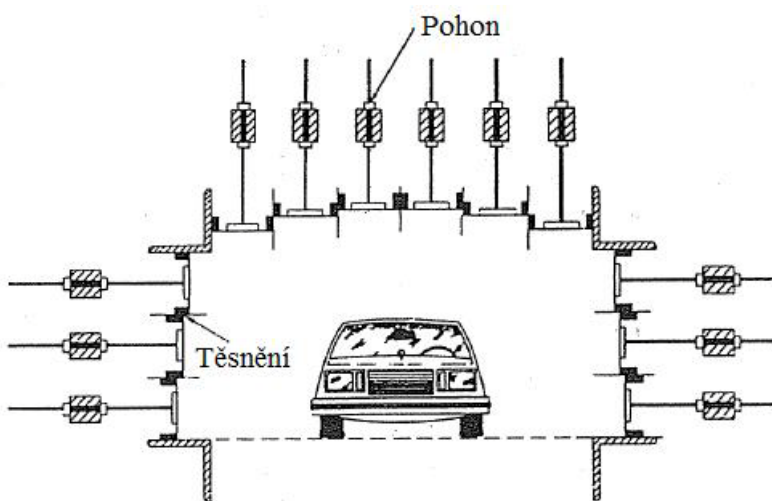
Obr. 11 Aerodynamický tunel s otevřeným testovacím prostorem [1]

Další druh testovacího prostoru je s drážkovanou stěnou, jak ukazuje Obr. 12. Na stěnách v testovacím prostoru jsou podélné otevřené štěrby. Až 30% plochy stěny je otevřeno, aby mohly být testovány i větší modely. Přítomnost modelu v měřicím prostoru vyvíjí tlak na proudící vzduch, který tak může projít drážkou ve zdi a nedochází k ucpávání. [1]



Obr. 12 Testovací prostor s drážkovanou stěnou [8]

Pokročilejší varianta testovacího prostoru s drážkovanou stěnou je přizpůsobivá stěna. Testovací prostor s přizpůsobivou stěnou může pohybovat bočními stěnami i stropem na základě tvaru modelu a lépe tak simulovat proudění vzduchu a také eliminovat ucpávání. Znázornění testovacího prostoru s přizpůsobivou stěnou je na Obr. 13. Poslední varianta testovacího prostoru je se zakřivenými stěnami, kde vlivem zakřivení stěn dochází k lepšímu obtékání modelu a tím se také jistým způsobem eliminuje ucpávání. [1, 6]

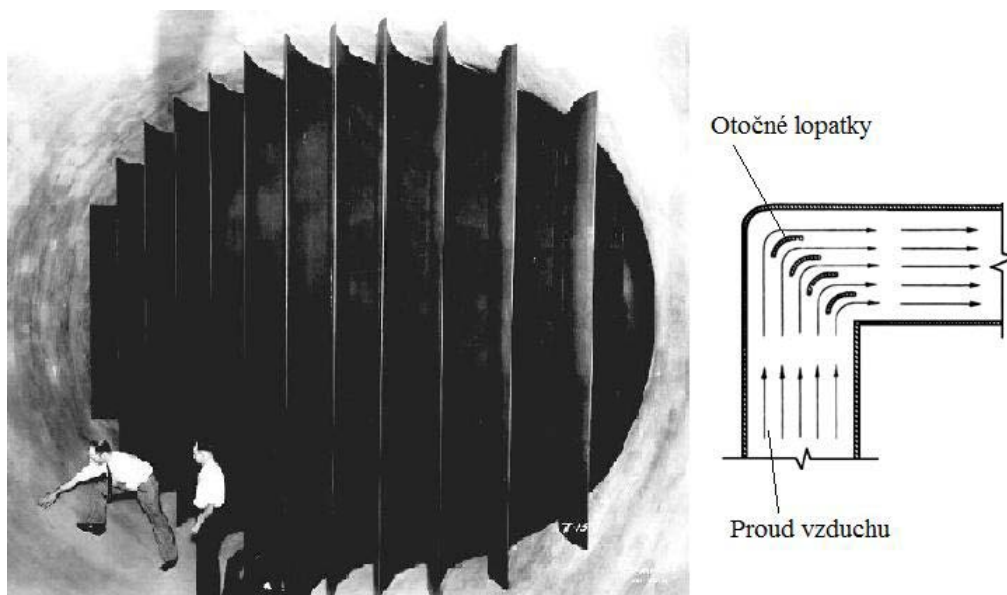


Obr. 13 Testovací prostor s přizpůsobivou stěnou [6]

2.3.2 DALŠÍ ČÁSTI AERODYNAMICKÉHO TUNELU

Jednou z nepostradatelných součástí aerodynamického tunelu je difuzor. Difuzor má za úkol snížit rychlost v částech tunelu, které nejsou používány pro testování. V důsledku snížení rychlosti dojde ke zvýšení statického tlaku, což způsobuje nežádoucí rozdíl tlaků. Díky rozdílným tlakům může dojít k oddělení proudění, což může vést k vibracím, větším ztrátám, kolísání rychlosti v testovacím prostoru nebo k rozkmitání ventilátoru. Aby k těmto situacím nedocházelo, používají se 2 difuzory (Obr. 7) a proto nedojde k náhlým a velkým změnám tlaku. [3]

V každém ze 4 rohů aerodynamického tunelu jsou umístěny otočné lopatky či prohnuté desky nebo prohnuté profily (Obr. 14). Tyto elementy mají za úkol vychýlit proud vzduchu o 90° tak, aby se minimalizovali ztráty v proudění a byl zajištěn kvalitní průtok vzduchu. Prohnuté desky a profily jsou pevné a otočné lopatky se mohou natáčet podle potřeby. [3]



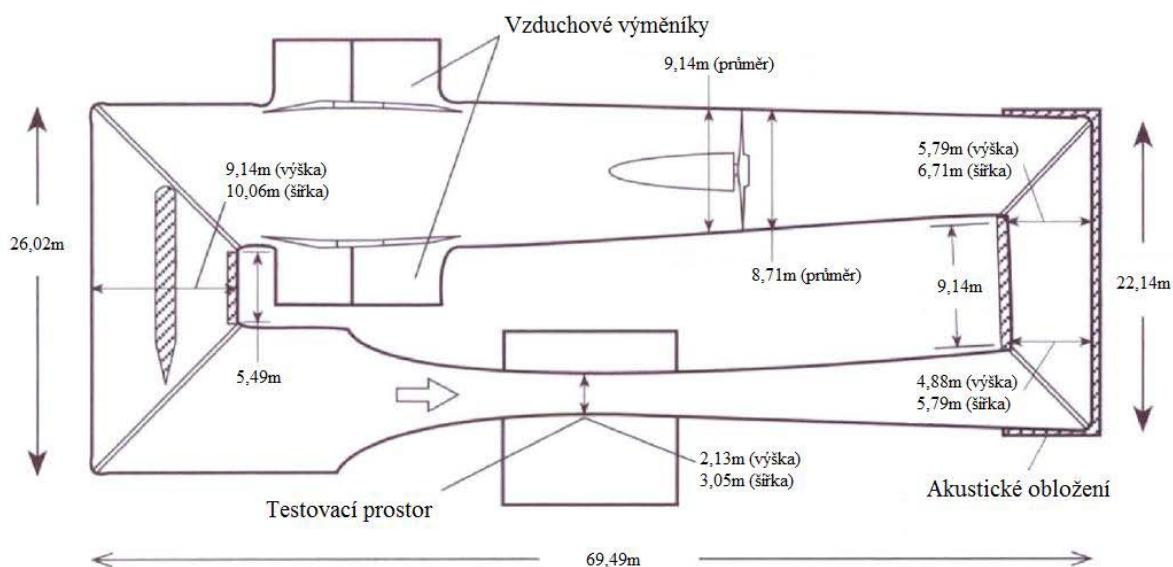
Obr. 14 Otočné lopatky v aerodynamickém tunelu Georgia Tech [3] a schematický náčrt [13]

Další důležitou součástí aerodynamického tunelu je ventilátor. Regulace rychlosti proudu vzduchu se neprovádí změnou otáček ventilátoru, ale natočením lopatek. Což vytváří rozdíl ve statickém tlaku, a čím větší je tlakový rozdíl, tím větší je rychlost proudění vzduchu. Ventilátor v aerodynamickém tunelu bývá umístěn v konstantním průřezu za druhým rohem a před druhým difuzorem (Obr. 7). Důvodem proč není umístěn hned za první difuzor je hrozící nebezpečí odlétnutí nějaké části testovaného modelu a poškození ventilátoru. Při provozu ventilátor produkuje vířivé proudění, což pro testování není vhodné. Existuje proto několik řešení jak tento problém odstranit. Jeden způsob je použití rovnacích lopatek za ventilátor. Další řešení je založeno na tom, že za ventilátorem jsou pevně nainstalovány rovnací lopatky, které mají opačný směr natočení lopatek. Tím se proud vzduchu opět ustálí a vznikne žádoucí rovnoměrný proud vzduchu. Poměr plochy mezi ventilátorem a testovacím prostorem se obvykle pohybuje kolem 2/1 nebo 3/1. Motor ventilátoru je obvykle namontován uvnitř gondoly a vyžaduje chlazení. [1, 3]



Obr. 15 Ventilátor Glen Martin univerzitního aerodynamického tunelu v Marylandu [3]

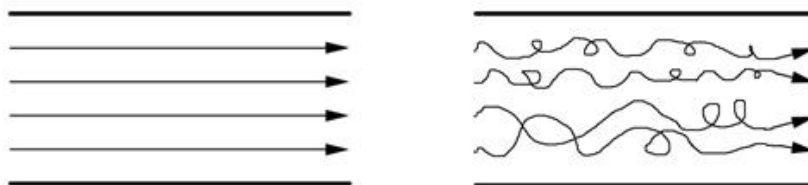
Před testovacím prostorem se používá tryska. Cílem trysky je urychlit proud vzduchu s nízkou rychlostí (taková rychlost, při které jsou nízké ztráty) na rychlost potřebnou v testovacím prostoru. Zúžení trysky ovšem způsobuje nežádoucí tlakové změny na začátku a konci kužele, to může vést až k nežádoucímu oddělení mezní vrstvy (v určitých místech může dojít i k nežádoucímu zpětnému proudění). Tento problém se dá vyřešit pečlivým navrhnutím poměru zúžení trysky, při kterém budou nízké jak tlakové změny, tak ztráty. Dalším problémem je vznik sekundárního proudění v rozích obdélníkového průřezu trysky. Tento problém se řeší použitím osmihranného průřezu trysky, což bylo vysvětleno dříve. Trysku můžete vidět na Obr. 4, Obr. 5, Obr. 7 a Obr. 11. [1, 3, 14]



Obr. 16 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem, uzavřeným testovacím prostorem a vzduchovými výměníky [1]



Energie proudu vzduchu proudícího tunelem se vlivem tření o stěny tunelu mění na teplo. Proto se v aerodynamických tunelech používá chlazení. Máme několik druhů chlazení. Jeden ze způsobů chlazení je chlazení vodou proudící ve stěnách tunelu, nebo v lopatkách umístěných v rozích tunelu. Další způsob je pomocí výměníku vzduchu, který nepřetržitě nahrazuje ohřátý vzduch z tunelu za chladnější z okolí, znázornění aerodynamického tunelu s výměníkem vzduchu je znázorněn na Obr. 16. Poslední způsob chlazení je pomocí tepelného výměníku (Obr. 5), kde můžeme teplotu regulovat dle potřeby. [1, 3]



Obr. 17 Laminární a turbulentní proudění [15]

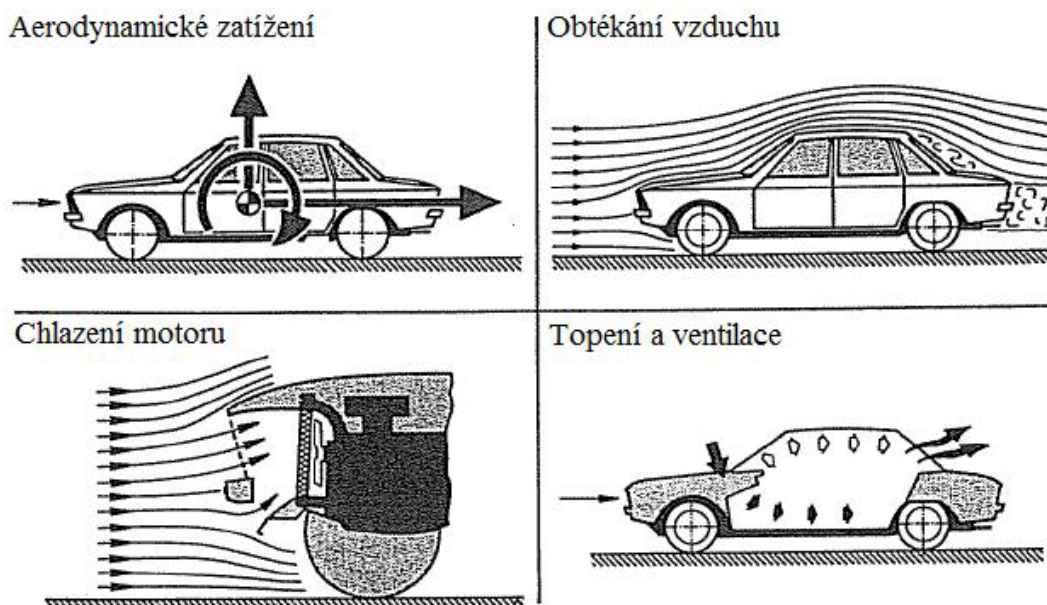
Pro každý aerodynamický tunel je velice důležitá kvalita proudu vzduchu. Kvalita proudu je spojena se stálostí a jednotností toku vzduchu. Jednotnost proudu je závislá na prostorových výkyvech proudu. Prostorové výkyvy rychlosti, by měly být přibližně 0,2-0,3% průměrné rychlosti a prostorové úhlové změny by měly být kolem 0,1°. Dále je také důležitá stálost proudu. Stálost by se dala charakterizovat jako časová závislost změn rychlosti a měla by být v malém rozsahu a při nízkých frekvencích. Nestálosti v proudění jsou zapříčiněny odtržením proudu, proto se místa, kde k odtržení proudu vzduchu dochází, musí najít a musí být odstraněny. Dalším nežádoucím prvkem pro kvalitu proudu vzduchu jsou turbulence. Turbulentní proudění se dá popsat jako nestacionární proudění plné vírů. Nevhodná je také rychlost částic, která je v každém místě odlišná. Vhodné proudění k testování je laminární proudění, u tohoto proudění je směr a rychlost všech částic v proudu stejná. Znázornění obou proudění je na Obr. 17. Pro změnu turbulentního proudění na laminární proudění se používají usměrňovací síta. Jsou to v podstatě drátěná síta s různou hustotou ok, obvykle bývají snadno vyměnitelná (údržba a čištění) a snižují axiální turbulence a také trochu boční turbulence. Na usměrnění proudu se také používají voštiny. Voštiny jsou v podstatě širší síta (Obr. 18). Základem je délka voštiny ve směru proudění obvykle ve tvaru včelích pláství nebo kruhu. Voštiny snižují víry a boční turbulence. Pro získání co nejkvalitnějšího proudění se voštiny a usměrňovací síta skládají za sebe před tryskou umístěnou před testovacím prostorem. [1, 3, 15, 16]



Obr. 18 Voština [17]

3 MĚŘENÍ V AERODYNAMICKÉM TUNELU

V letectví mají aerodynamické síly rozhodující význam, protože drží letadlo ve vzduchu. U automobilů nehrají aerodynamické síly tak zásadní roli, ale musíme s nimi taky počítat. Na Obr. 19 jsou 4 druhy testování vozidel v aerodynamických tunelech: [6]



Obr. 19 Druhy testování vozidel v aerodynamickém tunelu [6]

Měření aerodynamického zatížení se provádí upevněním modelu na rovnovážnou desku, která je připevněna na šestikomponentní váhu. Jakmile začne kolem vozidla proudit vzduch, začne na něj působit různými silami a tyto síly jsou zaznamenávány váhou. Z naměřeného zatížení dostaneme jednotlivé koeficienty: [1, 2]

c_x ...koeficient odporu vzduchu

c_y ...koeficient boční síly

c_z ...koeficient vztlaču

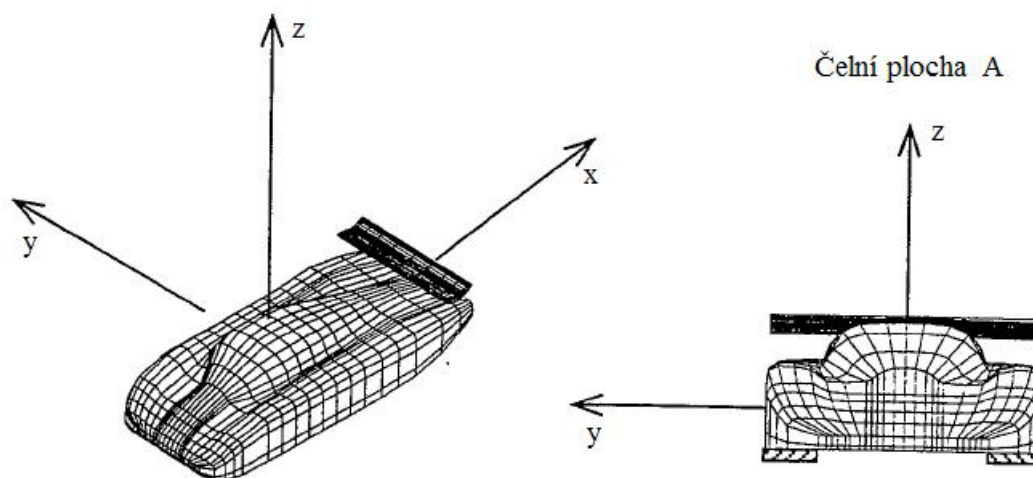
$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (1)$$

$$c_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (2)$$

$$c_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (3)$$



F_x ...odporová síla	[N]
F_y ...boční síla	[N]
F_z ...vztlaková síla	[N]
ρ ...hustota vzduchu	[kg/m ³]
V ...rychlost proudu vzduchu	[m/s]
A ...čelní plocha vozidla	[m ²]



Obr. 20 Souřadnicový systém aerodynamického zatížení [1]

Při obtékání vzduchu je potřeba nějakým způsobem zviditelnit proud vzduchu, aby zaměstnanci aerodynamického tunelu mohli vidět, jakým způsobem vzduch vozidlo nebo model obtéká, kde je proudění laminární a kde naopak turbulentní. Jejich snahou je dosáhnout co nejmenších hodnot c_x . Čím menší bude tento koeficient, tím menší bude odpor vzduchu a tím menší může být například spotřeba automobilu. Je to velice puntičkářská práce, protože na hodnotu c_x má vliv sebemenší detail. [6]

Pro měření chlazení motoru se používá aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem. Při měření je důležité pouze správné proudění vzduchu kolem přední části vozidla. Je tedy možné praktikovat toto měření i v menších aerodynamických tunelech. Protože se měření provádí při spuštění motoru, je třeba zajistit dostatečný odvod výfukových plynů pryč z aerodynamického tunelu. Například aerodynamický tunel VW umí při tomto měření uzavřít otevřený okruh a zároveň má měřicí prostor opatřen černým nátěrem kvůli emisivitě. [6]

Při měření ventilace se měří účinnost ventilačního systému vozidla. Při tomto testování se používá malý přídavný ventilátor, který fouká vzduchu do kabiny a zároveň se v kabině měří tlak. Provádějí se dva druhy testů, jeden s použitím proudu vzduchu a druhý bez proudu vzduchu. Při měření topení a klimatizace se většinou používají aerodynamické tunely, které mohou ohřívat nebo chladit proudící vzduch. Před zahájením zkoušky se teplota vzduchu nastaví na požadovanou hodnotu. Poté se spustí motor a v daných časových intervalech jsou zaznamenávány teploty v různých místech kabiny. [6]

Mezi ostatní typy testů můžeme zařadit zkoušky hlukové, kde se pomocí mikrofону měří aerodynamický hluk zejména při vysokých rychlostech. Dále pak zkoušky stěračů při simulování deště, nebo zkoušky odmlžování skel. Také se například testuje, jakým způsobem a v jakých místech se bude dané vozidlo špinit.

3.1 PŘÍSTROJE POUŽÍVANÉ PRO MĚŘENÍ

Aby podmínky a výsledky při testování byly co nejpřesnější je nutno používat několik důležitých přístrojů a zařízení.

3.1.1 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ PROUDU VZDUCHU

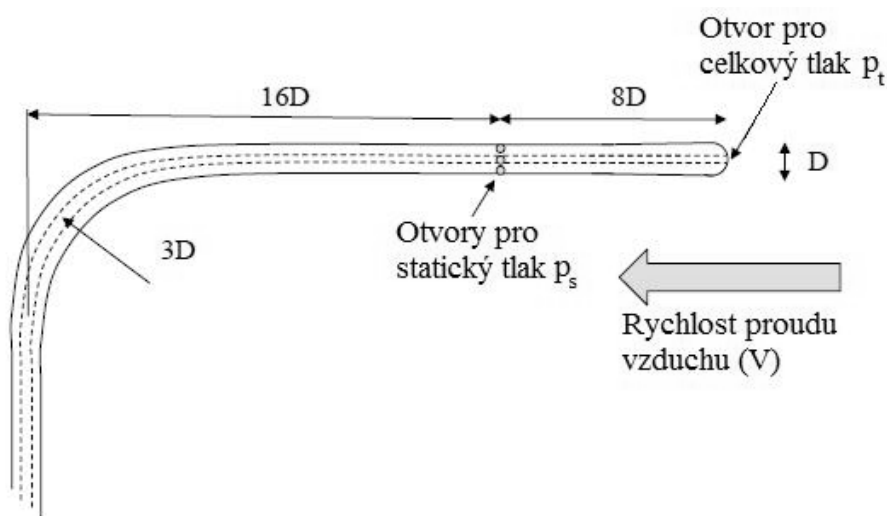
Jeden z hlavních parametrů v aerodynamickém tunelu je rychlost proudu vzduchu. Tato rychlost se většinou měří pomocí Pitotovi statické trubice, kterou vynalezl v 18. Století Henri Pitot. Pitotova trubice měří celkový a statický tlak v měřicím prostoru v aerodynamickém tunelu a rozdíl těchto dvou tlaků je dynamický tlak. Pitotova trubice může měřit s přesností na 0,1%. V některých případech je nutné zavést korekce pro Reynoldsovo číslo a blízkost ke stěně. Pro přesné měření je také důležité, aby úhel mezi trubicí a proudem vzduchu byl menší než 3°. Přední hrana Pitotovi trubice ovlivňuje v blízkém okolí statický tlak proudu vzduchu, proto otvory pro statický tlak musí být umístěny v dostatečné vzdálenosti, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření. Rychlost dále můžeme měřit i pomocí Venturiho trubice fungující na podobném principu jako Pitotova trubice. [4]

Rychlost proudu vzduchu je dána vztahem[4]

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

p_t ...celkový tlak [Pa]

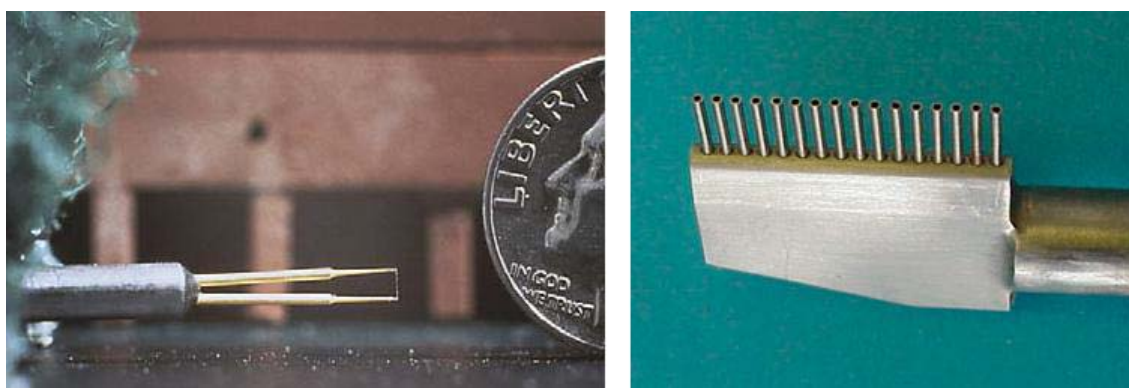
p_s ...statický tlak [Pa]



Obr. 21 Pitotova statická trubice [4]



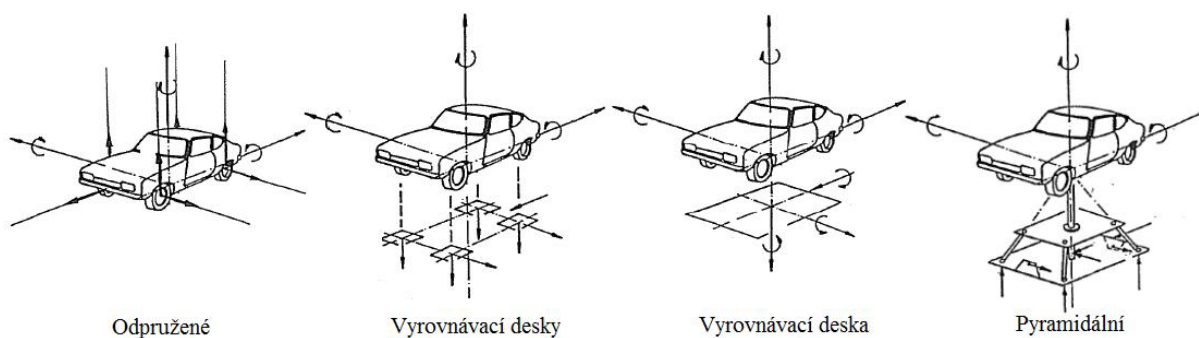
Dále se v testovacím prostoru měří teplota vzduchu. Měří se pomocí teploměru nebo jiného teplotního čidla. Statický tlak se v testovacím prostoru měří pomocí dlouhé statické trubice, na které jsou tlaková čidla. Měření směru a rychlosti proudu se měří pomocí anemometru se žhaveným drátkem. Hlavní částí anemometru je velice tenký drátek, obvykle z wolframu, který je zahříván na teplotu vyšší jak okolní teplota. Proudící vzduch kolem drátku jej ochlazuje. Elektrický odpor všech kovů je závislý na teplotě kovu a právě z této závislosti můžeme získat vztah mezi odporem drátu a rychlosti proudu vzduchu. Podle rychlosti proudu vzduchu můžeme například určit, o jaký typ proudění se jedná a jiné vlastnosti proudu. Jedná se o velice jemnou a přesnou měřicí metodu. Poslední přístroj, který je zde zmíněn, slouží k měření mezní vrstvy. Jedná se o množství malých trubek, které musí být blízko u sebe z důvodu menšího ovlivnění proudu. V jednotlivých trubkách se měří tlak, z kterého se vyhodnocuje velikost mezní vrstvy. Jednotlivé měřicí zařízení mají miniaturní rozměry, jak můžete vidět na Obr. 22. [4]



Obr. 22 Vlevo anemometr se žhaveným drátkem a vpravo zařízení k měření mezní vrstvy [4]

3.1.2 AERODYNAMICKÉ VÁHY

Aerodynamické váhy slouží k měření aerodynamického zatížení během testování. Pro potřeby automobilového průmyslu se používají vnitřní nebo vnější aerodynamické váhy. Podle počtu měřených veličin se nejčastěji dělí na tří a šestikomponentní váhy. Šestikomponentní znamená, že váha je schopna měřit všechny působící zatížení, tedy tři silové (odpor, vztlak a boční síla) a tři momentové (klonění, stáčení a klopení). Tříkomponentní váha měří pouze dvě silové (odpor a vztlak) a jedno momentové zatížení (klonění). [1, 6]



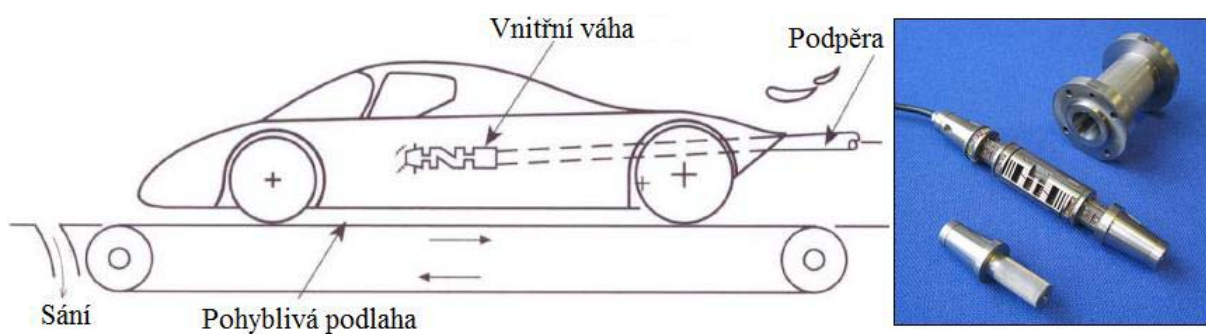
Obr. 23 Typy vnějších aerodynamických vah [6]

Vnější aerodynamická váha (někdy také nazývána jako vyrovnávací deska) je o poznání složitější, jak vnitřní váha. Složitost a velikost váhy je dána počtem měřených zatížení. Váha může být tří nebo šestikomponentní a upevňuje se na ni model automobilu. Jednotlivé druhy vnějších vah jsou znázorněny na Obr. 23. Nejvyspělejší typ v současnosti používané vnější váhy je pyramidální. Na Obr. 24 je znázorněna šestikomponentní aerodynamická váha určená speciálně pro testování modelů závodních vozů a její rozměry jsou 2,1m x 1,87m x 1,3m (d x š x v) a hmotnost 2 tuny. [6, 18]



Obr. 24 Šestikomponentní vnější aerodynamická váha [18]

Vnitřní váha může být opět tří nebo šestikomponentní. Upevňuje se mezi podpěru, držící model a těžiště modelu, znázornění je na Obr. 25. Díky otvorům a různým tvarům kovového jádra se váha v určitých místech stává citlivější na různé zatížení. Na tyto místa jsou nalepeny tenzometry a na základě měření změn v jejich odporu (z důvodu napětí), může být váha kalibrována k měření aerodynamického zatížení. [1, 6]



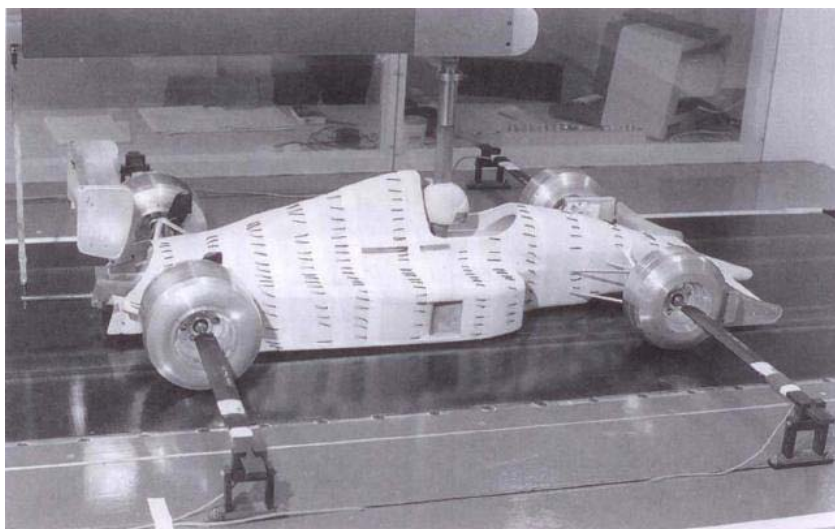
Obr. 25 Znáznornění polohy vnitřní váhy [1] a vpravo detail váhy [18]



3.2 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

Vizualizace proudění patří k základním vlastnostem aerodynamických tunelů. Vzduch je bezbarvý, transparentní plyn a k jeho vizualizaci používáme několik metod.

První metodou vizualizace proudění je použití chomáčů vlny. Chomáče jsou z krátkých vláken a jsou přilepená na povrchu testovaného modelu. Jeden konec vlákna je vždy volný a druhý pevný. Při samotném testování nám vlající vlákna ukazují směr proudění. Často se používají vlákna bílé barvy, na které se svítí ultrafialovým světlem pro lepší viditelnost. Chomáče jsou pravidelně rozmístěny a jejich uspořádání závisí na geometrii testovaného modelu a daném proudění. [1, 4]



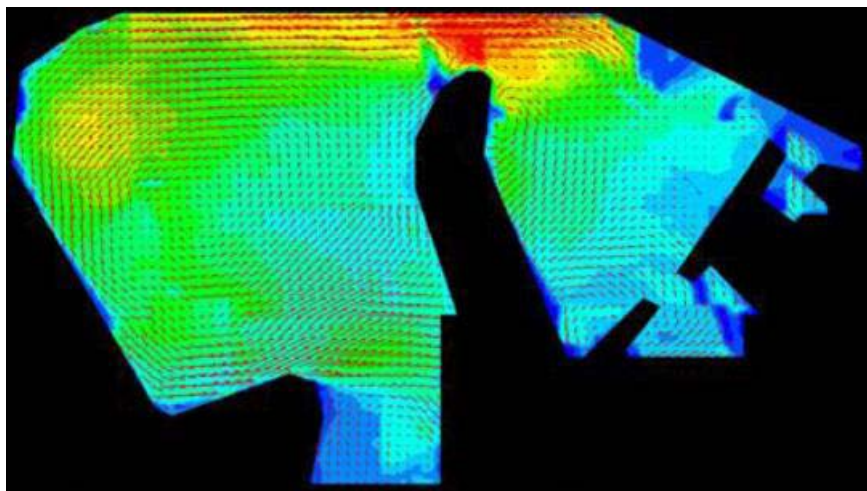
Obr. 26 Vizualizace proudění pomocí chomáčů vlny [1]

Jedna z nejčastěji používaných metod vizualizace proudění je pomocí kouře. Kouř se vytváří pomocí generátoru mlhy, který vytváří tlusté kouřové pruhy. Kouř se může aplikovat pomocí speciální sondy, z jejíhož konce vychází kouř. Sondu drží zaměstnanec tunelu a libovolně s ní pohybuje a směřuje kouř na místa, kde chce pozorovat obtékání vzduchu kolem modelu. Tato metoda je použitelná do rychlostí cca 40 km/h. [4]



Obr. 27 Vizualizace proudění pomocí kouře [19]

Další metodou zobrazování proudění je metoda PIV (Particle Image Velocimetry), neboli Integrovaná laserová anemometrie. Metoda pracuje na principu rozsvícení malých částic ve vzduchu pomocí laserového světla. Jakmile se částice v proudu vzduchu dostanou do plochy, nasvícené laserem, zviditelní se a jsou nasnímány na kameru. Snímky jsou poté vyhodnocovány pomocí počítače a výsledkem je vektorová mapa rychlostí částic. Při použití více kamer lze dostat i 3D obraz proudění. U testování automobilů se tato metoda s oblibou používá na znázornění různých detailů. Například proudění vzduchu uvnitř automobilů při zapnuté ventilaci (Obr. 28) nebo obtékání bočního zrcátka. [4, 6, 20, 21]



Obr. 28 Vizualizace proudění v interiéru automobilu metodou PIV [6]

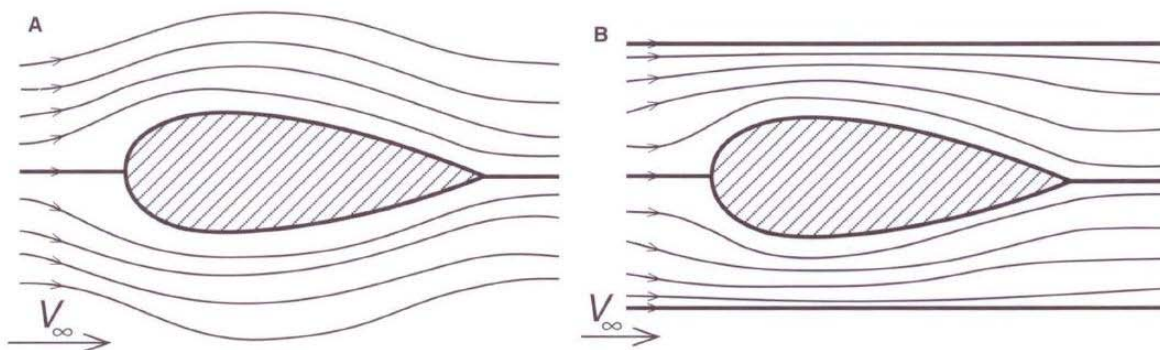
Poslední metodou vizualizace obtékání vzduchu kolem modelu je použití speciální kapaliny (směs olejů, nebo směs petroleje a práškového jílu). Ta se nanese na určitá místa, která chceme zkoumat. Vlivem proudění větru je kapalina pomalu unášena proudícím vzduchem a vytváří tak na modelu obraz směru proudění vzduchu. Obvykle se do kapaliny přidává fluorescenční nebo ultrafialové barvivo pro lepší viditelnost. Výhodou této metody je, že po skončení proudění vzduchu můžeme vytvořené proudnice detailně studovat. [6]



4 PROBLÉMY PŘI TESTOVÁNÍ

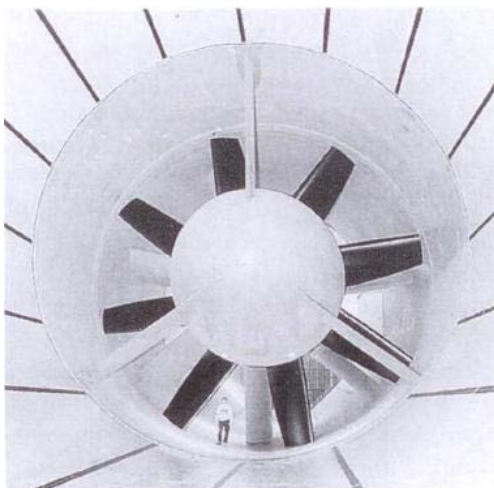
4.1 VELIKOST MODELU A KOREKCE

Problematicku nalezení odpovídající velikosti modelu a velikosti testovacího prostoru v aerodynamickém tunelu si můžeme popsat na jednoduchém příkladu na Obr. 29. [1]



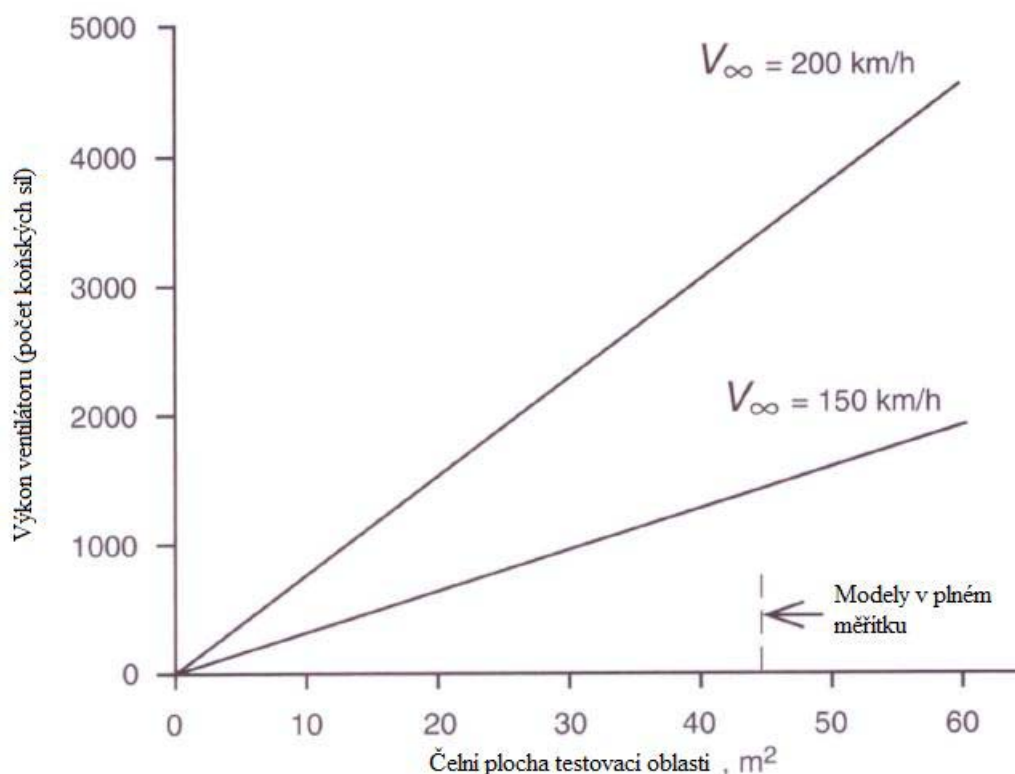
Obr. 29 A) Obtékání tělesa ve volném prostoru, B) Obtékání tělesa mezi stěnami [1]

Na Obr. 29A vlevo je zaoblený předmět pohybující se otevřeným prostorem, což vyvolává v blízkosti zaoblení deformaci proudění. Toto narušení v proudění je místní, daleko od předmětu proudění nebude ovlivněno a zůstane souběžné a rovné. Pokud je předmět umístěn mezi dvě stěny, jak je znázorněno na Obr. 29B vpravo, pak proudění nedaleko zaoblení se přizpůsobí tvaru zdi. Ve skutečnosti se bude proudění v mezeře mezi modelem a stěnami, které budou blízko u sebe, pohybovat rychleji a bude vytvářet větší hodnoty vztlaku a odporu. Z toho plyne, že čím větší bude testovací prostor, tím menší bude vliv stěn na zkreslení výsledků měření a výsledky budou více odpovídat podmínkám na otevřené silnici. Avšak náklady na provoz aerodynamického tunelu se zvyšují jak s jeho velikostí, tak s požadavky na výkon (Obr. 31). [1]



Obr. 30 Obrovský ventilátor
v aerodynamickém tunelu German-Dutch [1]

Je zřejmé, že pouze velké organizace a automobilky s velkými rozpočty si mohou dovolit aerodynamický tunel pro testování modelů v plném měřítku, což je důvod, proč na celém světě existuje jen velmi málo tak velkých tunelů. Velikost ventilátoru v takovém tunelu je na Obr. 30 (výkon kolem 17 000 koňských sil). [1]



Obr. 31 Požadavky na výkon ventilátoru v závislosti na velikosti čelní plochy [1]

Další částí této problematiky je velikost modelu, která podle odůvodnění z Obr. 29, by měla být co nejmenší. Ale návrháři modelů preferují modely v reálné velikosti, nebo alespoň co nejblíže k reálné velikosti, aby mohl být model co nejvíce propracovaný. Pokud jsou používána skutečná auta, pak obsahují veškeré detaily, které u zmenšeného modelu nemohou být vytvořeny tak přesně jako na reálném voze. Také testování skutečného vozu v reálných rychlostech bude znamenat správné Reynoldsovo číslo a to je pro závodní vozy s přitlačnými křídly velmi důležité. Ale pokud je vůz v počátku vývoje a fyzicky neexistuje, pak se musí model připravit tak jako tak. Každopádně pohled na tabulky příloze ukazuje, že počet automobilových větrných tunelů schopných testovat modely v plném měřítku je velmi malý, takže můžeme konstatovat, že většina návrhářů závodních aut je nucena připravit a testovat modely ve zmenšeném měřítku (v rozsahu 1/5 - 1/2 původní velikosti). Shrňme-li to, tak pro minimální ovlivnění proudu vzduchu vlivem stěn v daném aerodynamickém tunelu, by měla být velikost modelu co nejmenší, ale na druhou stranu z hlediska detailů a přesnosti by měl být model co největší. Ve většině případů není vliv stěn na naměřené hodnoty zanedbatelný. Musí se proto najít nějaký kompromis mezi požadavky designéra modelu a schopnostmi aerodynamického tunelu. [1]



4.1.1 KOREKCE

V aerodynamickém tunelu nelze vytvořit proud vzduchu totožný s proudem vzduchu při jízdě na silnici. Proud v aerodynamickém tunelu jsou odlišné od původního proudu vzduchu kvůli několika rozdílům. Tyto rozdíly vyžadují korekce, které se poté použijí na naměřené hodnoty, abychom dosáhli co nejpresnějších výsledků měření. Většina korekčních metod je založena na poměru mezi čelní plochou modelu a průřezu měřicí oblasti v aerodynamickém tunelu. Doporučuje se, aby poměr maximální čelní plochy modelu a průřez testovacího prostoru nepřesáhl 7,5%. Existuje několik druhů korekcí a mezi nejdůležitější patří korekce ucpávání. Ucpávání vzniká přítomností modelu v testovacím prostoru a tím se snižuje oblast, kterou může proud vzduchu proudit. Jak je vysvětleno na Obr. 29, rychlost proudění vzduchu bude u modelu narůstat. Vzhledem k tomu je rychlost v testovacím prostoru vyšší, než by byla ve volném proudění mimo aerodynamický tunel, to znamená, že aerodynamické koeficienty jsou nadhodnocené. Některé z více komplikovaných korekčních metod vyžadují měření tlaku podél měřicího prostoru, který je pak použit k výpočtu metody pro odhad požadované korekce. V praxi jsou používány jiné (a složitější) korekce a použití metod závisí především na aerodynamickém tunelu a tvaru modelu. Obecně platí, že otevřený testovací prostor je méně citlivý na ucpávání jako uzavřený testovací prostor a proto nemusíme používat velké korekce. Rozsah těchto korekcí může být tak nízký, jak 1/4 z korekce použité u ekvivalentního uzavřeného testovacího prostoru. [1, 5]

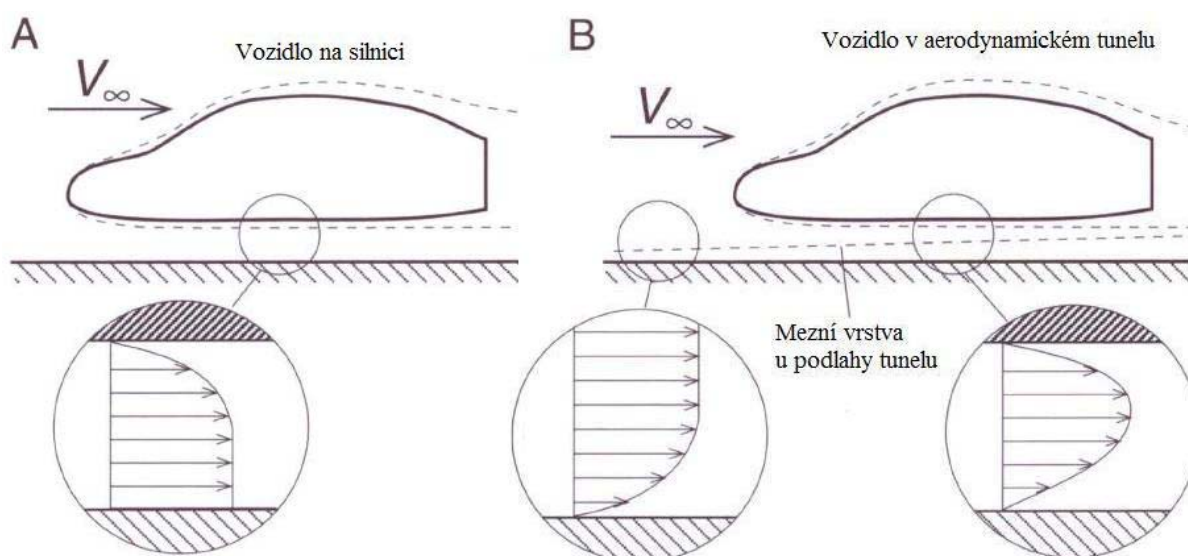
Před uzavřením této kapitoly se pojďme podívat na přibližnou čelní plochu různých sportovních a závodních automobilů.

Tab. 1 Čelní plocha různých automobilů [1]

Typ vozidla	Čelní plocha [m ²]
Monopost (F1)	1,5
Sportovní vozy (Porsche 911)	1,7
Prototypy (Porsche 962)	1,8
Osobní automobily (BMW)	1,9

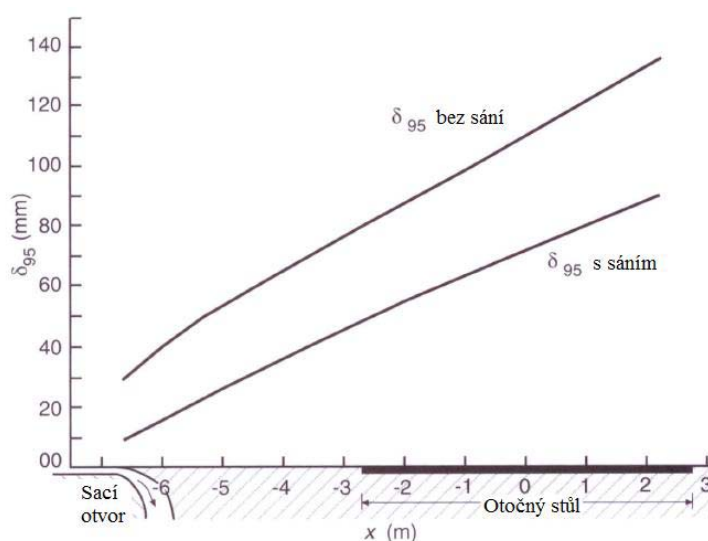
4.2 SIMULACE POHYBU SILNICE

Potřeba simulace pohybu země (nebo silnice) v aerodynamickém tunelu značně komplikuje testování. Než se seznámíme s různými řešeními tohoto problému, řekněme si, proč vlastně simulujeme pohyb silnice. Jak můžete vidět na Obr. 32A, je zde rozdíl ve tvaru mezní vrstvy mezi silnicí a vozidlem. Rychlost v mezní vrstvě u povrchu pevného objektu zpomalí na nulu a bližší pohled na rychlostní profil mezi autem a silnicí ukazuje nedostatek rychlosti proudu vzduchu v blízkosti povrchu vozidla. Podlaha v aerodynamickém tunelu je vzhledem k proudu vzduchu statický objekt a mezní vrstva na podlaze v testovacím prostoru existuje i bez auta. To je ukázáno na Obr. 32B (levý detail), kde je ukázka rychlostního profilu před modelem v aerodynamickém tunelu. Pokud je vůz umístěn v aerodynamickém tunelu, pak rychlostní profil pod vozidlem (pravý detail na Obr. 32B) je výsledkem dvou mezních vrstev. Jedna mezní vrstva se vytvoří na zemi a další na spodním povrchu vozidla. [1]



Obr. 32 A) Mezní vrstva u vozidla jedoucího na silnici, B) Mezní vrstva vozidla v aerodynamickém tunelu [1]

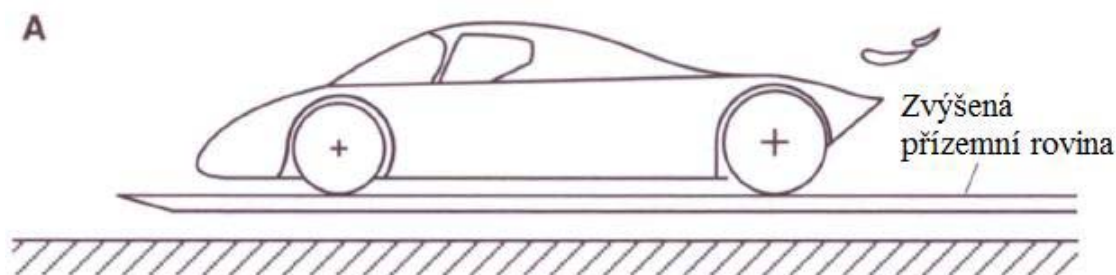
Jak silné jsou tyto mezní vrstvy a jak velký vliv mají na aerodynamické výsledky, můžeme vidět na Obr. 33, který představuje naměřené hraniční hodnoty tloušťky mezní vrstvy modelu v plném měřítku v tunelu automobilky GM. Tyto údaje uvádí, že dokonce i při použití odsávání mezní vrstvy před modelem je okrajová vrstva tloušťky blízko 0,1m. Pokud bychom testovali kamion se světlou výškou okolo 0,6m při rychlosti 200 km/h, pak se není třeba obávat, že vliv mezní vrstvy ovlivní naměřené výsledky. Ale pokud bychom testovali závodní automobil se světlou výškou kolem 0,05m až 0,1m, pak je pravděpodobné, že vliv mezní vrstvy bude velký a naměřené výsledky nebudou přesné. V důsledku toho se v následujících odstavcích seznámíme s některými opatřeními k nápravě tohoto problému. [1]



Obr. 33 Velikost mezní vrstvy v testovacím prostoru [1]

První možností je vyvýšit model nad mezní vrstvu. Vzhledem k tomu, že se tloušťka mezní vrstvy zvyšuje směrem k zadní části vozidla, tak by se vozidlo mělo naklonit trochu dopředu. Z důvodu vyvýšení modelu a sklonu vozidla dojde k zvýšení kol (prostor mezi koly a podlahou musí být vyplněn měkkou pěnou, aby se předešlo velkým sacím silám vyplývajících z proudění mezi koly a podlahou). Proto je tento přístup používán jen zřídka. [1]

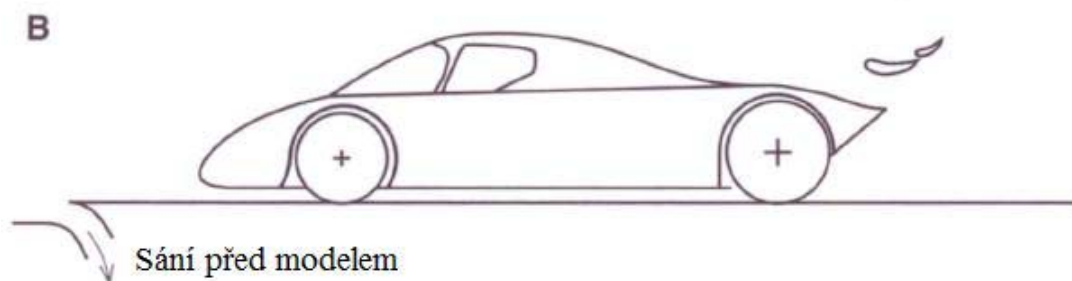
Podobné řešení jako minulé využívá další možnost jak snížit vliv mezní vrstvy. U tohoto řešení jde o to, že do testovacího prostoru zavedeme vyvýšenou přízemní rovinu, jak je znázorněno na Obr. 34. Základní myšlenkou je, že oblast s větší mezní vrstvou u podlahy aerodynamického tunelu je odebrána a model je umístěn v mnohem tenčí mezní vrstvě (tvořené pouze zvýšenou deskou). V tomto případě může být model také vyvýšen a mezery pod koly se utěsní pěnou. Tento přístup je pravděpodobně nejjednodušší a je používán v malých aerodynamických tunelech univerzitního typu. [1]



Obr. 34 Testovací prostor s vyvýšenou přízemní rovinou [1]

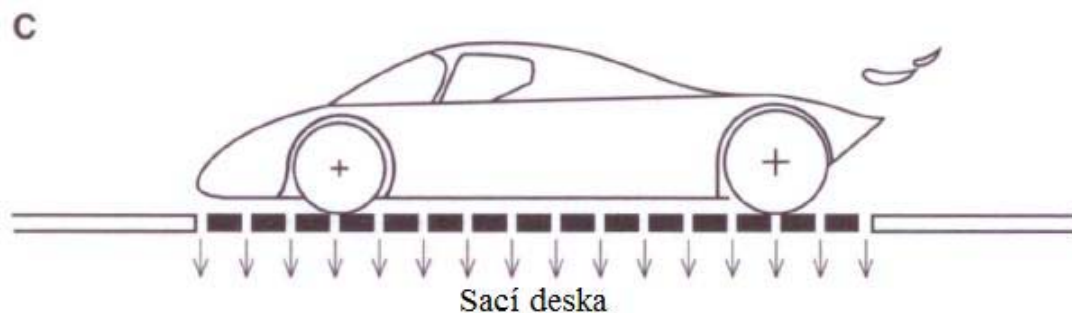
Druhé nejjednodušší řešení je použití podélného sacího otvoru před modelem, jak je znázorněno na Obr. 35. Sací otvor odstraňuje mezní vrstvu, takže nová vrstva vytvořená pod vozidlem je mnohem tenčí. Pro svou jednoduchost je tento přístup používán v mnoha tunelech

měřících modely v plném měřítku. Pro efektivitu by tloušťka nové mezní vrstvy začínající za sacím otvorem neměla překročit 10% světlé výšky vozidla. [1]

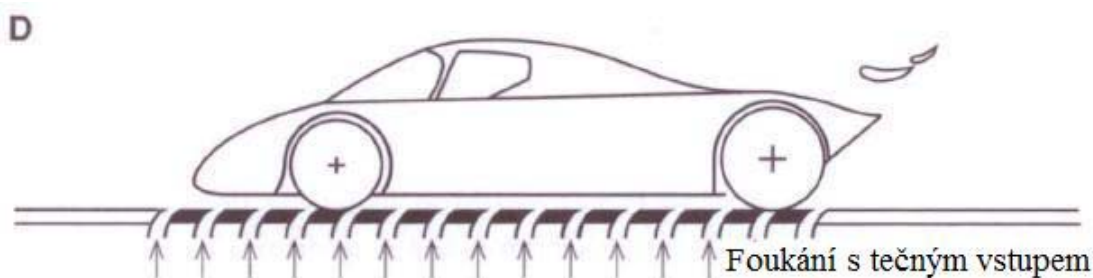


Obr. 35 Testovací prostor se sacím otvorem před modelem [1]

Vylepšení oproti metodě se sacím otvorem před modelem je mít otvory pod vozidlem v celé délce tak, jak je ukázáno na Obr. 36. Tato sací deska je považována jako jedno z lepších řešení, ale provedení je poněkud složité a finančně nákladné. [1]



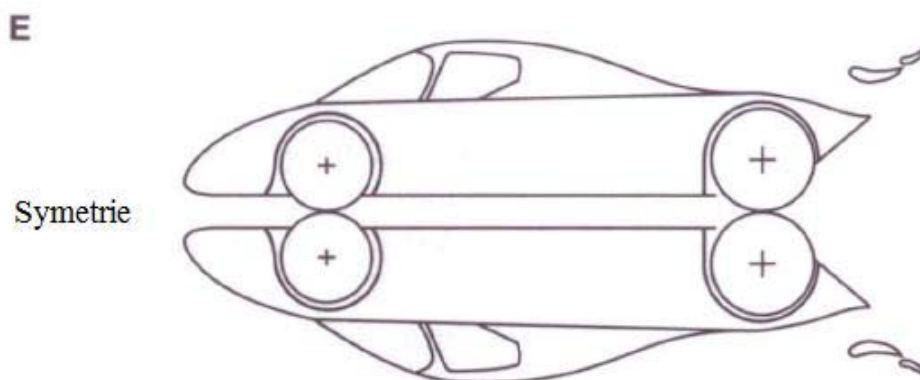
Obr. 36 Testovací prostor se sací deskou [1]



Obr. 37 Testovací prostor s foukáním s tečným vstupem [1]

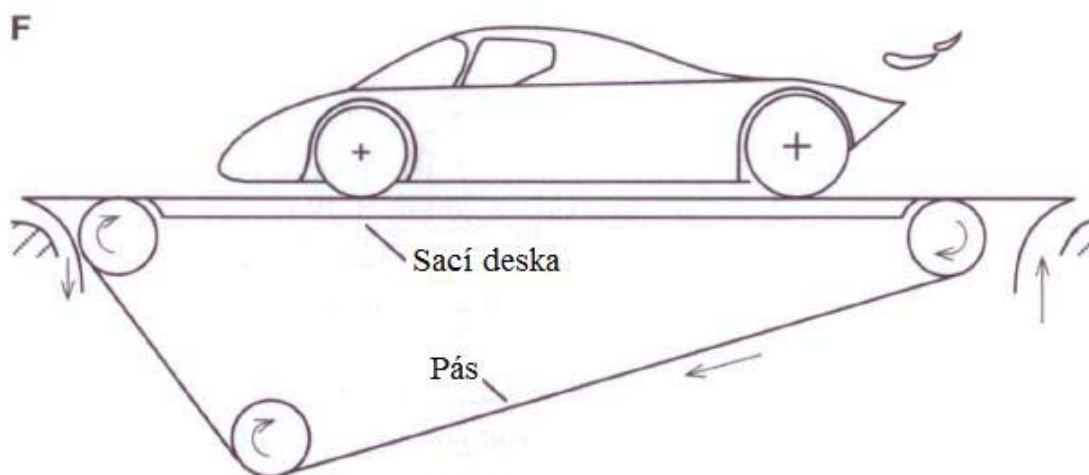
Další řešení je založeno ne na odsávání jako v předešlém případě, ale na opačné technice, čili foukání vzduchu. Foukání s tečným vstupem dodává proudu vzduchu moment (sílu a hybnost), který byl ztracen v mezní vrstvě proudu vzduchu, jak je znázorněno na Obr. 37. Stejně jako v předchozím případě je to účinné, ale finančně náročné. [1]

U metod s tečným foukáním a sací deskou je problém s tím, zdali by se mělo sání nebo foukání pod modelem s rostoucí vzdáleností lišit, nebo by mělo být konstantní. Mnozí specialisté na aerodynamiku věří, že v důsledku vzájemného působení mezi vozidlem a podlahou, by se mělo sání nebo foukání lišit a nebýt konstantní. [1]



Obr. 38 Testovací prostor se symetrickým modelem [1]

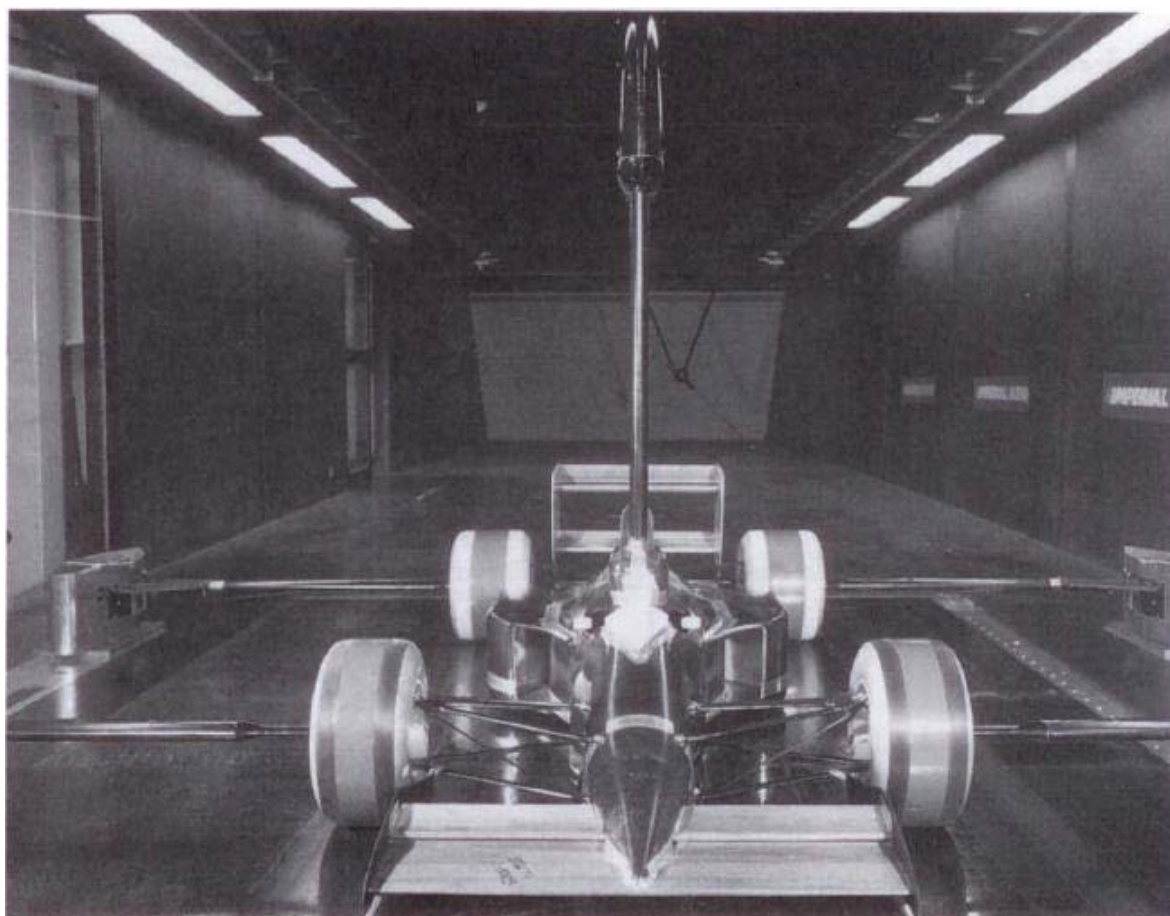
Další řešení je založeno na symetrii, jak je znázorněno na Obr. 38. Základní myšlenka je, že linie souměrnosti dělí dva identické modely je také proudnice. Proto je automaticky dosaženo simulace vozovky. Samozřejmě by měli být oba modely stejné (včetně změn v průběhu zkoušky) a to může zvýšit náklady na dvojnásobek. Také velikost testovací oblasti aerodynamického tunelu musí být větší kvůli umístění dvou modelů, v důsledku toho se tento přístup moc nepoužívá. [1]



Obr. 39 Testovací prostor s pohyblivým pásem [1]

Poslední řešení simulace vozovky je pohyblivý pás, jak je znázorněn na Obr. 39. Tento přístup je nejpopulárnější mezi návrháři závodních aut, ale má také své problémy. Za prvé je model obvykle podporován tzv. "žihadlem", které je připojeno buď na zád, nebo na střechu modelu a zasahuje do proudění směrem k zadnímu křídlu. Druhým problémem je jakým způsobem měřit zatížení na rotujících kolech, která jsou ve styku s pásem (některé tunely

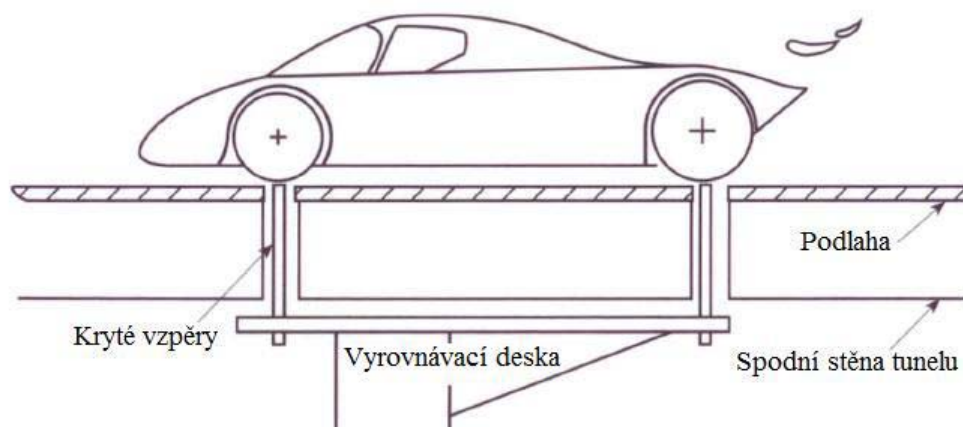
používají úzký pás běžící pouze mezi koly, aby se předešlo tomuto problému). Třetí problém je, že vysoký podtlak pod závodním autem (prototypy, Indy, atd.) může vsávat pás. To je v dražších zařízeních řešeno přidáním další sací desky pod pásem. Poslední problémem je omezená rychlost pásu (≈ 150 km/h), která je obvykle menší než maximální rychlost proudění v aerodynamickém tunelu (některé současné systémy pohybujících se pásů jsou schopné rychlosti běhu až 250 km/h). Systém pohybu pásu na Obr. 40 ukazuje jeden z lepších návrhů, protože má jak sací otvor pro odstranění mezní vrstvy u dna tunelu před modelem, tak fouká za pás, aby posunul dále mezní vrstvu, která začíná za pásovým systémem. Typické ustavení modelu závodního auta na pohyblivém pásu v měřícím prostoru je aerodynamický tunel Imperial College v Londýně a je znázorněn na Obr. 40. [1]



Obr. 40 Ustavení modelu v testovacím prostoru s pohyblivým pásem [1]

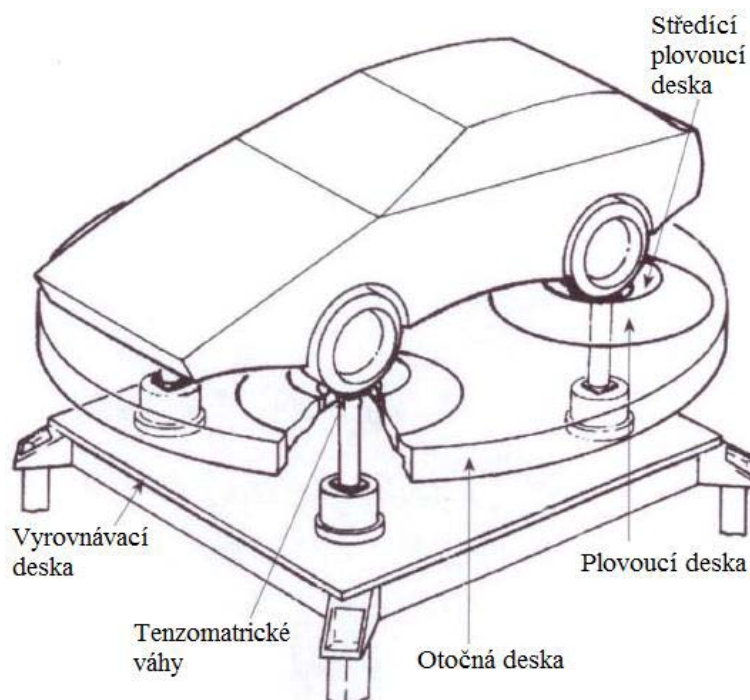
4.3 MONTÁŽ MODELU A OTÁČENÍ KOL

V této části se zaměříme na montáž modelu v testovacím prostoru. V následujících odstavcích si popíšeme některé z nejčastěji používaných řešení. [1]



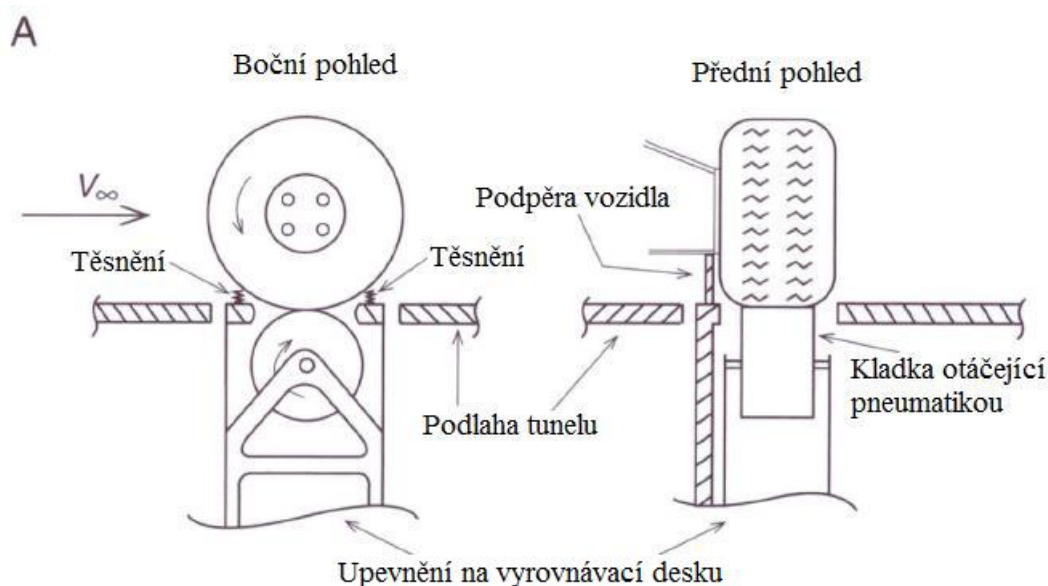
Obr. 41 Umístění vozidla v testovacím prostoru [1]

Nejjednodušší metodou pro testování skutečného vozu v plném měřítku v aerodynamickém tunelu je umístění vozidla na podlahu tunelu, jak je ukázáno na Obr. 41. Kola se opírají o malé vzpěry, které jsou odděleny od podlahy tunelu a jsou spojeny s vyrovnávací deskou. Typické nastavení tohoto druhu (bez zvýšené přízemí roviny), které se používá pro testování modelů v plném měřítku je znázorněno na Obr. 42. [1]



Obr. 42 Upevnění vozidla pomocí plovoucích desek [1]

Čtyři malé kruhové plovoucí desky jsou umístěny na vrcholu čtyř vzpěr, které jsou přímo připojeny k vyrovnávací desce, což je zařízení měřící zátěž. Vyrovnávací deska je oddělena od podlahy aerodynamického tunelu, za účelem zaznamenání zatížení pouze od proudu vzduchu. Toho je dosaženo dvěma přídatnými sadami středících plovoucích desek umístěných v jedné rovině s podlahou tunelu, a které mohou rotovat nezávisle na sobě, jak je ukázáno na Obr. 42. Kromě toho se mohou tyto desky pohybovat vzhledem k otočné desce, protože existuje malá mezera mezi plovoucími deskami držící kola vozidla a podpěrou na podlaze aerodynamického tunelu. Otočná deska slouží pro natáčení modelu. Ve stejnou dobu se synchronizovaně otáčí i čtyři podpěry na vyrovnávací desce, aby nedošlo ke kontaktu mezi měřícím systémem a podlahou aerodynamického tunelu. [1]

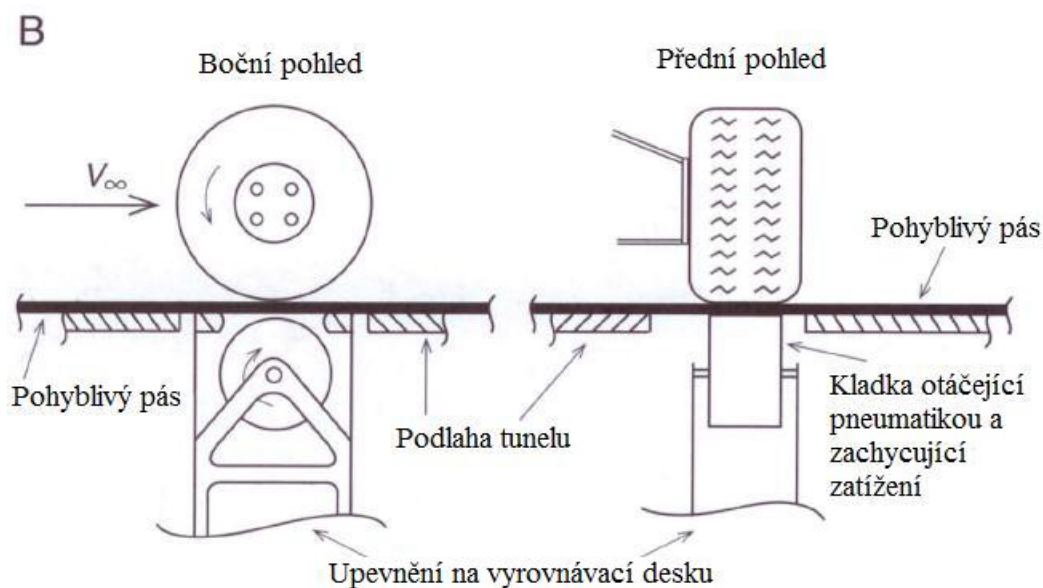


Obr. 43 Upevnění vozidla a zajištění otáčení kol na pevné podlaze [1]

Pokud chceme, aby se v průběhu zkoušky otáčela kola, pak můžeme použít k rámu připevněné motory. Jejich rychlost je synchronizována s rychlosti proudu vzduchu v testovacím prostoru. Pro tento případ je hmotnost modelu podporována vzpěrami (nebo deskami), které jsou namontované uvnitř kol, jak je ukázáno na Obr. 43. Mezera mezi podlahou a kolem je utěsněna kartáčem nebo nějakým jiným pružným těsněním, aby se zabránilo proudění vzduchu pod kola. Tato technika může být použita s většinou metod redukce mezní vrstvy (Obr. 34 až Obr. 37). [1]

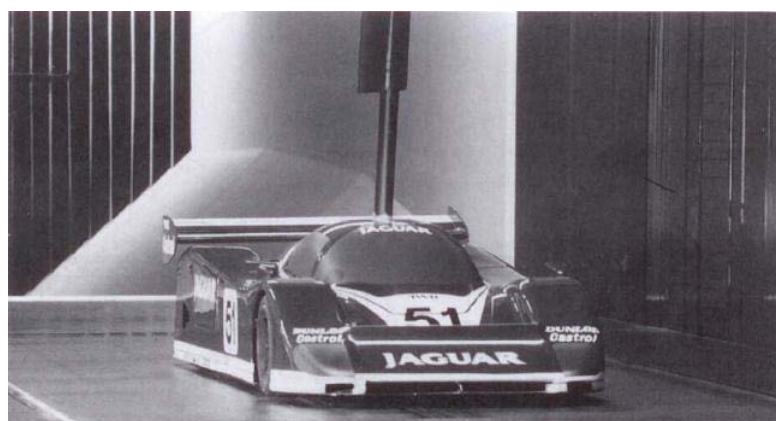
V posledních letech se používá varianta simulování pohybu vozovky pomocí pásu (Obr. 44). Tento přístup umožňuje měření vztaku na každém z rotujících kol (na základě měření svislých sil působících na rotující válec pod pásem). Jelikož je toto měření skrze pohybující se pás, systém musí být kalibrován z důvodu tření pásu a deformace. To je děláno samostatným měřením s odvalováním pohyblivého pásu, ale bez proudění vzduchu. Tato kalibrace je později použita pro korekci naměřených hodnot při samotném testování. Vzhledem k tomu, že kola nejsou pevně upevněna k desce, jak je ukázáno na verzi s nehybnou podlahou (Obr. 43), tahová síla vozidla musí být bržděna podpěrným systémem modelu. Jak se zvětšuje velikost modelu, tak narůstá tahový a valivý odpor (zejména u modelu v plném měřítku), a proto se

někdy k upevnění modelu v měřicím prostoru používají i přídatná lana (nijak nepřekáží při odvalování pásu). [1]



Obr. 44 Zajištění pohybu kol pomocí pohyblivého pásu [1]

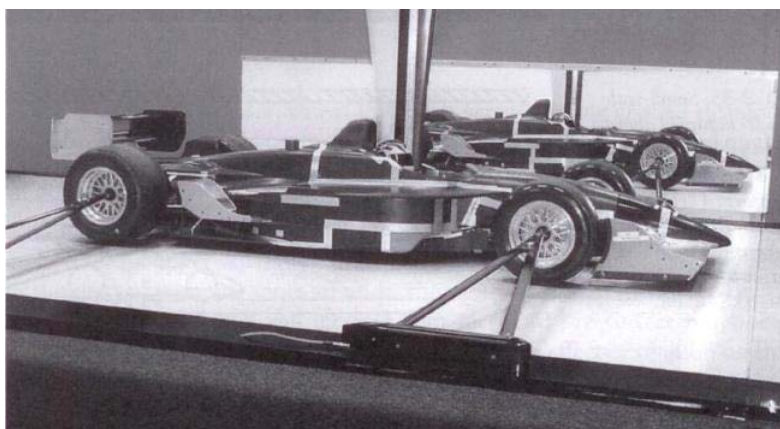
Ve většině případů kdy je používán pohyblivý pás pro simulaci vozovky je model obvykle podporován pomocí podpěry, která se upevňuje buď na zád' (Obr. 25) nebo na střechu vozidla (Obr. 45). Z aerodynamického hlediska podpěra upevněná na zád' modelu neovlivňuje tolik jako podpěra upevněná na střechu modelu. Síly a momenty se měří pomocí váhy, která se upevňuje mezi model a podpěru. [1]



Obr. 45 Podpěra umístěná na střechě vozidla [1]

Otáčení kol se obvykle docílí kontaktem mezi koly a pohybujícím se pásem. V tomto případě síly mezi pásem a modelem mohou zavést chybu v měření zatížení. Jedno z řešení je, že kola jsou pevně připevněna k podlaze a otáčejí se vlivem pohybu pásu. Zbytek modelu je připojen k váze, která měří pouze zatížení na karoserii. Toto řešení se používá k testování modelů

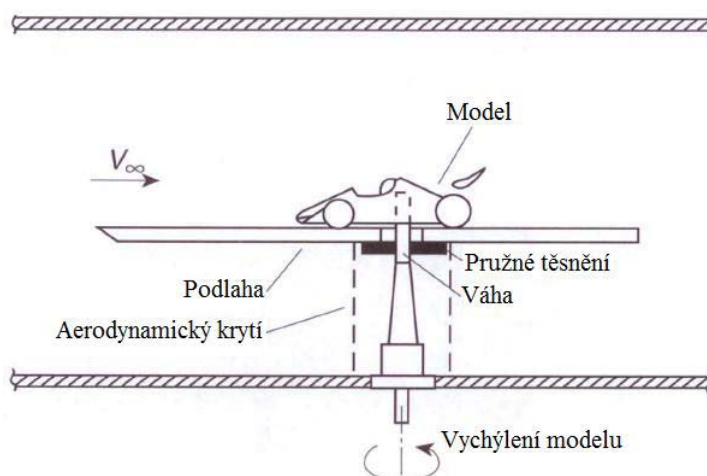
v malém měřítku. Rotující kola mohou také pomoci při přidržování a stabilizaci pohyblivého pásu. [1]



Obr. 46 Upevnění závodního monopostu F1 [1]

Nevýhoda tohoto nastavení je, že vliv kol se neměří přímo a to může vést k chybám při testování závodních monopostů (např. u F1, kde jsou kola dominantní prvek aerodynamiky vozidla). Model závodního monopostu používá metodu upevnění, jak je znázorněno na Obr. 46. Aerodynamické zatížení na kolech se měří přes tenzometry, které jsou přilepeny na podpěrách držících jednotlivá kola. Tato metoda je poměrně přesná pro odpor, ale méně spolehlivá pro měření vztlaku u rotujících kol. [1]

Jednou z nevýhod používání podpěry při měření s pohyblivým pásem je flexibilita rovnováhy. To může vést k až vibračním modelů během testování. Proto je tato metoda vhodnější pro testování modelů v malém měřítku a lehkých modelů, ačkoliv se může použít i na modely v plném měřítku. Tento problém není tak závažný, když je model podporován shora, ale podpěra může narušit proudění vzduchu na střeše a směrem k zadnímu křídlu závodního vozu. Podpěru je možné upevnit také pod model, stejně jak na Obr. 47, kde je použita i zvýšenou podlaha. Tento přístup je podobný použitím váhy (Obr. 41), ale měřicí zařízení je mnohem kompaktnější. [1]



Obr. 47 Podpěra umístěná pod modelem [1]



ZÁVĚR

V minulosti si s aerodynamikou vozu nikdo hlavu nelámал. Účinná aerodynamika začala zajímat výrobce automobilů až v době, kdy pro zlepšení dynamiky svých vozů nemohli z nějakých důvodů použít výkonnější motor. Stejně tak si nikdo nelámал hlavu i se spotřebou. Vše však změnila první ropná krize. Automobilky začali svolávat odborníky na aerodynamiku, kteří měli za úkol vylepšit aerodynamické vlastnosti automobilů za účelem úspory paliva. A proto také automobilky začaly stavět aerodynamické tunely, což nebyla rozhodně levná záležitost. Například nedávno automobilka BMW otevřela v Mnichově jedno z nejmodernějších center pro měření aerodynamiky obsahující dva aerodynamické tunely za 4,4 miliardy korun.

Testováním na vozech v reálné velikosti, či na zmenšených modelech se inženýři v aerodynamických tunelech snaží dosáhnout co nejmenších hodnot aerodynamického odporu. Aerodynamický odpor stoupá s druhou mocninou rychlosti, což znamená, že čím rychleji vozidlo jede, tím více roste aerodynamický odpor. Aerodynamický odpor moderních automobilů ze 40 % ovlivňují jeho proporce a tvar. Další 10 % je dáno průtokem vzduchu pro chlazení (motor, brzdy), asi 20 % tvoří proudění pod podlahou a 30 % vytvářejí kola a podběhy blatníků. Aerodynamický odpor má také vliv na spotřebu vozu. Obecně lze říci, že snížením aerodynamického odporu o desetinu, klesne spotřeba o 2,5 %. Honba za snižováním aerodynamického odporu je mravenčí práce při mnohahodinovém testování v aerodynamickém tunelu. Inženýři pomocí vizualizace proudění hledají místa, kde obtékání není ideální a upravují ho do té doby, dokud není obtékání dle jejich představ. Tímto způsobem se upraví několik míst na vozidle a hodnota aerodynamického odporu klesne o pár setin až desetin, což má za následek samozřejmě snížení spotřeby paliva. Automobilky se snaží snížit spotřebu nejenom úpravami motoru, ale také těmito drobnými aerodynamickými úpravami a právě spotřeba je mnohdy rozhodující faktor při koupi vozu u mnoha zákazníků. Proto některé automobilky neváhají vynaložit nemalé peníze na výstavbu vlastního aerodynamického tunelu.

Aerodynamické tunely pro testování a vývoj závodních automobilů se nijak neliší od tunelů pro klasické automobily. Závodní i osobní vozidla se mohou testovat i ve stejném tunelu, rozdíl je ovšem v tom, co se měří. U osobních automobilů je kladen důraz na aerodynamický odpor, jízdní vlastnosti, jízdní komfort nebo například aerodynamický hluk při vyšších rychlostech. Kdežto u závodních automobilů je kladen důraz na stabilitu, ovladatelnost vozu ve vysokých rychlostech a dosahování co nejvyšších maximálních rychlostí. Pro aerodynamický tunel určený pro testování závodních automobilů je nutnost mít pohyblivý pás simulující pohyb vozovky a také zařízení či metodu k eliminaci mezní vrstvy. Doslova alfou a omegou je aerodynamika pro monoposty formule 1. Kde každé křídlo, každý detail má velký vliv jak na přítlak, tak na obtékání vozu. Proto také většina týmů vlastní aerodynamický tunel, kde mohou testovat a vyvíjet svůj monopost. Například Ferrari postavilo nedávno nový aerodynamický tunel a začalo v něm testovat svůj monopost na novou sezonu. Po několika prvních závodech se monopost ovšem nechoval podle jejich představ, proto hledali, kde byl problém. Zanedlouho zjistili, že při testování v novém tunelu nepoužívali správné hodnoty korekcí, tudíž pracovali se nepřesnými hodnotami a měření neodpovídalo realitě.

Aerodynamické tunely se staly nepostradatelným prvkem ve vývoji automobilů a v blízké budoucnosti tomu nebude jinak. Ovšem technika jde dopředu a možná se dočkáme chvíle, kdy budou počítačové simulace na takové úrovni, že aerodynamické tunely již nebude potřeba.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
- [2] ANDERSON, J. D. *Fundamentals of aerodynamics: Third edition*. McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-07-237335-0.
- [3] DIMITRIADIS, G. *Experimental Aerodynamics: Introduction* [online]. Poslední revize 25. 11. 2009 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <<http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero01.pdf>>.
- [4] DIMITRIADIS, G. *Experimental Aerodynamics: Wind tunnel instrumentation* [online]. Poslední revize 25. 11. 2009 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <<http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero02.pdf>>.
- [5] DIMITRIADIS, G. *Experimental Aerodynamics: Wind tunnel corrections* [online]. Poslední revize 25. 11. 2009 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <<http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero03.pdf>>.
- [6] DIMITRIADIS, G. *Experimental Aerodynamics: Wind tunnel tests on road vehicles* [online]. Poslední revize 23. 11. 2010 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <<http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero06.pdf>>.
- [7] GRŘÍŠEK, L. *Aerodynamika a její aplikace* [online]. Poslední revize 30. 5. 2004 [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <http://kolasinovydeti.euweb.cz/dwl/sem_lukas_g.pdf>.
- [8] *Aerodynamics facility* [online]. Poslední revize 24. 12. 2008 [cit. 2011-03-17]. Dostupné z: <<http://www.allamericanracers.com/mfg/aerodynamics.html>>.
- [9] *Aerodynamika: Aerodynamické tunely* [online]. Poslední revize 12. 11. 2010 [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <<http://historieletectvi.xf.cz/aerodynamika.htm#Tunely>>.
- [10] CUTLER, C. *The encyclopedia of Earth* [online]. Poslední revize 18. 8. 2006 [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <http://www.eoearth.org/article/Wenham,_Frank_H.?topic=49467>.
- [11] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 14. 2. 2011 [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tatra_77>.
- [12] *Tatra T77* [online]. Poslední revize 22. 7. 2009 [cit. 2011-03-24]. Dostupné z: <<http://www.tatra-club.com/graphics/vote/15/96/full/tatra-t77-2.jpg>>.
- [13] *Turning vane* [online]. Poslední revize 26. 4. 2011 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <<http://www.answers.com/topic/turning-vane-1>>.
- [14] MATOUŠEK, V. *Obtékání tuhého povrchu a pevné částice v kapalině* [online]. Poslední revize 1. 12. 2010 [cit. 2011-03-31]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HY3V_12_Obtekani_a_pevne_castice_v_kapaline.pdf>.



- [15] *Proudění tekutin* [online]. Poslední revize 26. 4. 2011 [cit. 2011-04-01]. Dostupné z: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=281>
- [16] AGRAVAL, K. *Components of a wind tunnel* [online]. Poslední revize 13. 12. 2008 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z: <<http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/19131.aspx>>
- [17] *Honeycomb* [online]. Poslední revize 8. 4. 2011 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z: <http://f1-dictionary.110mb.com/wind_tunnel.html>
- [18] *Aerodynamics test equipment* [online]. Poslední revize 17. 12. 2010 [cit. 2011-04-14]. Dostupné z: <<http://www.aerotech-ate.com/cgi-bin/home.pl?page=products>>
- [19] *BMW Aerodynamics test center* [online]. Poslední revize 24. 6. 2009 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: <<http://www.glamcar.com/bmw/bmw-opens-its-latest-aerodynamic-test-center/>>
- [20] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 9. 4. 2011 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Integr%C3%A1ln%C3%AD_laserov%C3%A1_anemometrie>
- [21] MAZAL, R. *Particle image velocimetry* [online] Poslední revize 23. 5. 2006 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: <<http://profily.fs.cvut.cz/Particle%20Image%20Velocimetry.pdf>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[m ²]	čelní plocha vozidla
c _x	[-]	koeficient odporu vzduchu
c _y	[-]	koeficient boční síly
c _z	[-]	koeficient vztlaku
F _x	[N]	odporová síla
F _y	[N]	boční síla
F _z	[N]	vztlaková síla
p _s	[Pa]	statický tlak
p _t	[Pa]	celkový tlak
V	[m/s]	rychlost proudu vzduchu
V _∞	[m/s]	rychlost volného proudu vzduchu
δ ₉₅	[mm]	velikost mezní vrstvy
ρ	[kg/m ³]	hustota vzduchu



SEZNAM PŘÍLOH

Seznam aerodynamických tunelů určených pro testování osobních automobilů.....P1

Seznam aerodynamických tunelů určených pro testování závodních automobilů.....P2



SEZNAM AERODYNAMICKÝCH TUNELŮ URČENÝCH PRO TESTOVÁNÍ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

Název	S (m ²)	L (m)	V _{max} (km/h)	TS	K	P (kW)
Behr	5,24	14	120	O	6	147
BMW	20	12,5	160	SW	3,66	1676
Chrysler	4,74	8,6	190	O	5,56	560
Daimler-Benz	32,6	10	270	O	3,53	4000
DaimlerChrysler (MI)	150	21	240	O	-	4730
DNW I	90,25	15	220	C	4,8	12700
DNW II	48	16	400	C	9	12700
Fiat I	30	10,50	200	O	4	1865
Fiat II	12	11,6	160	O	4	560
FKFS I	6	15,8	200	O	4,16	1000
FKFS II	22,5	9,5	220	O	4,41	2550
Ford (Cologne)	24/8,6	10	182/298	O	4	1650/1960
Ford (Dearborn)	23,2	9,15	201	C	3,8	1865
Ford (MI)	18,7		200	O	10,7	-
General Motors	65,9	23	240	C	5	2950
Inst. Aero. St. Cyr	15	10	144	SW	5	516
JARI	12	10	205	C	4,06	1200
Langley	162	17	195	O	-	8000
Lockheed-Georgia	35,1	13,1	406	C+MG	7,02	6700
Mazda	24	12	230	C/O	6	1600
MIRA	35	15,24	133	C	1,45	970
Mitsubishi	24	12	216	C/O	-	2350
Nippon Soken	17,5/12	12,5/8,5	120/200	C	3,66	1450
Nissan	21	10	119	C	2,86	-
NRC (Kanada)	81	24	200	C	-	9000
Opel	4,3	-	120	C	-	460
Pininfarina	11,75	9,5	150	O	6,2	625
Porsche	22,3	12	230	SW	6,06	2200
Sofica	11/4,3	16,5/14	80/170	C	-	380
Toyota	17,5	8	200	C	3,66	1500
Volkswagen I	37,5	10	180	O	4	2600



Volkswagen II	6	7,2/6	170/180	O	6	460
Volvo I	27,06	15,8	200	SW	6	2300
Volvo II	4,32	8,6	190	O	6,6	500

Vysvětlivky:

S.....průřez testovacího prostoru

C.....uzavřený testovací prostor

K..... poměr zúžení

L.....délka

MG....testovací prostor s pohyblivou podlahou

O..... otevřený testovací prostor

P..... hnací výkon

SW.... testovací prostor a drážkovanou stěnou

TS.....typ testovacího prostoru

$V_{\max}$maximální rychlost vzduchu



SEZNAM AERODYNAMICKÝCH TUNELŮ URČENÝCH PRO TESTOVÁNÍ ZÁVODNÍCH AUTOMOBILŮ

Název	W (m)	H (m)	L (m)	V _{max} (km/h)	TS	K	P (kW)
AAR (Gurney)	1,52	0,89	3,5	160	C+SW+MG	6	130
Activa (Brabham)	1,83	1,37	3,96	150	C+MG	5	215
Aerodyn (NASCAR)	5,8	3,6	17	200	C, SW		1640
ARC (Penske USA)	2,3	2,1	3,4	180	O+MG	-	320
ARC (Reynard USA)	2,3	2,1	3,4	180	O+MG	-	320
Argyll (Univ.of Glasgow)	2,65	2	3,75	270	C+MG	-	-
B.A.R Honda	2,5	2		216	O+MG	5,15	617
British Aero (Warton)	5,5	5	6,6	76	C+MG	2,32	220
British Maritime Inst.	2,75	2,13	7,31	180	C+MG	8	220
Comtec (March)	2,3	2,3	6,3	140	C+MG	-	300
Cranfield	2,4	1,8	5,2	180	C+MG	7	373
Dallara	1,7	0,9	2,75	100	C+MG	2,08	37,5
Dome (Japan)	2,75	2,5	8	216			
Ferrari	3,4	3,36	9	250	C+MG		
Flowscience (GB)	2,7	2,1	5,5	216	C+MG	5	380
Footwork	2	2	4	180	C+MG	4,6	224
Imperial College	3,05	1,52	8,5	126	C+MG	3,3	100
Jordan	2,14	2,14		200	C+MG		187
Lola (UK)	2,7	2,5	4	210	C+MG	7	650
Lotus	1,54	1,23	3	108	C+MG	3	17
McLaren	2,77	1,96	12	250	A,C+MG	7,5	1000
MIRA	2	1	6	144	C+MG	-	-
Ohio State University	3	2,1	5,2	145	C+MG	14	1490
Renault	3,5	3,5	8	250	C+MG	7	2200
Sauber	5,2	2,9		288	C+MG		3000
SIMTEK	1	1,3	2,5	133	O+MG	3,5	-
Southampton I	1,7	2,1	4,42	180	C+MG	5	150
Southampton II	3,5	2,6	9,01	180	C+MG	5,3	380
Swift	2,75	2,44	6,7	225	C+MG	5,3	373
Swiss Federal (Emmen)	2,45	1,75	3,8	200	O+MG	4,8	410



Toyota	4,3	3,5		288	SW,C+MG		
Williams I	2,7	2,7	7	250	C+MG	7	1000
Williams II	4,2	2,7		288	A+MG	5,5	2400

Vysvětlivky:

A..... testovací prostor s přizpůsobivou stěnou

C.....uzavřený testovací prostor

H..... výška

K..... poměr zúžení

L.....délka

MG....testovací prostor s pohyblivou podlahou

O..... otevřený testovací prostor

P..... hnací výkon

SW.... testovací prostor a drážkovanou stěnou

TS.....typ testovacího prostoru

$V_{\max}$maximální rychlost vzduchu

W.....šířka