



České vysoké učení
technické v Praze

Fakulta strojní
Ústav mechaniky
tekutin a
termodynamiky

Návrh difuzoru do aerodynamického tunelu

Design of a diffuser for a wind tunnel

Autor práce:

Tomáš Tesař

Vedoucí práce:

ing. Jakub Filipský

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité zdroje, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu na konci této práce.

Datum:

.....

Tomáš Tesař

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh a výroba kolektoru. Dále je tato práce zaměřena na vyřešení odchylek vzniklých interferenčními jevy v otevřeném aerodynamickém tunelu a to vytvořením programu na výpočet korekcí, které by měli do jisté míry eliminovat tyto odchylky.

Klíčová slova

Aerodynamický tunel, korekce, kolektor

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu ing. Jakubovi Filipskému za jeho odborné vedení práce, poskytnutí veškerých materiálů a za pomoc při řešení veškerých problémů. Dále bych rád poděkoval ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky za umožnění měření na aerodynamickém tunelu.

Tato práce byla podpořena projektem "Centrum 3D objemové anemometrie" - COLA, reg. no. CZ.2.16/3.1.00/21569 - Operační Program Praha Konkurenceschopnost.

Obsah

1. Seznam použitých symbolů	6
2. Úvod	8
3. Interferenční jevy	9
3.1. rozevření proudu	9
3.2. Blokace dýzy	10
3.3. vychýlení proudu	11
3.4. Blokace kolektoru	12
3.5. Tlakový spád	13
4. Použité korekce	14
4.1. Korekce odporu	14
4.2. Korekce vztlaku	15
4.3. Korekce statického tlaku na povrchu vozovky	15
4.4. Rychlost ovlivňující korekce	16
4.4.1. Korekce rozevření proudu	16
4.4.2. Korekce zablokování dýzy	16
4.4.3. Korekce zablokování kolektoru	17
5. Provedení měření a aplikování korekcí	18
6. Kritéria pro výrobu kolektoru	20
7. Výroba kolektoru	21
8. Závěr	22
9. Seznam literatury	24
10. Přílohy	
10.1 program	
10.2 výrobní výkres kolektorů	

1. Seznam použitých symbolů

$\Delta C_{pD}(x)$	korekce odporu v ziterované podelné vzdálenosti
$\Delta C_{pL}(x)$	korekce vztlaku v ziterované podelné vzdálenosti
$\Delta C_p(x)$	korekce povrchového tlaku v ziterované vzdálenosti
$C_p(x_{fb})$	statický tlak na předním nárazníku
$C_p(x)$	statický tlak v jiném místě po proudu
$C_{Dc}(x)$	zkorigovaný součinitel odporu
$C_{Lc}(x)$	zkorigovaný součinitel vztlaku
$C_{pmj}(x)$	měřený povrchový tlak modelu v itém tenzometru
$C_{pcj}(x)$	zkorigovaný povrchový tlak modelu v itém tenzometru
C_{Du}	nezkorigovaný součinitel odporu
C_{Lu}	nezkorigovaný součinitel vztlaku
q_c	zkorigovaný dynamický tlak
q_m	měřený dynamický tlak
q_n	dynamický tlak podle metody dýzy
q_m	dynamický tlak podle metody pléna
q_c	zkorigovaný dynamický tlak podle korekce zablokování dýzy
C_{Di}	součinitel odporu pro tlakové rozložení i
G_i	tlakový gradient v itém tlakovém rozložení
τ	konstanta pevného zablokování
B	dvakrát šířka tunelu
C_N	dvakrát průřez dýzy
C_C	dvakrát průřez kolektoru
F	dvakrát plocha projektované přední části

H	dvakrát výška tunelu
L_m	délka modelu
S	dvakrát plocha přední části modelu
V	dvakrát objem modelu
$R_N = \sqrt{\frac{C_N}{\pi}}$	dvakrát efektivní poloměr dýzy
$R_C = \sqrt{\frac{C_C}{\pi}}$	dvakrát efektivní poloměr kolektoru
x_C	vzdálenost kolektoru a zadní části modelu auta
x_N	vzdálenost dýzy od přední části modelu auta
x_S	vzdálenost od dýzy, kde se metody dýzy a pléna rovnají
ε_n	korekce zablokování dýzy metodou dýzy
ε_p	korekce zablokování dýzy metodou pléna
ε_c	korekce zablokování kolektoru
ε_s	korekce rozevření proudu
ρ	hustota v aerodynamickém tunelu
v_d	rychlost v oblasti dýzy
v_c	rychlost v oblasti kolektoru
v_{c2}	rychlost v oblasti změněného kolektoru
p_d	tlak v oblasti dýzy
p_c	tlak v oblasti kolektoru
p_{c2}	tlak v oblasti změněného kolektoru
A_c	průřez kolektoru
A_{c2}	průřez změněného kolektoru

2.Úvod

Chceme-li změřit aerodynamické vlastnosti automobilu, budeme toto měření provádět v aerodynamickém tunelu. Měření v aerodynamickém tunelu má svá úskalí, my se zaměříme na měření v otevřeném aerodynamickém tunelu. Tento tunel má otevřenou testovací část a problém nastává už v její velikosti, Konstrukce tunelu je kompromisem mezi velikostí (tedy mírou ovlivnění měřených veličin rozměry tunelu) a cenou. Další problém je rozdíl mezi aerodynamickým tunelem a volným prostředím. Volné prostředí nemá žádné hranice, které by limitovaly vzduch obtékající kolem automobilu, s výjimkou vozovky. Proto jsou aerodynamické tunely zatíženy dodatečnou chybou.

Nastává zde řada interferenčních jevů. Abychom tedy dostali požadovaná data se správnou hodnotou, musíme zde aplikovat řadu korekcí. Největší problém nám dělá tlakový gradient. Rozložení statického tlaku totiž není konstantní po celé délce testovací sekce. Tato skutečnost je příčinou vzniku dodatečných sil působících na model vozidla, které by se v provozu nevyskytovaly. Tlakový gradient má také za následek vznik horizontální vztlačové síly působící na model. Další nepříjemností při měření v aerodynamickém tunelu je ovlivnění úplavu automobilu konečností rozměru měřicího prostoru Aerodynamického Tunelu.

Korekcemi pro výpočet v aerodynamickém tunelu se začali zabývat v leteckém průmyslu. Tady začali brát v potaz, že proud vzduchu v aerodynamickém tunelu se chová odlišně než ve volném prostředí.

Korekce pro automobilový průmysl jsou převzaté z leteckého. Avšak tyto korekce se musely modifikovat. Modifikace musela být provedena, protože na rozdíl od letadla, které je ve volném prostředí, automobil se pohybuje po vozovce.[6]

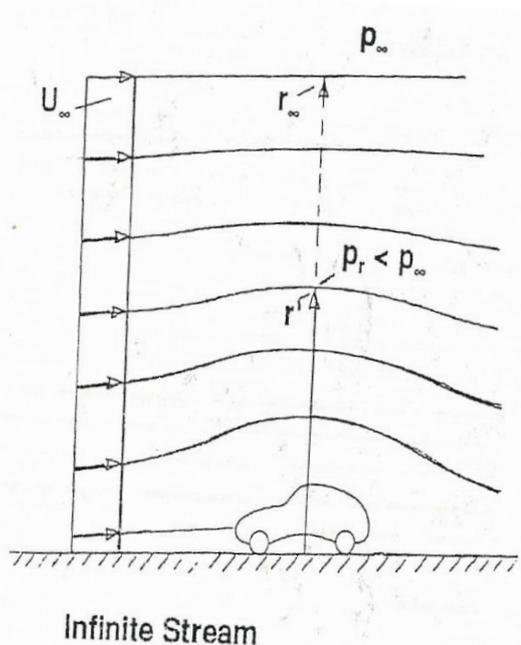
Nejvíce se korekcemi v automobilu zabývá pan Edzard Mercker, který vydal mnoho publikací a jeho přínos do tohoto odvětví je veliký. Jeho hlavní přínos je korekce horizontálního vztlaku. V této korekci bere data z ostatních důležitých korekcí a slučuje je do jedné korekce pro celkový zkorigovaný tlak. Proto má práce vycházet z těchto publikací.

3. Interferenční jevy

V aerodynamickém tunelu máme pět interferenčních jevů. Některé tyto jevy závisí na poloze modelu, který měříme a jiné vycházejí z konstrukce aerodynamického tunelu. O všech však můžeme říct, že nám negativně ovlivňují výsledky měření a testování v tunelu. Aby nám neovlivňovaly měření, musíme pro každou z nich vypočítat korekce.

3.1. rozevření proudu

Rozevření proudu nastává tehdy, pokud je model, který měříme relativně hodně vzdálen od ústí dýzy. V prostoru mezi dýzou a modelem automobilu je



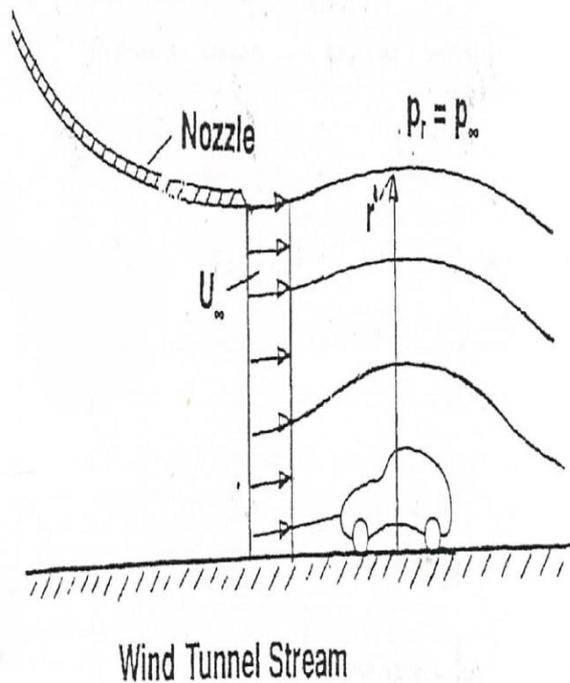
Obr. 1 Rozevření proudu v otevřeném prostoru

v tomto případě lokální rychlost menší a síly působící na model jsou menší, také volné hranice dýzy dovolují rozšíření proudnic, obtékající model, víc než by tomu bylo ve volném vzduchu. To má za následek celkovou menší rychlost nabíhajícího proudu. [1]

Obtékáný vzduch kolem modelu vozidla se v aerodynamickém tunelu chová jinak než by tomu bylo za stejné situace v otevřeném prostředí.

Jestliže máme otevřené prostředí, tak statický tlak na hranici proudnice obtékající těleso musí být konstantní a rovnat se tlaku okolí. Máme-li proud vzduchu v otevřeném prostředí pak se tlak v nekonečnu bude rovnat p_∞ , jak je tomu na **Obr. 1**. V aerodynamickém tunelu to však neplatí, protože je proud vzduchu ohraničen průřezem dýzy. Tedy tlak p_∞ se bude rovnat tlaku, který je na hranici tohoto průřezu (**Obr. 2**). Vložíme-li model do těchto prostředí, tak vzduch proudící kolem nebo-li proudnice, obtékající model, bude zakřivený. Porovnáním tlaku ve stejné

vzdálenosti od tělesa zjistíme, že tlak v otevřeném prostředí má tendenci být menší než p_∞ , kdežto v aerodynamickém tunelu se tlak v tomto místě rovná p_∞ . A to

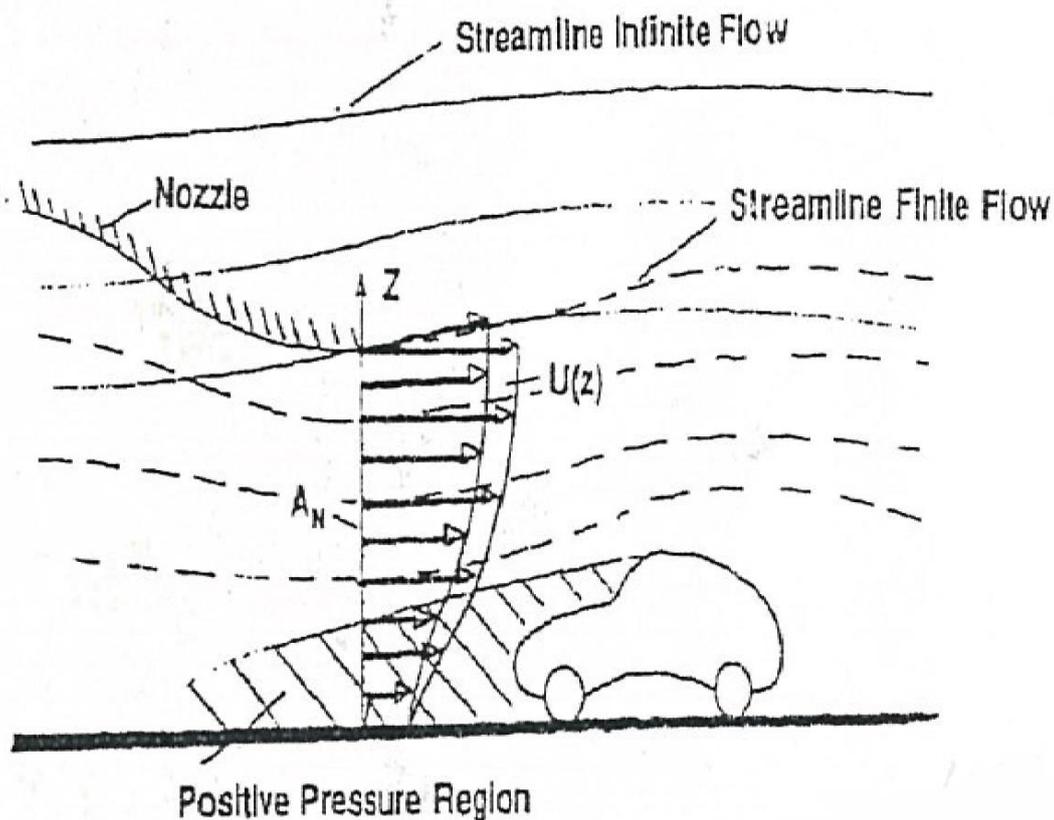


proto, že v otevřeném prostředí je p_∞ obsažen pouze v nekonečné vzdálenosti od modelu. Aby se tlaky vyrovnaly, tak tlak na hranici proudnice v aerodynamickém tunelu vzroste. V tom důsledku se proudnice více rozevře a tím vzroste plocha mezi modelem a hranicí proudu. Kontinuita poté vyžaduje, aby rychlost obtékajícího vzduchu kolem modelu byla snížena. To má za důsledek, že budeme měřit menší

Obr. 2 Rozevření proudu v aerodynamickém tunelu součinitel odporu.[2]

3.2. Blokace dýzy

Model umístěný v testovací sekci otevřeného aerodynamického tunelu má před sebou takzvanou plochu pozitivního tlakového gradientu. S pohybem vozidla se pohybuje i tato plocha pozitivního tlakového gradientu. Posuneme-li tedy model až příliš blízko ústí dýzy, začne nám tato plocha zasahovat dovnitř dýzy a nepříznivě nám ovlivňuje tok vzduchu uvnitř. Tento interferenční jev se také nazývá efekt pevného zablokování. Tento efekt způsobí, že dolní vrstva vzduchu je vychýlena směrem nahoru. To má za následek celkové zrychlení proudu vzduchu při opuštění dýzy. To znamená, že i odporové síly, které naměříme, budou odlišné.

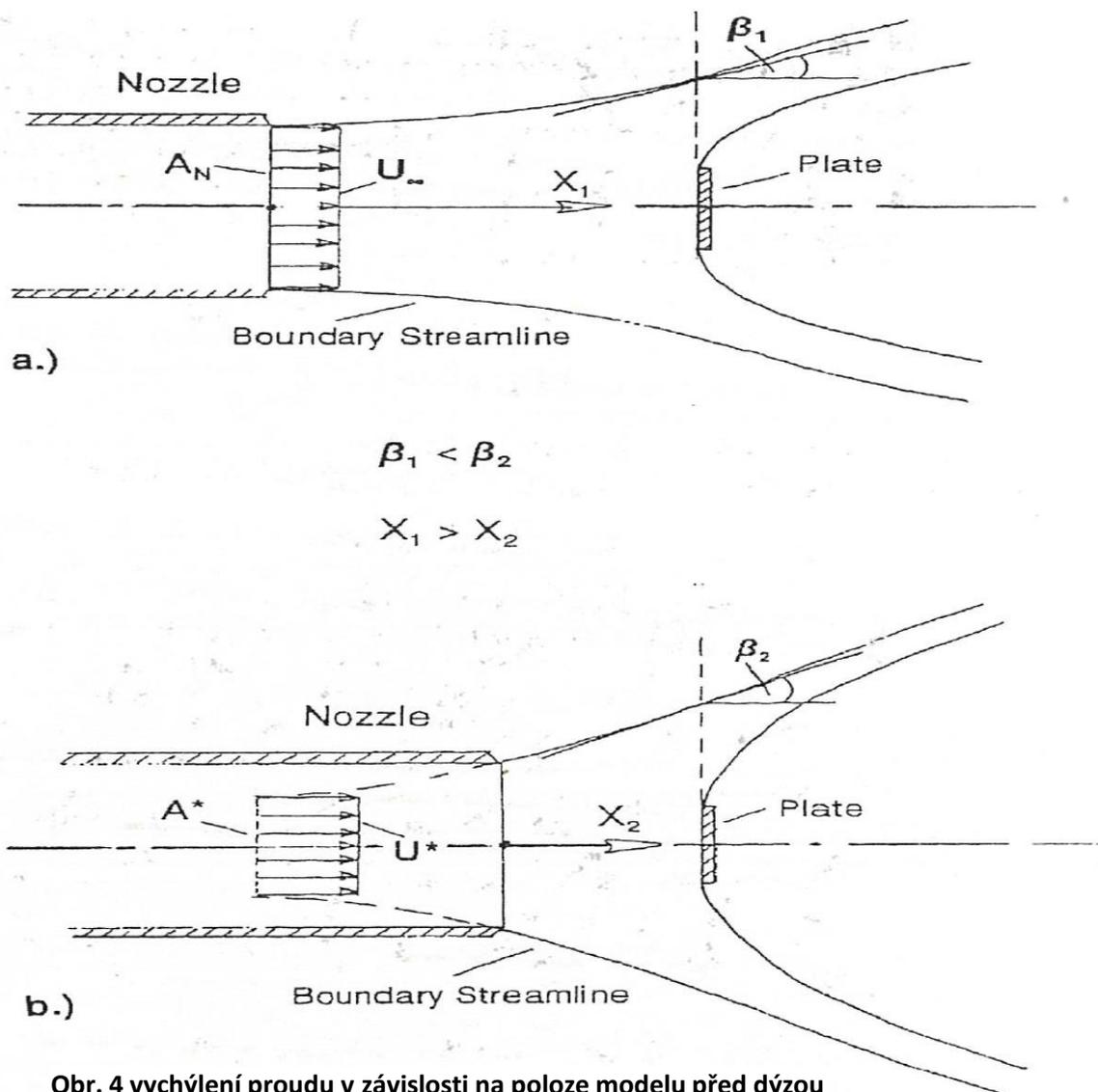


Obr. 3 Blokace dýzy v závislosti na poloze vozidla

Tento interferenční efekt se dá také popsat podle množství objemového toku. Je-li tedy model umístěn příliš blízko dýzy, aerodynamický tunel produkuje objemový tok, který je o hodně větší oproti objemovému toku, který by proudil stejným průřezem a ve stejné pozici avšak v otevřeném prostoru. To je popsáno na obrázku **Obr.3.**[2]

3.3. vychýlení proudu

Tento interferenční jev se zpravidla objevuje ruku v ruce s blokací dýzy. Nastává tehdy, postavíme-li model do malé vzdálenosti od ústí dýzy. Na **Obr.4 a)** je popsána situace, kdy postavíme model, tady zastoupen plátem, v dostatečné vzdálenosti od dýzy a tedy vliv dýzy můžeme zanedbat, nebo-li nenastává vychýlení proudu. Důležitý je zde pro nás úhel β . Je to úhel který svírá tečna hraniční proudnice vzduchu s osou dýzy. Čím více budeme posouvat model(plát) blíž k dýze, tím více se nám tento úhel bude zvětšovat. To můžeme sledovat na **Obr.4 b)**. Dojde zde k pevnému zablokování v dýze a vychýlení proudu vzduchu obtékající model.



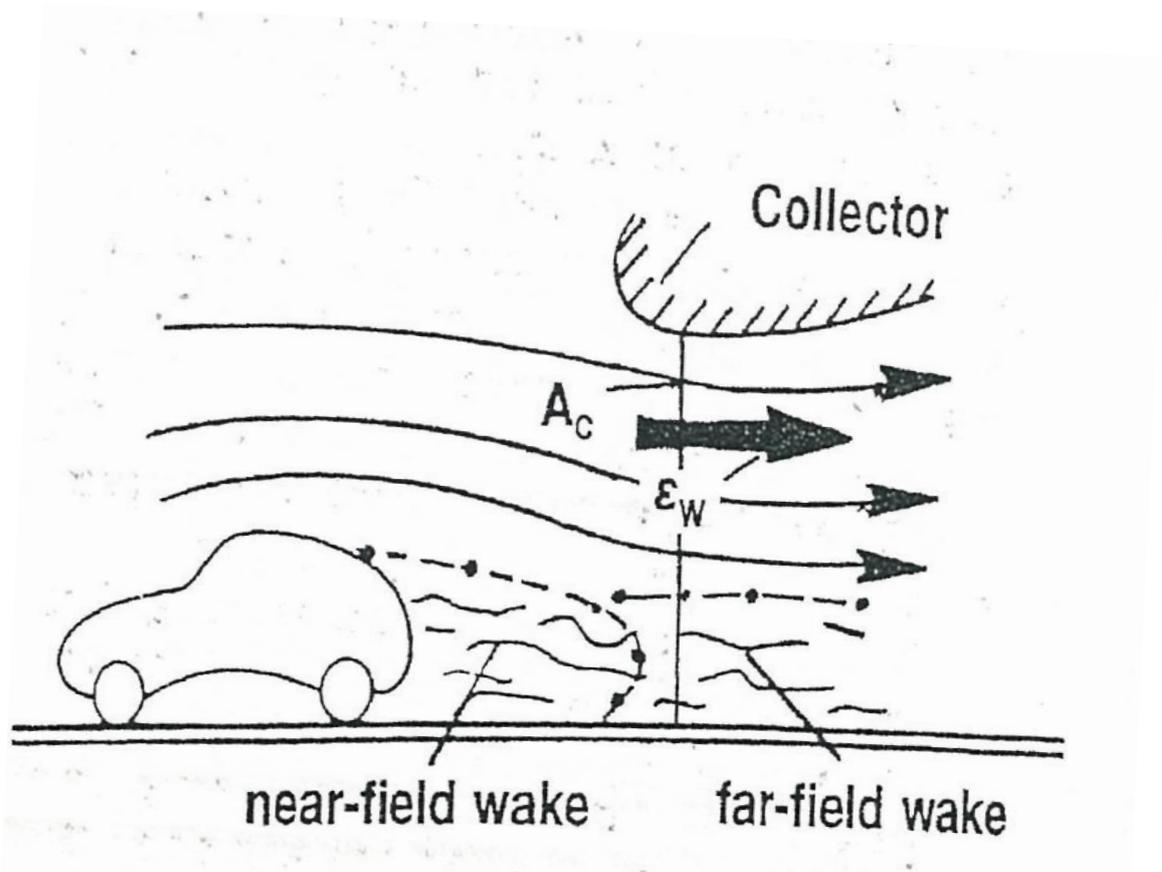
Obr. 4 vychýlení proudu v závislosti na poloze modelu před dýzou

Podle všeho tedy malá vzdálenost od ústí dýzy vede k vychýlení proudu vzduchu a tím k dodatečnému rozevření proudu vzduchu obtékající těleso. Rychlost vzduchu obtékající těleso se sníží a odporové síly, které naměříme, budou menší. [2]

3.4. Blokace kolektoru

Tento jev můžeme popsat stejně jako u blokace dýzy. Nabíhající proud vzduchu na model vozidla v otevřené testovací části aerodynamického tunelu způsobí, že za modelem vzniká takzvaný úplav. To je plocha s negativním tlakovým gradientem. Postavíme-li model příliš blízko kolektoru, bude nám zasahovat tento úplav dovnitř kolektoru. To popisujeme jako pevné zablokování. Pevné zablokování

způsobí urychlení vzduchu uvnitř kolektoru. Tuto situaci můžeme sledovat na



Obr 1 Blokace kolektoru

Obr.5.[2]

Narozdíl od interferenčního efektu na dýze musíme ještě uvažovat jeden aspekt konstrukce kolektoru. Nesprávná konstrukce stěn kolektoru může zamezit bočnímu šíření proudícího vzduchu. Tento proudící vzduch se usměrní do kolektoru a to má za následek zrychlení proudu v kolektoru, což se projeví jako zvýšení rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu na model.[1]

3.5.Tlakový spád

Statický tlak není v celé prázdné otevřené testovací zóně konstantní. Obvykle za ústí dýzy nabývá záporných hodnot a směrem po proudu vzduchu přechází do kladných čísel. Změna tlaku v okolí bubliny úplavu způsobí změnu objemu úplavu a

tudíž změnu efektivního objemu modelu. Bylo dokázáno, že výsledné kolísání tlaku ovlivňuje efektivní hodnotu objemu, která je 1.75krát větší než je skutečný objem modelu a že generuje horizontální vztlakové síly jako při táhnutí.[1]

4.Použité korekce

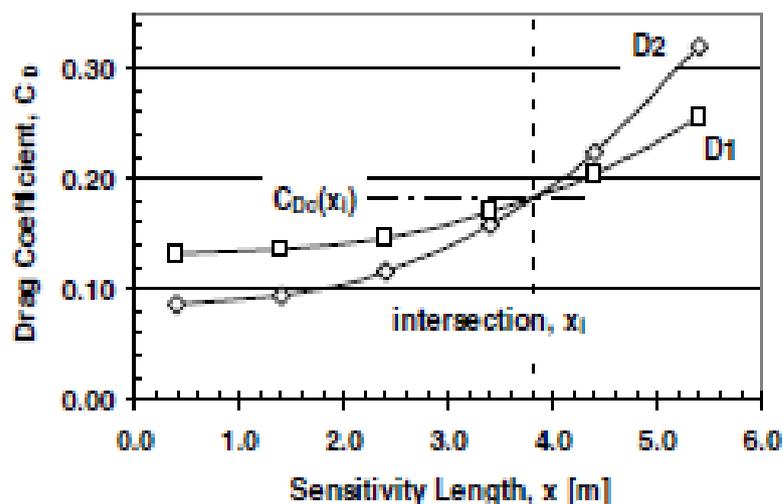
Korekce odporu, vztlaku a statického tlaku na povrchu vozovky se měří v podstatě stejnou metodou a to metodou dvojího měření. Tato metoda spočívá v tom, že změříme žádané fyzikální veličiny (silové účinky na vůz, statické tlaky na povrchu vozu) pro dva různé gradienty statického tlaku. Poté vypočítáme rozdíl mezi statickým tlakem na předním nárazníku $C_p(x_{fb})$ a statickým tlakem naměřeným v jiném místě po proudu vzduchu $C_p(x)$. Další kroky jsou rozepsány u jednotlivých korekcí.[4]

4.1Korekce odporu

Máme tedy vzorec pro korekci odporu na ziterované délce citlivosti

$\Delta C_{pD}(x) = C_p(x_{fb}) - C_p(x)$. Zkorigovaný součinitel odporu získáme

ze vzorce $C_{Dc}(x) = \frac{[C_{Du} - (\pm \Delta C_{pD}(x))]}{n}$ kde $n = \frac{q_c}{q_m}$ Je poměr zkorigovaného



Obr. 6 závislost součinitele odporu na délce testovací části

k nezkorigovanému tlaku. Znaménko, plus nebo minus, před $\Delta C_{pD}(x)$ vychází ze

vztahu $\left(\frac{\Delta C_D}{\Delta G}\right) = \left(\frac{C_{D2}-C_{D1}}{G_2-G_1}\right)$, což je podíl rozdílu součinitelů odporu z obou tlakových rozložení a rozdílu tlakových gradientů z těchto tlakových rozložení. Toto provedeme minimálně dvakrát pro dvě různé pozice. Jestliže jsou výsledky součinitelů stejné, pak jsme našli naši korekci pro součinitel odporu. Pokud ne, musíme zkusit jiné délky citlivosti úplavu. Vyhodnocením dostaneme dvě křivky. V místě, kde se tyto křivky protnou je naše místo citlivosti na úplav, to můžeme vidět na **Obr.6.** [4]

4.2 Korekce vztlaku

Jak už bylo řečeno, korekce vztlaku se od korekce odporu moc neliší. Korekci vztlaku opět začínáme vztahem $\Delta C_{pL}(\mathbf{x}) = C_p(x_{fb}) - C_p(\mathbf{x})$, Avšak tento vztah se trochu liší oproti korekci odporu. Protože pro vztlak není místo po proudu v podélné délce testovací části, ale většinou je nad modelem vozidla. Tento vztah dosadíme do vzorce pro zkorigovaný vztlak $C_{Lc}(\mathbf{x}) = \frac{[C_{Lu} - (\pm \Delta C_{pL}(\mathbf{x}))]}{n}$ kde $n = \frac{q_c}{q_m}$ a je to opět poměr zkorigovaného statického tlaku a nezkorigovaného. To, jestli bude před $\Delta C_{pL}(\mathbf{x})$ vyplyne ze vztahu $\left(\frac{\Delta C_L}{\Delta G}\right) = \left(\frac{C_{L2}-C_{L1}}{G_2-G_1}\right)$. [4]

4.3 Korekce statického tlaku na povrchu vozovky

Korekční formulí pro povrchový tlak musíme vypočítat pro každý bodový odběr tlaku. Začínáme zase stejným vzorcem, ale tentokrát ho musíme použít pro každý bodový odběr tlaku zvlášť $\Delta C_p(\mathbf{x}) = C_p(x_{fb}) - C_p(\mathbf{x})$. Poté tento vzorec dosadíme do vzorce pro zkorigovaný povrchový tlak na i-té pozici. $C_{pcj}(\mathbf{x}) = \frac{[C_{pmj} - (\pm \Delta C_p(\mathbf{x}))]}{n} + \frac{n-1}{n}$ kde $n = \frac{q_c}{q_m}$ podíl zkorigovaného k nezkorigovanému statickému tlaku. Plus nebo mínus u $\Delta C_p(\mathbf{x})$ určíme ze vztahu $\left(\frac{\Delta C_{Dp}}{\Delta G}\right) = \left(\frac{C_{p2}-C_{p1}}{G_2-G_1}\right)$ tedy podíl rozdílu povrchového tlaku v jednotlivých

bodových odběrech tlaku z obou tlakových rozložení a rozdílu tlakových gradientů z těchto tlakových rozložení.[3]

4.4 Rychlost ovlivňující korekce

4.4.1. Korekce rozevření proudu

Korekce rozevření proudu vychází z daného předpokladu, že proud vzduchu obtékající model vozidla v otevřené testovací části aerodynamického tunelu je zpomalen a to v důsledku rozevření proudu při náběhu na přední část modelu. Toto rozevření je zapříčiněno polohou modelu vůči ústí dýzy. Korekci rozevření proudu vypočítáme ze vztahu $\epsilon_s = \tau * \left(\frac{V}{L_m}\right)^{1/2} * \left(\frac{S}{C_{n*}^{3/2}}\right)$ V této rovnici $C_{n*} = C_n * (1 * \epsilon_n)$. Tato korekce je pro nás velmi důležitá, kvůli dalším výpočtům korekcí tlakového gradientu.[3]

4.4.2. Korekce zablokování dýzy

Korekce zablokování dýzy je důležitá pro odstranění vlivu interferenčního jevu zablokování dýzy, který je zapříčiněn vniknutím plochy pozitivního tlakového gradientu před modelem do dýzy. Následkem tohoto interferenčního efektu naměříme větší rychlost při opuštění dýzy. Velikost tohoto zvětšení rychlosti je různé pro metody měření dynamického tlaku a to pro metodu dýzy q_n a pléna q_p .

Mezi těmito metodami je rozdíl v tom, jaké zvolí umístění pro zkalibrovanou tlakovou ztrátu k zajištění správné hodnoty dynamického tlaku. U metody dýzy je měřen tlakový spád na dýze, zatímco u metody pléna je tato tlaková ztráta umístěna do poloviny pléna všech měření.

Pro metodu dýzy máme vztah:

$$\varepsilon_n = \frac{\left(\frac{S}{2C}\right) \left(1 - \frac{x_s}{(x_s^2 + R_N^2)^{1/2}}\right)}{\left[1 - \left(\frac{S}{2C}\right) \left(1 - \frac{x_s}{(x_s^2 + R_N^2)^{1/2}}\right)\right]} \left[\frac{R_N^3}{(x_N^2 + R_N^2)^{3/2}} \right]$$

Pro metodu pléna:

$$\varepsilon_p = \frac{\left(\frac{S}{4\pi}\right) \left(\frac{x_s}{(x_s^2 + R_N^2)^{3/2}}\right)}{\left[1 - \left(\frac{S}{4\pi}\right) \left(\frac{x_s}{(x_s^2 + R_N^2)^{3/2}}\right)\right]} \left[\frac{R_N^3}{(x_N^2 + R_N^2)^{3/2}} \right]$$

q_n a q_p se budou rovnat, pokud bude model vozidla v dostatečné vzdálenosti od ústí dýzy. V místě kde začnou nabývat různé hodnoty nám nastává interferenční jev blokace dýzy. Pro tuto polohu potřebujeme zkorigovat obě metody, aby se opět tyto dvě veličiny rovnaly. Po zkorigování a získání rovnosti dostáváme vztah pro zkorigovaný dynamický tlak.[3]

$$(1 + \varepsilon_n)^2 q_n = (1 + \varepsilon_p)^2 q_p = q_0$$

4.4.3. Korekce zablokování kolektoru

Korekce zablokování kolektoru vychází z interferenčního efektu blokace kolektoru. Tento jev má za následek zrychlení vzduchu vstupujícího do kolektoru. Toto zrychlení je zapříčiněno úplavem za modelem, který je umístěn příliš blízko kolektoru a tím se část úplavu dostane dovnitř kolektoru a způsobí takzvané pevné zablokování v dolní části kolektoru.

Korekční vzorec pro tento interferenční jev je:

$$\varepsilon_c = \left[\frac{C_{Du}}{4} \left(\frac{S}{C_c}\right) + 0.41 \left(\frac{F}{C_c}\right) \right] \left[\frac{R_c^3}{[x_c^2 + R_c^2]^{3/2}} \right]$$

První část této rovnice je korekcí pro rychlost urychlenou v kolektoru, druhá část je zaměřená na ovlivnění interferenčního jevu vzdáleností modelu od kolektoru.[3]

5. Provedení měření a aplikování korekcí

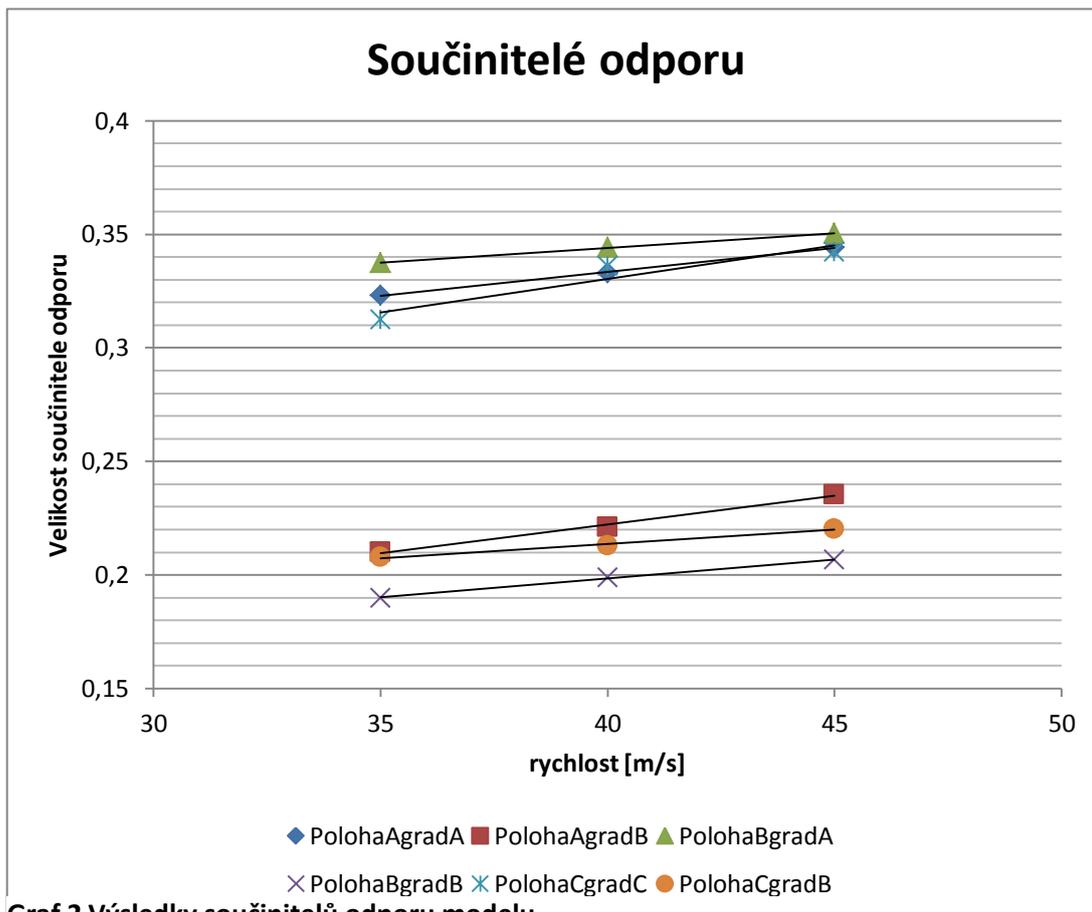
Naše měření provádíme za účelem ověření korekcí pro aerodynamický tunel. Pro toto měření jsme zvolili model automobilu a váhu pro měření z bakalářské práce pana Matase.

Na realizaci našeho měření jsme použili metodu dvojího měření. Tato metoda se skládá z dvou měření rozložení tlaku. Provedli jsme první měření s modelem připevněným v testovací části bez žádného dalšího tělesa v aerodynamickém tunelu a získali jsme tak první tlakový gradient. V druhém měření jsme změnili rozložení tlaku v tunelu. Existuje více variant, jak provést změnu rozložení tlaku v aerodynamickém tunelu. Buď změněním geometrie kolektoru, což se dá provést například nastavitelnými klapkami nebo jako v našem případě přidáním blokovacího elementu dovnitř kolektoru. Další způsob změnění tlakového rozložení je posun modelu do jiné polohy v ose tunelu. Tuto skutečnost jsme také vyzkoušeli. Tímto jsme získali druhý tlakový gradient.

Zároveň s měřením dvou rozdílných tlakových gradientů jsme provedli šest měření. Zvolili jsme tři polohy modelu v testovací části aerodynamického tunelu. Jednu co nejbližší dýze, druhou co nejbližší kolektoru a třetí polohu uprostřed. V těchto polohách jsme provedli tři měření pro tři rychlosti 35,40 a 45 [m/s] a to pro oba tlakové gradient.

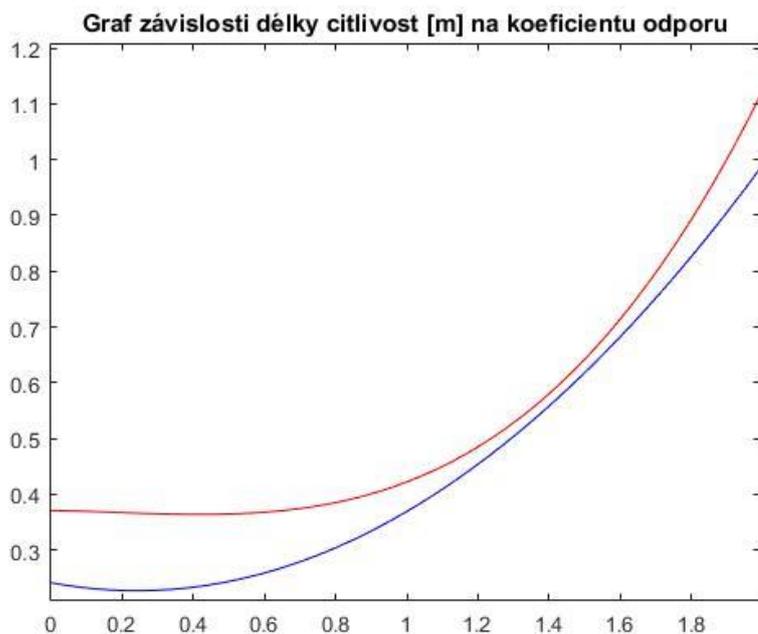
Z těchto měření jsme dostali velikosti odporových sil a z těch následně součinitele odporu z rovnice $F = \frac{1}{2} \rho v^2 c$.

Dalším krokem byl výpočet korekcí. Jako cíl jsme si zvolili dopočítat se zkorigovaného součinitele odporu modelu vozidla. Sestavili jsme rovnice v programu MATLAB a dosadili všechny proměnné. Námi naměřené hodnoty pro součinitel odporu můžeme vidět na **grafu 1**.



Graf 2 Výsledky součinitelů odporu modelu

Jako příklad jsme zkorigovali součinitel odporu pro rychlost 40 m/s v poloze co nejbliže kolektoru. Na **grafu 2** můžeme vidět výpočet korekce pro rychlost 40 m/s. Vidíme, že se křivky neprotnou ani v jednom bodě, což je požadováno.



Graf 1 : výsledek korekce součinitele odporu z programu MATLAB

Výsledky měření jsou diskutovány v závěru.

6. Kritéria pro výrobu kolektoru

Výrobu kolektoru provádíme za účelem snížení statického tlaku v oblasti kolektoru tak, aby statický tlak v celé testovací části byl konstantní. Vycházíme tedy z Bernoulliho rovnice zákona zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. $\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho u(x) = k$. Dále vycházíme z rovnice kontinuity

pro ustálené proudění kapaliny $A_1 v_1 = A_2 v_2$. Vezmeme Bernoulliho rovnici a dosadíme do ní naše veličiny z obou konců testovací části, z dýzy a kolektoru

$$\frac{1}{2}\rho v_d^2 + p_d = \frac{1}{2}\rho v_c^2 + p_c$$

. Tato rovnice nám udává, že množství mechanické energie v oblasti dýzy se rovná množství mechanické energie v oblasti kolektoru.

Pro námi upravený kolektor bude vypadat rovnice následovně

$$\frac{1}{2}\rho v_d^2 + p_d = \frac{1}{2}\rho v_c^2 + p_c = \frac{1}{2}\rho v_{c2}^2 + p_{c2}$$

. Nyní nás zajímá jen změna veličin se změnou kolektoru $\frac{1}{2}\rho v_c^2 + p_c = \frac{1}{2}\rho v_{c2}^2$. Pro další výpočet jsme zvolili, že

námi požadovaný tlak v oblasti kolektoru p_{c2} bude nulový a tedy rovnice nabývá

$$\text{tvaru } \left(\frac{v_{c2}}{v_c}\right)^2 = \frac{p_c}{\frac{1}{2}\rho v_c^2}$$

. Vztah na pravé straně naší rovnice, je rovnice pro c_{pc} a tedy $c_{pc} = \frac{p_c}{\frac{1}{2}\rho v_c^2}$. Výsledná rovnice, kterou získáme z Bernoulliho rovnice tedy je

$$\left(\frac{v_{c2}}{v_c}\right)^2 = 1 + c_{pc}$$

Nyní vezmeme rovnici kontinuity a dosadíme do ní hodnoty

pro oba kolektory $A_c v_c = A_{c2} v_{c2}$, z této rovnice získáme vztah mezi rychlostmi a plochami průřezů daných kolektorů $\frac{v_{c2}}{v_c} = \frac{A_c}{A_{c2}}$. Tento vztah poté dosadíme do

Bernoulliho rovnice $\left(\frac{A_c}{A_{c2}}\right)^2 = 1 + c_{pc}$. Nyní jsme zjistili o kolik se musí zmenšit

průřez dýzy, aby byl tlak na kolektoru nulový. $A_{c2} = \frac{A_c}{\sqrt{1+c_{pc}}}$.

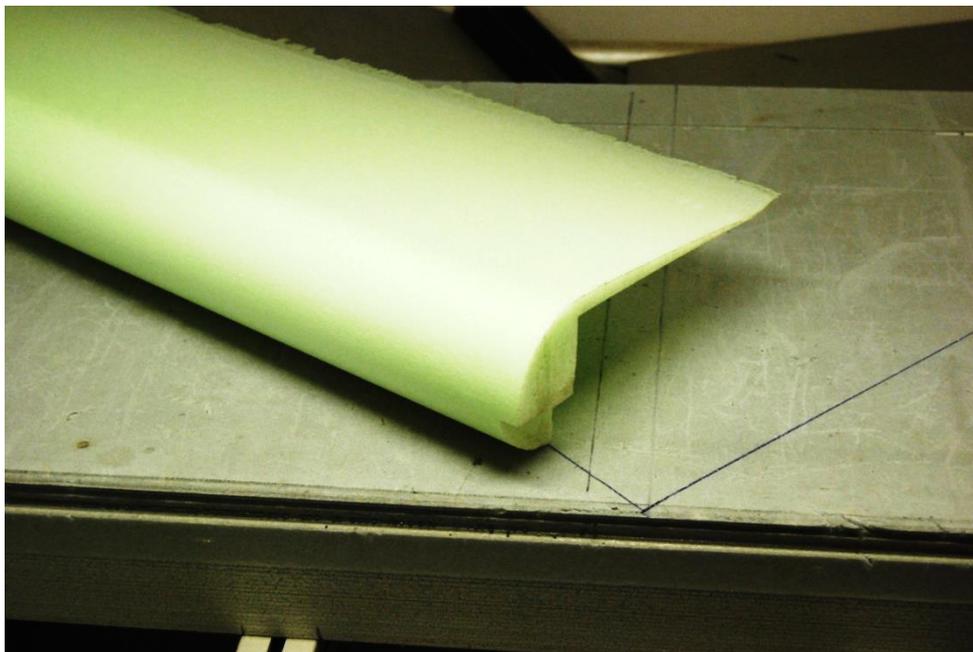
Dalším kritériem pro výrobu kolektoru je, že steny musí svírat s osou kolektoru úhel 3.5° . To musíme dodržet proto, aby difuze měla optimální rychlost a nedocházelo k velikým ztrátám na stěnách nového kolektoru.[7]

7.Výroba kolektoru

Kolektor jsme vyrobili z polystyrenu podle našich kritérií. Jelikož strop aerodynamického tunelu je zkosen pod jiným úhlem než bočnice, museli jsme vyrobit dva odlišné rozměry kolektoru, aby výsledný vrcholový úhel splňoval naše kritéria. Na obrázku 7 můžeme vidět kolektoru pro bočnice a na obrázku 8 pro strop tunelu.



Obrázek 1 kolektor pro strop tunelu



Obrázek 2 kolektor pro bočnice

8.Závěr

Přestože náš korekční program fungoval správně, nedokázali jsme dostat hodnotu zkorigovaného součinitele odporu. Příčin mohlo být více, měření v aerodynamickém tunelu je náročné na přesnost výsledků. Této přesnosti se nám nepodařilo dosáhnout a z toho důvodu nám nemusela vyjít celková korekce pro součinitel odporu. Nicméně Chyba mohla také nastat při jiných dílčích krocích. Na vině mohlo být například špatně změřené rozložení tlaku. Zpřesnění výsledků jsme také mohli dosáhnout výpočtem korekce pro blokaci dýzy i druhým způsobem a to metodou pléna z článku [4], také není patrné, proč autor použil dva vzorce pro čelní plochu k výpočtům korekcí z článku tohoto článku.

Po realizaci kritéria na výrobu kolektoru, se průřez kolektoru zmenší o 3%. Očekáváme změnu rozložení statického tlaku v měřicím prostoru tak, že bude výrazně vyrovnanější. Poté bude možné při korigování měřených silových účinků korekci na horizontální vztlak (korekci odporu) úplně vypustit.

Cílem této bakalářské práce bylo vyrobit kolektor. Pro zjištění kritérií na výrobu kolektoru jsem se pokusil použít tu nejsofistikovanější metodu, která je k dispozici. A to metodu korekcí interferenčních jevů. Bohužel i přes správnost a funkčnost programu, jsem z naměřených veličin nedostal zkorigovaný výsledek.

Použil jsem proto druhou metodu a věřím, že zkonstruovaný kolektor splňuje všechny podmínky, které jsme požadovali.

9. Seznam literatury

- [1] HUCHO, W-H.: Aerodynamics of Road Vehicles, ISBN 0-7680-0029-7
- [2] MERCKER, E.: On the Correction of Interference Effects in Open Jet Wind Tunnels, 1996
- [3] MERCKER, E.: The Influence of a Horizontal Pressure Distribution on Aerodynamic Drag in Open and Closed Wind Tunnels, 2005
- [4] MERCKER, E.: A Two-Measurement Correction for Effects of a Pressure Gradient on automotive, Open-Jet, Wind Tunnel Measurements, 2006
- [5] Matas, J.: Engineering design of precision aerodynamic balance, Praha, 2016, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze
- [6] BARLOW, Jewel B., William H. RAE a Alan POPE. Low-speed wind tunnel testing. 3rd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 0471557749.
- [7] DIXON, S. L. Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1998. Thermodynamics and fluid mechanics series.