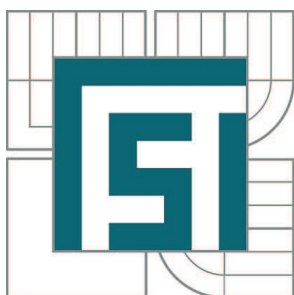


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

KONSTRUKCE UCHYCENÍ CHLADIČE DO MĚŘICÍ SEKCE

DESIGN OF INSTALLATION RADIATOR INTO THE TEST SECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID VANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ LAJZA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Vaněk

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:

Konstrukce uchycení chladiče do měřicí sekce

v anglickém jazyce:

Design of installation radiator into the test section

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na uchycení chladiče do měřicí sekce je kladeno velké množství požadavků. Zásadní požadavky jsou, aby vlastní uchycení neovlivňovalo měření sil, měřicí sekce byla dokonale utěsněna v oblasti uchycení chladiče.

Student bude muset velmi úzce spolupracovat se studentem mající diplomovou práci na téma: Návrh zařízení pro měření aerodynamických sil a momentů v aerodynamickém tunelu.

Cíle bakalářské práce:

Student provede detailní konstrukční návrh uchycení chladiče do měřicí sekce, vhodně nadimenzuje konstrukci, provede odhad finanční náročnosti tohoto návrhu.

Seznam odborné literatury:

Svoboda, Brandejs, Dvořáček: Základy konstruování, Brno 2013, ISBN: 978-80-7204-839-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Lajza

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 15.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést detailní konstrukční návrh uchycení chladiče do měřicí sekce, vhodně nadimenzovat konstrukci. Na závěr provést finanční odhad zástavby chladiče.

Klíčová slova

Chladič, měřicí sekce, finanční odhad, nadimenzovat

Abstract

The purpose of this Bachelor thesis is design of installation radiator into test section and appropriate dimensioning of the construction. In conclusion, to perform a financial analysis of the installation radiator.

Keywords

Radiator, test section, financial analysis, dimensioning

Bibliografická citace

VANĚK, D. *Konstrukce uchycení chladiče do měřicí sekce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Lajza.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně 28. 5. 2014

.....

Poděkování

Děkuji panu Ing. Ondřeji Lajzovi za vedení bakalářské a Bc. Petru Brožkovi za spolupráci na projektu.

Obsah

Úvod	3
1 Aerodynamický tunel:	4
2 Vstupní parametry	5
2.1 Měřicí sekce	5
2.2 Chladič	6
2.3 Pitot-statická sonda	7
2.4 Volba softwaru	8
3 Požadavky na konstrukci uchycení chladiče	9
4 Návrh variant	10
Varianta č. 1	10
Varianta č. 2	11
Varianta č. 3	12
Výběr varianty	12
5 Konstrukční řešení vybrané varianty	13
5.1 Utěsnění chladiče	13
5.2 Připevnění krytu ke chladiči	14
Varianta upnutí přední masky	14
Varianta upínek k přitlačení masek na chladič	15
Varianta upínek ve tvaru mostů	16
Finální upnutí krytů	17
5.3 Konstrukční řešení měřicí sekce	18
6 Návrh konfuzoru	19
6.1 Výpočet délky konfuzoru	21
6.1.1 Výpočet optimální délky konfuzoru	21
6.1.2 Výpočet skutečné délky	21
6.2 Výpočet rychlosti na konci konfuzoru	22
6.3 Výpočet tlakových ztrát v konfuzoru	23
6.4 Výpočet statického tlaku na konci konfuzoru	24
6.5 Výpočet působící síly na konfuzor v axiálním směru	25
6.6 Pevnostní výpočet konfuzoru	26
7 Výpočet měřicí sekce	29
7.1 Výpočet rychlosti za chladičem	29
7.2 Výpočet tlakových ztrát v měřicí sekci	30
7.3 Výpočet statického tlaku za chladičem	31
7.4 Pevnostní výpočet zadní masky chladiče	31
7.5 Pevnostní výpočet části obsahující drážku pro Pitot-statickou sondu za chladičem	33
7.6 Pevnostní výpočet části obsahující drážku pro Pitot-statickou sondu před chladičem	34
8 Návrh difuzoru	35
8.1 Výpočet difuzoru délky difuzoru	36
8.2 Tlakové ztráty v difuzoru	37
8.3 Statický tlak na konci difuzoru	38

8.4	Pevnostní výpočet minimální tloušťky plechu difuzoru	38
9	Průběh rychlostí a tlaků po délce tunelu	40
10	Utěsnění pohyblivé Pitot-statické sondy	41
11	Upnutí tunelu do měřicí sekce	42
11.1	Upnutí konfuzoru	42
11.2	Upnutí difuzoru	43
11.3	Spojení konfuzoru a difuzoru s částmi obsahující drážku pro sondu.....	43
11.4	Návrh uchycení nepohyblivých konců tunelu k měřicí sekci	44
12	Finanční odhad:	45
Závěr:		46
Seznam použitých zdrojů		47
Seznam použitých symbolů		49
Přílohy		52

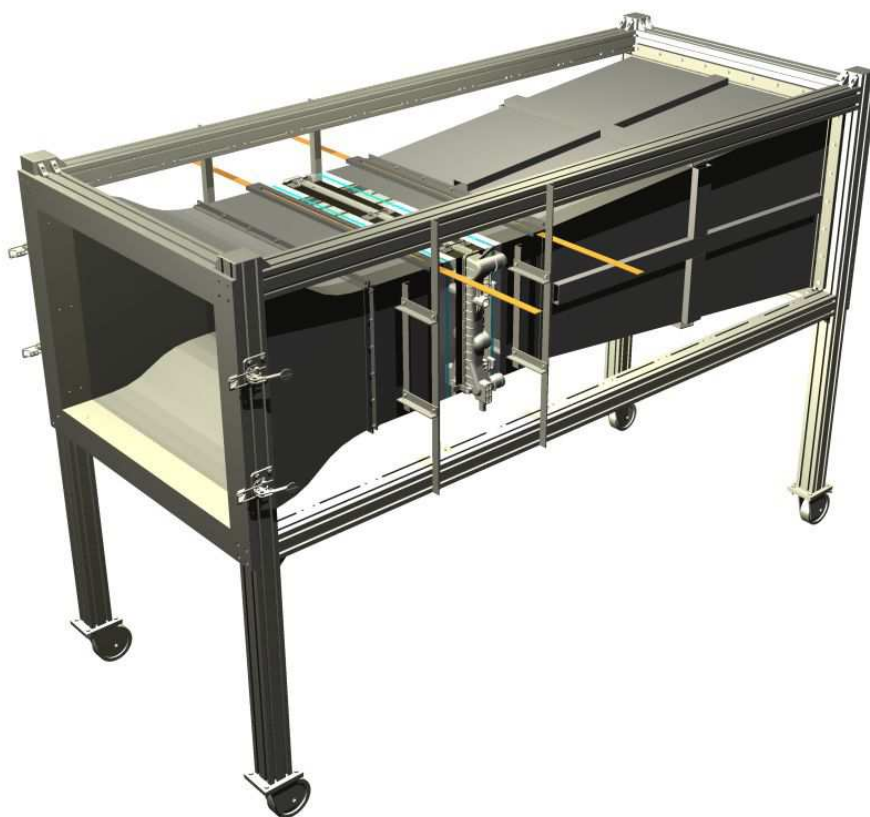
Úvod

Tato bakalářská práce je částí projektu, který se bude v nejbližší době realizovat na Leteckém Ústavu VUT v Brně. Tento návrh konstrukce je v současné době jediným možným návrhem, o který se může uskutečněná výroba opírat.

Hlavním cílem této práce, je detailní návrh konstrukce uchycení chladiče do měřicí sekce, která je částí aerodynamického tunelu. Zásadními požadavky bylo, aby samotná konstrukce dovozovala posuv chladiče v axiálním směru, neovlivňovala měření sil a byla dokonale utěsněna v oblasti uchycení chladiče.

Dále je potřeba navést tok vzduchu na chladič a vhodně navrhnout výstup toku vzduchu od chladiče a celou konstrukci nadimenzovat.

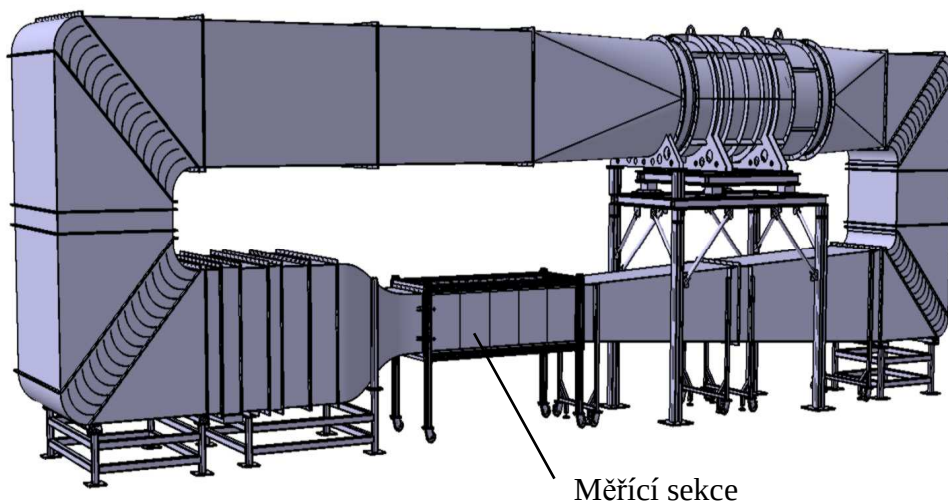
Na závěr provést finanční odhad zástavby chladiče. Výsledkem tohoto projektu bude možné měřit síly a momenty působící na chladič.



Obr. 1 Celková sestava

1 Aerodynamický tunel:

Aerodynamický tunel je zařízení, které umožňuje studovat obtékání objektů a vyhodnocuje působící síly, které na ně působí. Od prvního dne byly aerodynamické tunely používány k ověřování aerodynamických teorií a usnadňování návrhů letadel. Nyní se výzkum aerodynamiky rozšiřuje i do jiných oborů jako jsou např.: automobilový průmysl, architektura, životní prostředí, atd. [1].



Obr. 2 Aerodynamický tunel na leteckém ústavu VUT v Brně [2]

Vzhledem k rostoucímu zájmu průmyslu a vědy, jsou aerodynamické tunely nezbytné a nenahraditelné během vývoje nových součástí [1].

Charakteristikou aerodynamických tunelů je kvalita a kvantita toku vzduchu v měřicí sekci, celkový výkon a rozměry měřicí sekce. Tři hlavní kritéria, která se všeobecně používají pro definování aerodynamických tunelů jsou:

- maximální dosažitelná rychlost
- rovnoměrný průtok
- úroveň turbulence

2 Vstupní parametry

2.1 Měřicí sekce

Měřicí sekce je část aerodynamického tunelu viz obr. (2). Základní rozměry byly získány z 3D modelu. Na obr. (3) můžeme vidět fotografii měřicí sekce pořízené přímo na leteckém ústavu VUT v Brně. Tlak uvnitř měřicí sekce je uvažován atmosferický.



Obr. 3 Fotografie měřicí sekce

Tab. 2.1: Parametry měřicí sekce	
délka [mm]	2000
šířka [mm]	700
výška [mm]	500
maximální rychlost toku vzduchu [m/s]	60

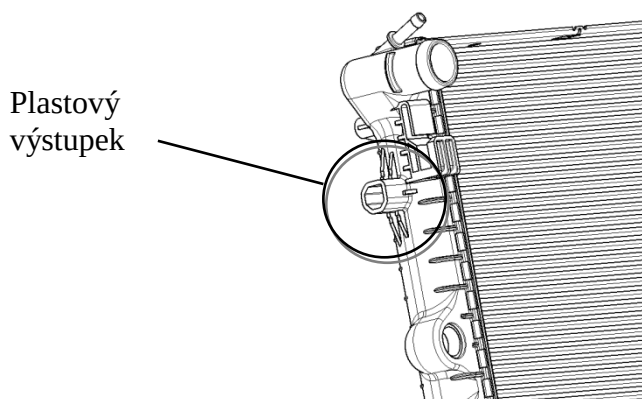
2.2 Chladič

Základní parametry chladiče změřil Bc. Petr Brožek, a také vymodeloval 3D model chladiče v softwaru CATIA. Na obr. (4) lze vidět boční plastové komory, na kterých jsou umístěny čtyři výstupky pro uchycení chladiče.



Obr. 4 Testovaný chladič

Vyčnívající plastové výstupky budou sloužit k uchycení chladiče v tenzometrických tyčích, detail výstupku můžeme vidět na obr. (5).



Obr. 5 Detail výstupku

Tab 2.2: Parametry testovaného chladiče	
Označení testovaného chladiče: 6RO 121 253A	
Délka činné plochy [mm]	648
Výška činné plochy [mm]	330
Činná plocha [mm ²]	213 840
Tloušťka [mm]	25

2.3 Pitot-statická sonda

Pitot-statická trubice, respektive Prandtlova, je dynamická rychlostní sonda, která měří celkový a statický tlak. Je uchycena v travézě obr. (8), který umožňuje pohyb sondy ve vertikální a horizontálním směru, tak abychom mohli měřit hodnoty v celém průřezu před a za chladičem. Z naměřených tlaků je možné vypočítat tlak dynamický, dle rovnice (3.1). Fotografii sondy můžeme vidět na obr. (6).

$$p_s + p_d = p_c \quad (3.1)$$

Dynamický tlak je roven:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_s^2 \quad (3.2)$$

kde:

ρ ... hustota [kg/m^3]

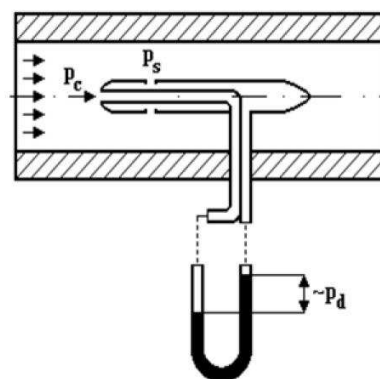
w_s ... rychlost toku vzduchu [m/s]

Matematickou úpravou rovnice (3.2), je možné vypočítat rychlost toku vzduchu, dle rovnice (3.3).

$$w_s = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad (3.3)$$



Obr. 6 Fotografie Pitot-statické sondy

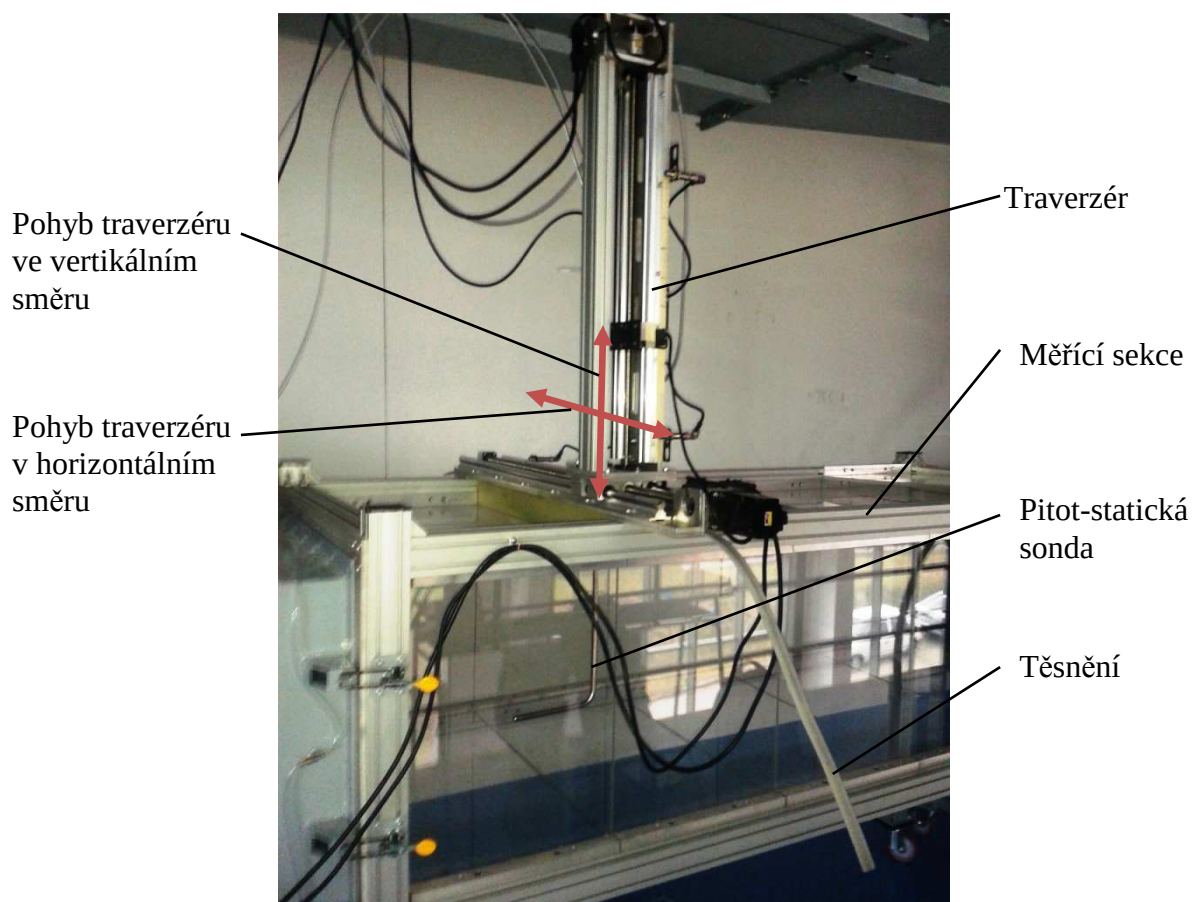


Obr. 7 Schéma Pitot-statické trubice [3]

Základní rozměry Pitot-statické sondy, byly odměřeny přímo u měřicí sekce.

Tabulka 2.3: Parametry Pitot-statické sondy	
Průměr sondy [mm]	12
Délka sondy [mm]	160

Na obr. (8) můžeme vidět nainstalovaný traverzér. Zatím pouze jeden, postupem času má být k dispozici i druhý traverzér.



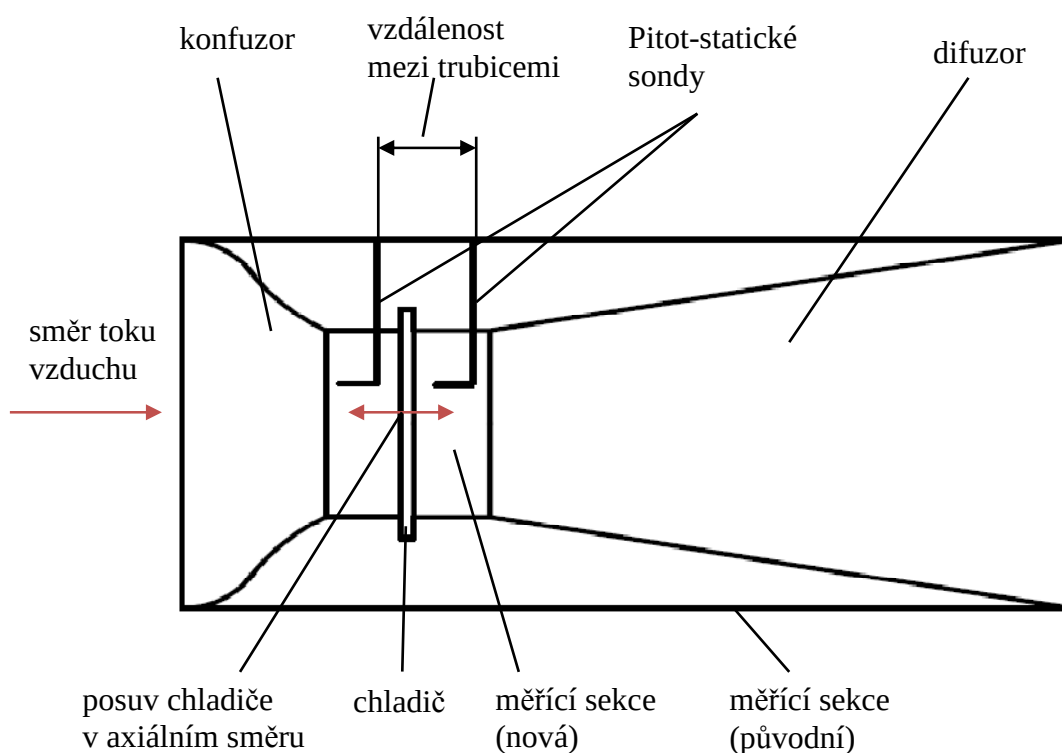
Obr. 8 Fotografie traverzéro

2.4 Volba softwaru

Požadavkem, ve kterém měla být sestava vymodelována, byl software CATIA. Kvůli nedostačující znalosti tohoto programu, jsem k modelování konstrukčních částí zvolil takový software, se kterým mám zkušenosti. Model sestavy a jednotlivé dílčí komponenty, byly vymodelovány v programu pro 3D modelování Inventor Autodesk 2008.

3 Požadavky na konstrukci uchycení chladiče

- konstrukce uchycení chladiče musí dovolit posuv v axiálním směru
- konstrukce nesmí znehodnocovat naměřená data
- poloha, ve které se bude nacházet chladič, je závislá na délce difuzoru
- Pitot– statické sondy musí měřit tlakové rozložení v konstantním průřezu tunelu, je nutné se vyvarovat tomu, aby sonda nezaznamenávala data v konfuzoru
- celá konstrukce musí být dokonale utěsněna
- abychom mohli vložit přídatný rám mezi Pitot-statické trubice, musí být minimální vzdálenost mezi trubicemi 190 mm



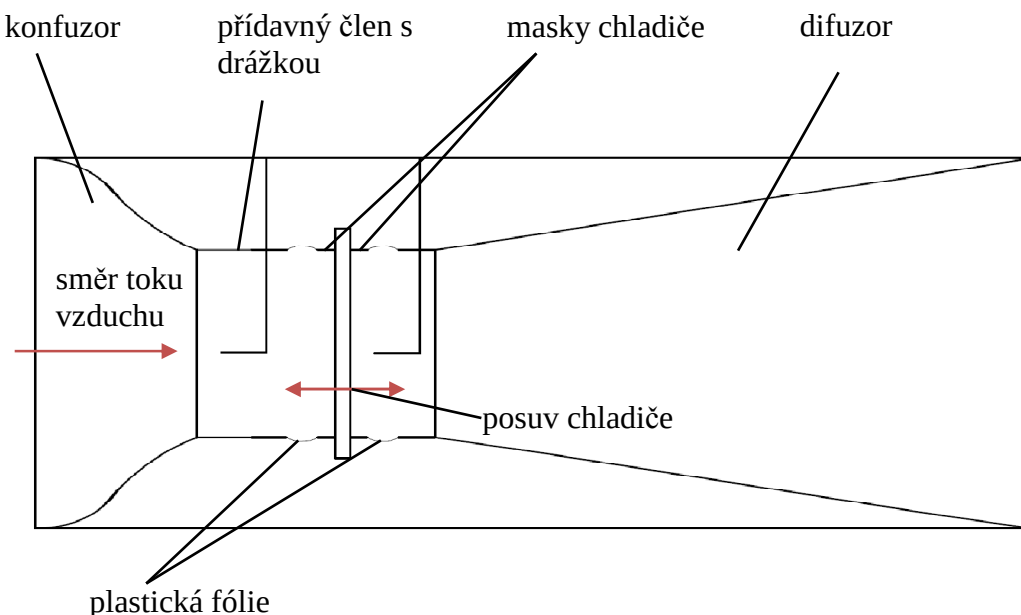
Obr. 9 Náčrt sestavy

4 Návrh variant

Z několika možných variant byly vybrány tři, které nejlépe splňují zadané požadavky. Navrhnuté varianty se liší pouze v oblasti uchycení chladiče.

Varianta č. 1

Dovolením posuvu chladiče u této varianty, lze realizovat při použití poddajné plastické fólie. Jeden konec fólie se navleče na masky chladiče, které budou pevně spojeny s chladičem. Druhý konec fólie se navleče na nepohyblivé části, které budou spojeny s původní měřicí sekci. Podmínkou je, aby byl zvolený materiál fólie vzduchotěsný. Při použití poddajné plastické fólie se pokryjí možné vzniklé délkové nepřesnosti týkající se výroby dílčích částí (konfuzoru, difuzoru, přídatného člene s drážkou pro Pitot-statickou trubici).



Obr. 10 Schéma varianty č. 1

Výhody

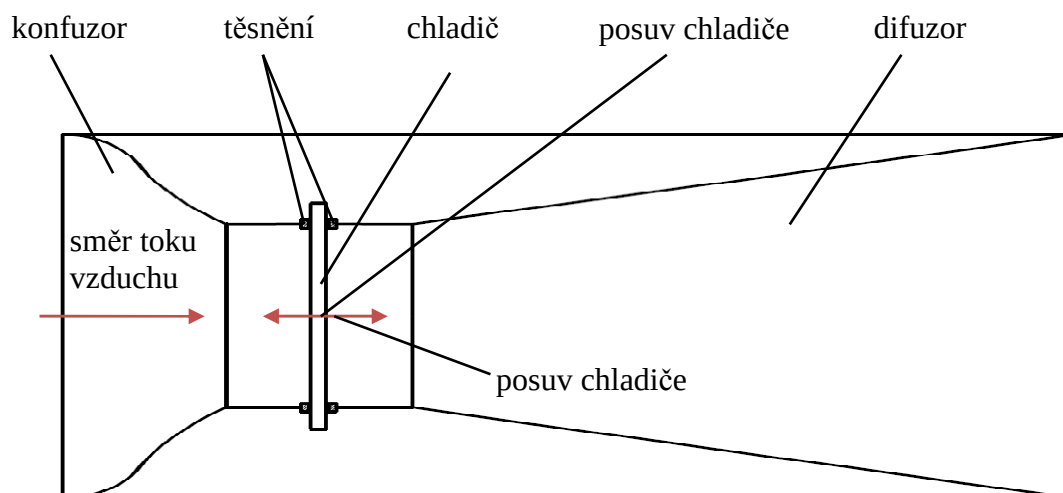
- plastická fólie pokryje délkové nepřesnosti dílčích částí
- nízká cena
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody

- nafouknutí fólie může způsobit nerovnoměrnost toku vzduchu v těsné blízkosti stěn a tím znehodnotit naměřená data
- složitá instalace

Varianta č. 2

Posuv chladiče v axiálním směru se u druhé varianty dovolí deformací těsnění, které se umístí mezi chladič a statické části. Přídavné členy s drážkami pro sondu se napevno spojí s konfuzorem a difuzorem k měřicí sekci tak, jako u předchozí varianty. U této varianty se neví, do jaké míry bude deformace těsnění ovlivňovat naměřená data. Kvůli zabránění obtékání toku vzduchu kolem chladiče, musí být těsnění namáčknuto na chladič, což bude podstatně omezovat pohyb chladiče v axiálním směru.



Obr. 11 Schéma varianty č. 2

Výhody

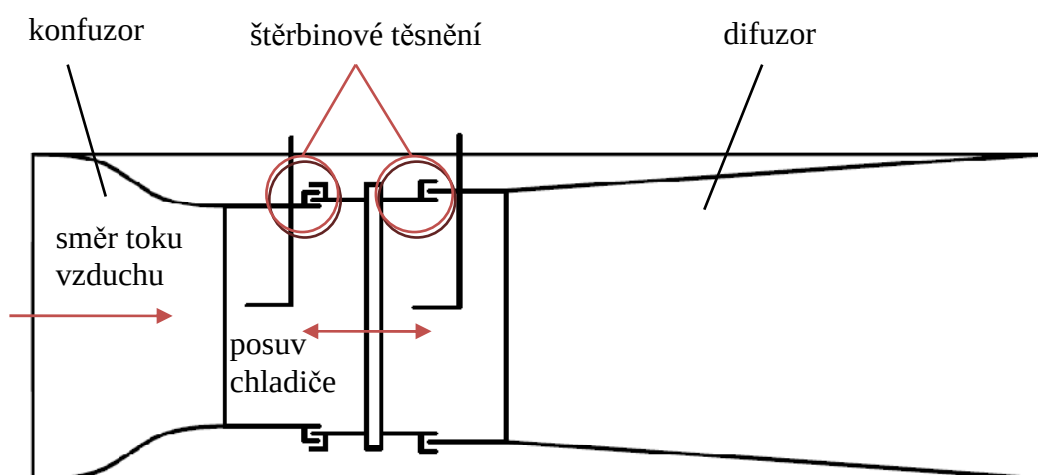
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody

- nízká účinnost těsnění
- ovlivnění měření
- vysoká cena (jednotlivé komponenty musí být vyrobeny přesně)

Varianta č. 3

U této varianty lze posuv chladiče v axiálním směru realizovat vhodným natvarováním ploch. V podstatě vytvoření štěrbinového těsnění. Ke chladiči se z obou stran uchytí napevno masky, které utěsní chladič po obvodu jeho činné plochy. Konfuzor, difuzor a členy obsahující drážku pro sondu, zůstanou nepohyblivé, tak jako u předchozích variant. Tato varianta nejméně ovlivňuje naměřená data, protože tok vzduchu v blízkosti stěn bude poměrně hladký a štěrbinové těsnění zajistí naprosto neovlivnění posuv chladiče. Velkou nevýhodou je výrobní přesnost jednotlivých částí, což se projeví na výsledné ceně.



Obr. 12 Schéma varianty č. 3

Výhody

- minimální ovlivnění měření
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody

- vysoké nároky na přesnost výroby >> vysoká cena
- složitá montáž a demontáž

Výběr varianty

Výběrem nejvhodnější varianty, byla zvolena variantal č. 1. Hlavním důvodem tohoto výběru byla její jednoduchost a nízká cena. V tabulce 4.1 lze vidět přehled jednotlivých variant.

Tab. 4.1: Finální zhodnocení variant				
	cena	ovlivnění měření	konstrukce	montáž, demontáž
varianta č. 1	nízká	střední	jednoduchá	složitá
varianta č. 2	nízká	velké	jednoduchá	jednoduchá
varianta č. 3	vysoká	nízké	jednoduchá	složitá

5 Konstrukční řešení vybrané varianty

Tato kapitola se bude věnovat realizaci varianty č. 1. Nejdříve bude proveden detailní návrh utěsnění a jeho uchycení ke chladiči. Následně se navrhne konstrukčního řešení, které dovolí posuv chladiče v axiálním směru.

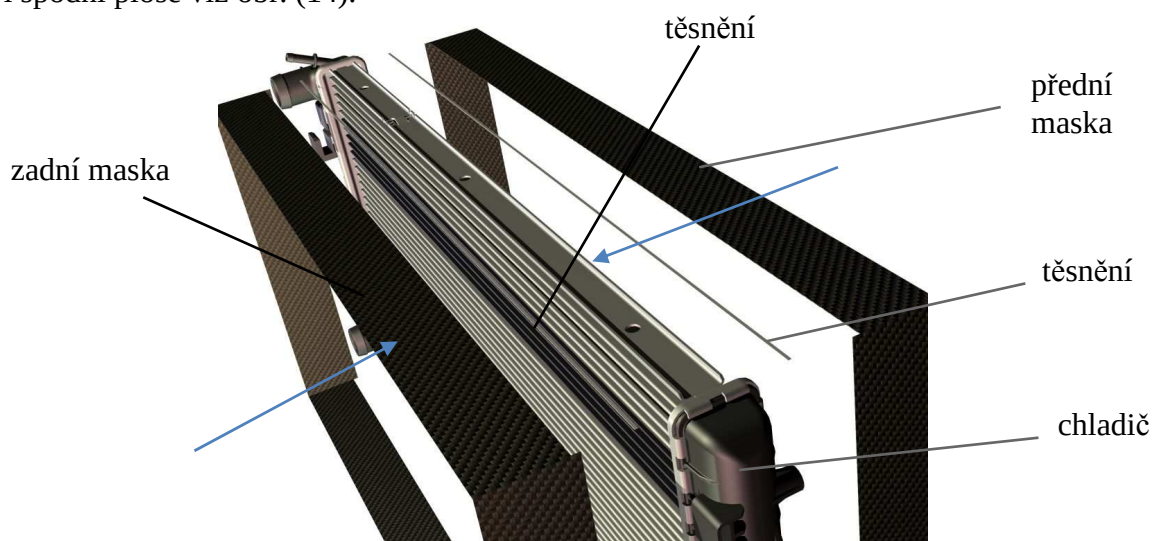
5.1 Utěsnění chladiče

Návrhem je připevnit na vstupní i výstupní činnou plochu chladiče masky, které se napevno uchytí ke chladiči pomocí upínek. Jejich cílem je utěsnit chladič po obvodu tak, aby se zabránilo obtékání vzduchu kolem chladiče. Masky můžeme vidět na obr. (13).



Obr. 13 Masky chladiče

Boční plochy masky budou vyrobeny delší, než spodní a horní plochy. Přecházející boční plochy se zasunou do drážek chladiče mezi jeho činnou plochu a plastové komory. Na přední i zadní masku se přilepí z vnitřní strany těsnění, které bude na horní i spodní ploše viz obr. (14).

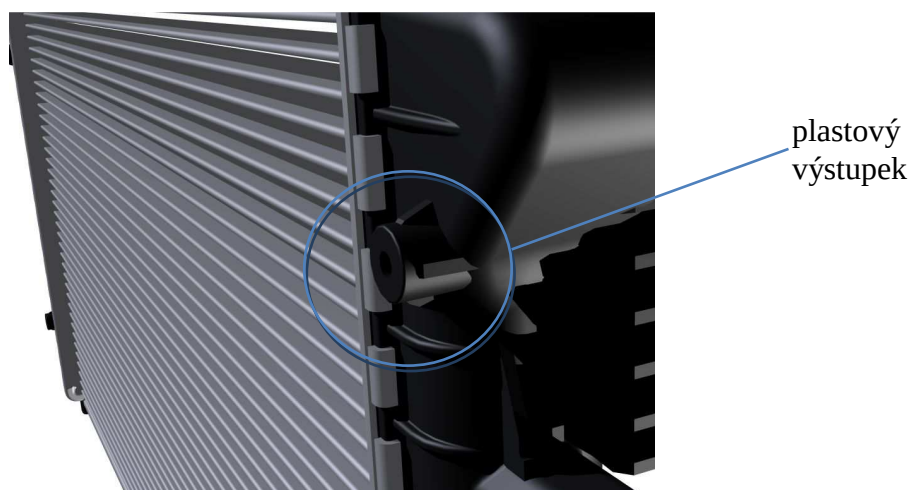


Obr. 14 Detailní záběr na těsnění

5.2 Připevnění krytu ke chladiči

Varianta upnutí přední masky

U této varianty je možné využít výstupky, které jsou pouze na jedné straně chladiče, konkrétně na přední. Detail výstupku lze vidět na obr. (15). Upnutí masek touto variantou lze realizovat tak, že přední maska se připevní ke chladiči napevno a zadní maska se připevní pomocí stahováků.



Obr. 15 Detail na plastový výstupek

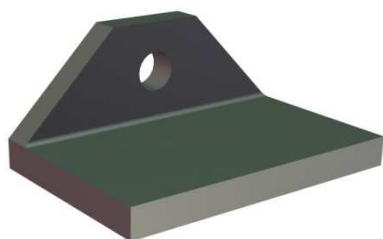
Přední maska bude uchycena pomocí čtyř upínek, které k ní budou svařeny. Do plastových výstupků na chladiči se upevní pomocí závrtných šroubů do plastu.



Obr. 16 Upnutí přední masky

Varianta upínek k přitlačení masek na chladič

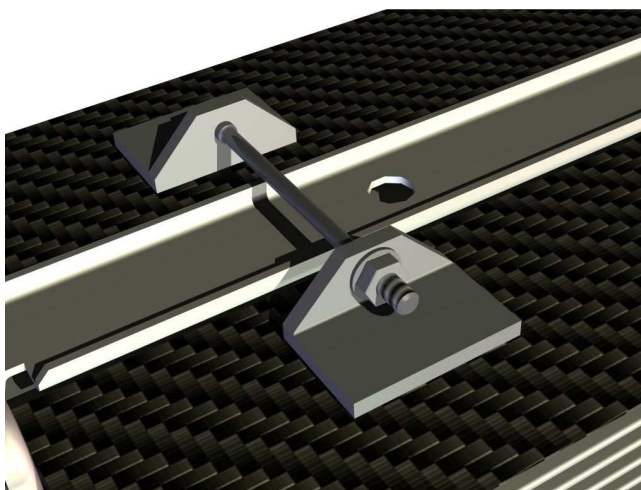
K přitlačení obou masek na chladič, byly navrženy upínky tvaru L. Tvar upínky můžeme vidět na obr. (17). Upínky se svaří k maskám chladiče. Jejich umístění bude pouze na horní a spodní ploše masky, protože na bočních plochách není prostor k uchycení. Okem v upínce se prostrčí tyčinka obr. (18) osazená na koncích závity. Pomocí matic se kryty stáhnou k sobě a přitlačí se na chladič. Tímto způsobem se zvětší účinnost těsnění. Detail můžeme vidět na obr. (19).



Obr. 17 Upínka tvaru L



Obr. 18 Tyčinka



Obr. 19 Detail stažení masek ke chladiči

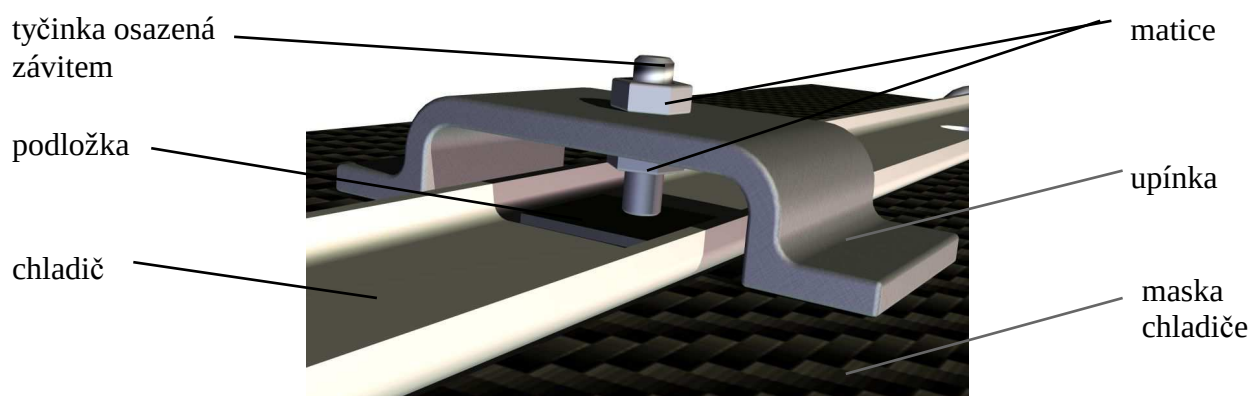
Varianta upínek ve tvaru mostů

K zamezení pohybu masek ve vertikálním směru touto variantou, je možné provést pomocí upínky ve tvaru mostu vyrobenou z plechu, kterou můžeme vidět na obr. (20). Otvorem, který je umístěn ve středu mostu, se prostrčí tyčinka osazená závitem a zajistí se pomocí matic. Konce mostu se svaří k maskám chladiče. Tím bude možné přesně nastavit pozici krytu na činnou plochu chladiče ve vertikálním směru.



Obr. 20 Upínka ve tvaru mostu

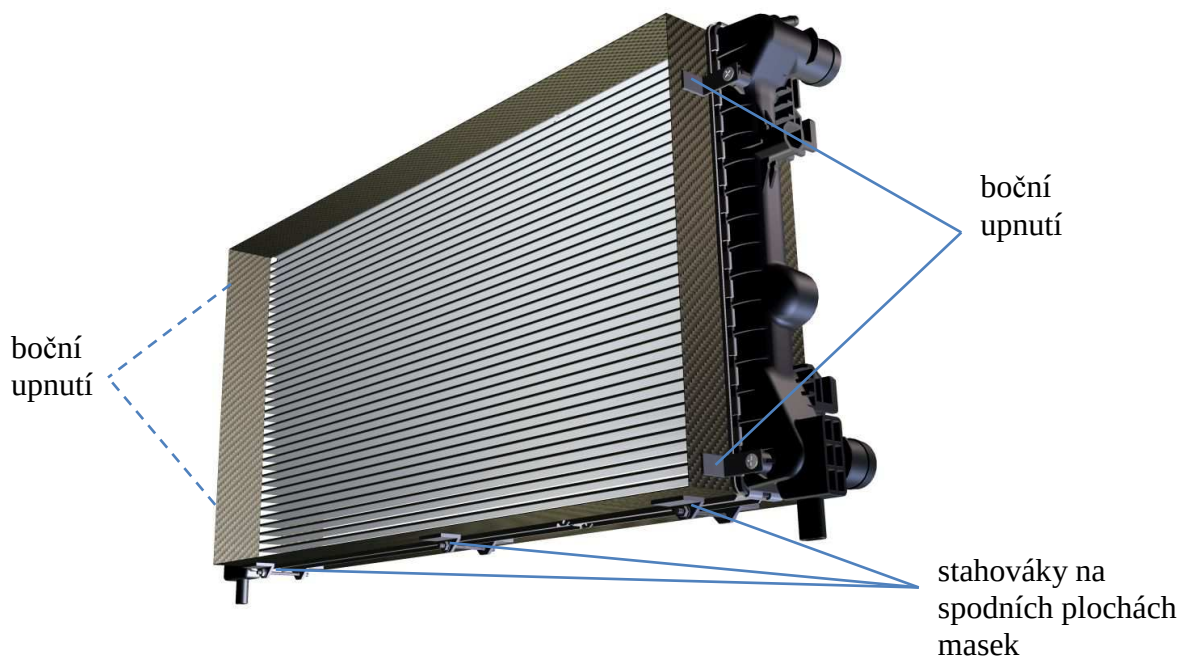
Umístění upínek může být pouze na horní a spodní ploše masky, protože na bočních plochách masky není prostor k úchytu.



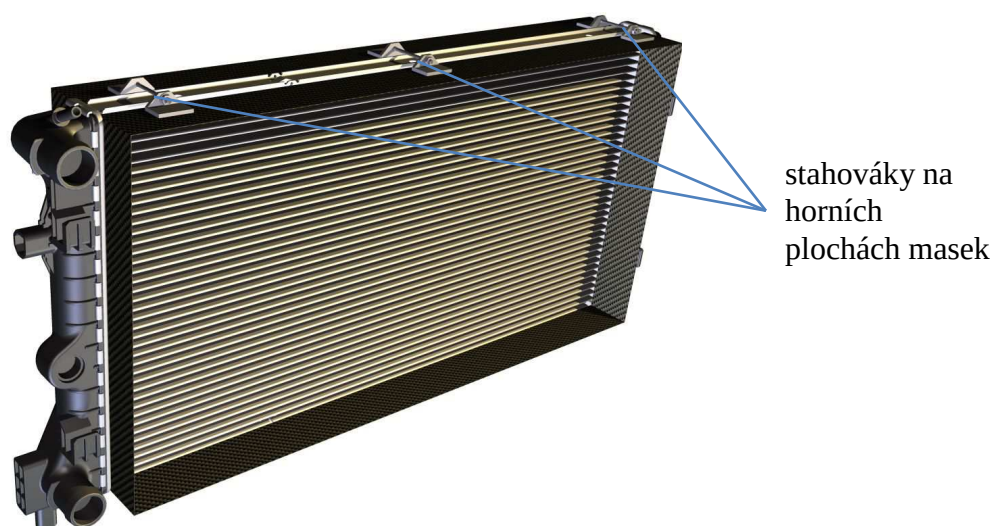
Obr. 21 Realizace upínky ve tvaru mostu

Finální upnutí krytů

Pro finální upnutí krytů budou využity výstupky na přední straně chladiče se stahováky. Upínky ve tvaru mostů nebudou použity, kvůli dosažení co nejnižší hmotnosti soustavy.



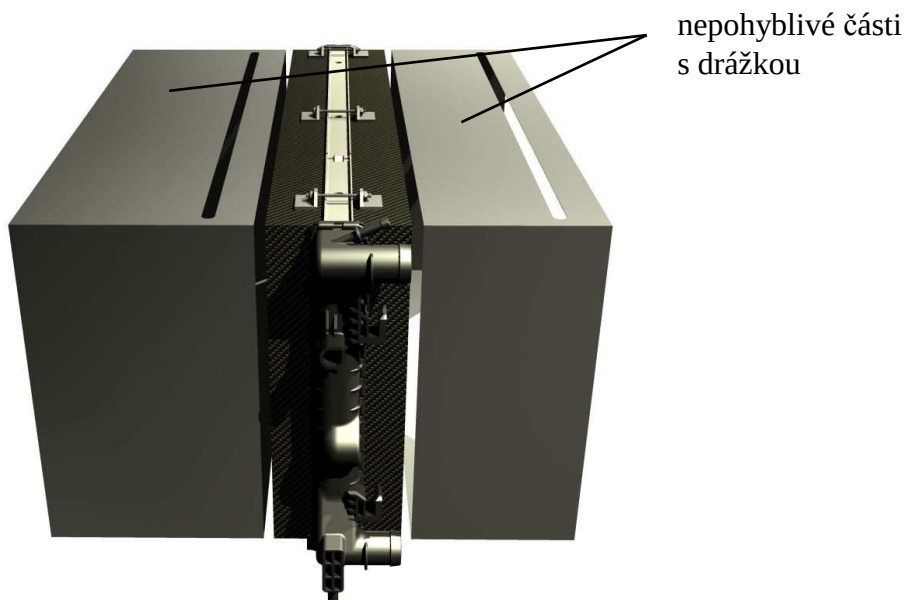
Obr. 22 Finální upnutí - pohled zepředu



Obr. 23 Finální upnutí -pohled zezadu

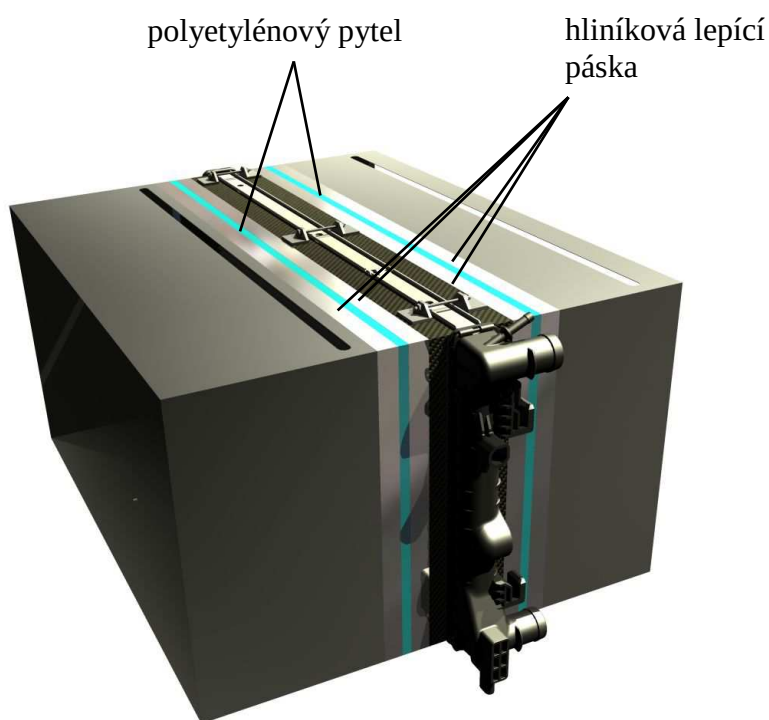
5.3 Konstrukční řešení měřící sekce

Dovolení axiálního posuvu chladiče vychází z varianty č. 1, viz str. 10. Chladič s maskami bude ustaven mezi dvěma nepohyblivými částmi, které budou obsahovat drážku pro Pitot-statickou sondu, jak lze schematicky vidět na obr. (24).



Obr. 24 Realizace měřící sekce

Poté se na část masek chladiče a nepohyblivé části navleče polyetylénový pytel, označen světle modře na obr. (25), který se po celém obvodu utěsní hliníkovou lepicí páskou. A tak se dovolí chladiči posuv v axiálním směru.

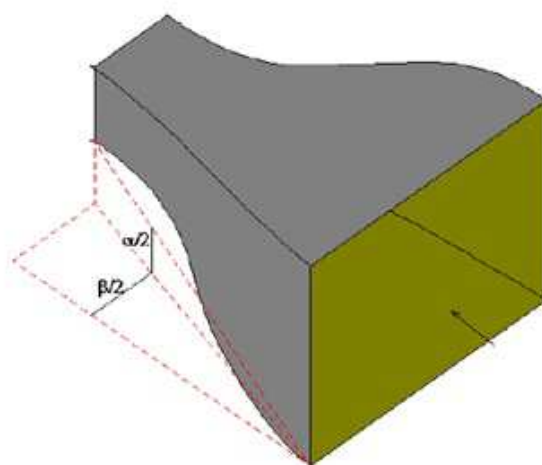


Obr. 25 Realizace měřící sekce s polyetylénovým pytlem

6 Návrh konfuzoru

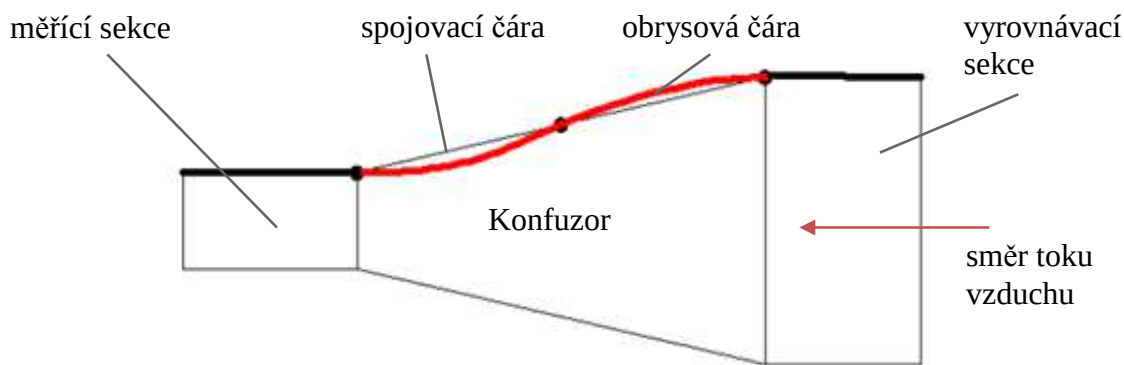
Konfuzor nebo-li tryska, hraje klíčovou roli při určování kvality toku vzduchu v měřící sekci, ve které se nachází chladič. Jeho cílem je urychlovat a vyrovnávat tok vzduchu, tj. snižovat úroveň turbulencí a nerovnoměrnost toku. Velikost a tvar konfuzoru určuje konečnou intenzitu hladiny turbulence v měřící sekci [1].

Zrychlení toku a jeho nerovnoměrnost závisí především na zužujícím poměru N , který je definován mezi vstupní a výstupní plochou trysky. Obr. (26) ukazuje typický tvar konfuzoru se zakótovanými zužujícími se úhly $\alpha_K/2$ a $\beta_K/2$ [1].



Obr. 26 Konfuzor [1]

Vzhledem k co nejlepší kvalitě toku má být zužující se poměr N tak velký, jak je to jen možné. Zužující poměr silně ovlivňuje celkové rozměry aerodynamického tunelu. V závislosti na předpokládané aplikaci by mělo být dosaženo kompromisu pro tento parametr. V případě aerodynamických tunelů používaných pro civilní a průmyslové aplikace, je zužující poměr mezi 4 a 6 dostačující. Pro náročnější letecké experimenty je žádoucí zužující poměr mezi 8 a 9 [1].



Obr. 27 Tvar konfuzoru [1]

U tvaru konfuzoru je důležité, aby vstupní a výstupní plochy byly tečné k proudícímu toku vzduchu, respektive k měřicí sekci a vyrovnávací sekci. Jestliže to nebude dodrženo, tak se v některých oblastech na stěnách konfuzoru může objevit nepříznivý tlakový gradient, který může vést k lokálnímu odtržení mezní vrstvy. Když nastane tato situace, turbulence se zvýší, což bude mít za následek špatnou kvalitu toku vzduchu v měřicí sekci [1].

Bod, kde obrysová čára protíná spojovací rovnou čáru obr. (27), je obvykle v polovině konfuzoru. Abychom docílili vhodných vlastností toku vzduchu, tak z experimentů vyplývá, že zužující se úhel $\alpha_k/2$ a $\beta_k/2$ se pohybuje kolem hodnoty 12° [1].

Na obr. (28) lze vidět navrhnutý tvar konfuzoru. Křivost ploch je uvažována pouze na horní a spodní ploše, boční plochy konfuzoru jsou rovinné. Z důvodu velké šířky chladiče ke vstupní šířce měřicí sekce.

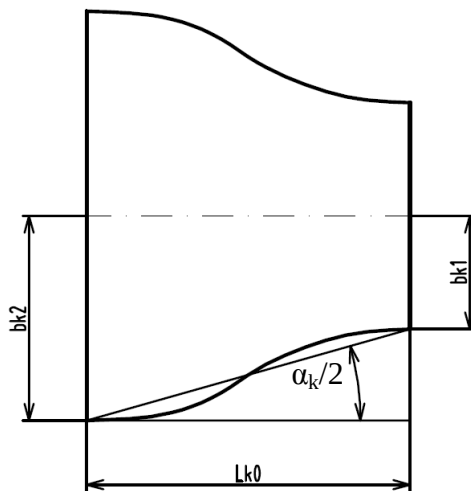


Obr. 28 Navrhnutý tvar konfuzoru

6.1 Výpočet délky konfuzoru

6.1.1 Výpočet optimální délky konfuzoru

Dle dostupné literatury s použitím zužujícího se úhlu $\alpha_k/2 = 12^\circ$ a užitím goniometrie plyne:



Obr. 29 Náčrt konfuzoru

$$L_{Ko} = \frac{b_{k2} - b_{k1}}{\tan\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)}$$

$$L_{Ko} = \frac{250 - 165}{\tan 12} = \mathbf{400\text{mm}}$$

6.1.2 Výpočet skutečné délky

Z důvodu omezujících rozměrů měřicí sekce, se musí optimální délka konfuzoru zkrátit, respektive zvětšit zužující se úhel konfuzoru na $\alpha_k/2 = 15^\circ$. Poté skutečná délka konfuzoru, opět s využitím goniometrie je:

$$L_{Ks} = \frac{250 - 165}{\tan 15} = \mathbf{317\text{mm}}$$

Zkrácením délky konfuzoru nevzniká problém. Konfuzor nemá takový vliv na tok vzduchu jako difuzor.

6.2 Výpočet rychlosti na konci konfuzoru

Předpoklady proudění:

- 1D - proudění
- stacionární

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

- nestlačitelné

$$a = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} = \sqrt{1,4 \cdot 287,04 \cdot 288,15} = 340,26 \text{ m/s}$$

$$M = \frac{w}{a} = \frac{60}{340,26} = 0,176$$

Do $M = 0,3$ (Machova čísla) nepočítáme se stlačitelností $\gg \rho = \text{konst.}$

- izotermické

Při teplotě $T = 288,15 \text{ K}$ (15°C)

- potrubí uvažováno absolutně tuhé

Z rovnice kontinuity pro nestlačitelné tekutiny (6.1) plyne, že hmotnostní průtok $\dot{m}_1$ na začátku konfuzoru se musí rovnat hmotnostnímu průtoku $\dot{m}_2$ na konci konfuzoru.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$S_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = S_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 \quad (6.1)$$

Hustotu uvažujeme konstantní, z toho $\rho_1 = \rho_2$

$$w_2 = \frac{S_1 \cdot w_1}{S_2} = \frac{0,5 \cdot 0,7 \cdot 60}{0,648 \cdot 0,330} = \mathbf{98,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Rychlost w_2 , je rychlost na konci konfuzoru. Tato rychlost bude i v měřicí sekci před chladičem, protože se jedná o část s konstantním průřezem.

6.3 Výpočet tlakových ztrát v konfuzoru

Platí obecně, že ztráty jsou úměrné kinetické energii, dle rovnice (6.2).

$$Y_{12} = \xi \cdot \frac{w_2^2}{2} \quad (6.2)$$

Nejdříve je nutné vypočítat hydraulický průměr v užší části konfuzoru.

$$D_H = \frac{4 \cdot S_2}{O_m} = \frac{4 \cdot 0,330 \cdot 0,648}{2 \cdot (0,330 + 0,648)} = \mathbf{0,437m}$$

O_m ... omočený obvod [m]

S ... plocha [m²]

Reynoldsovo číslo Re , je založeno na hydraulickém průměru.

$$Re = \frac{w_2 \cdot D_H}{\nu} = \frac{98,2 \cdot 0,437}{0,00001447} = \mathbf{2\,965\,681}$$

ν ... kinematická viskozita z tabulek pro teplotu $T = 288,15K$

$$\nu = 0,00001447 \text{ m/s}^2$$

λ je definována v závislosti na Re :

$$\lambda = \frac{1}{[1,8 \cdot \log(Re) - 1,64]^2} = \mathbf{0,01}$$

Dále je nutné znát zužující poměr konfuzoru N :

$$N = \frac{S_1}{S_2} = \frac{0,5 \cdot 0,7}{0,648 \cdot 0,330} = \mathbf{1,64}$$

Zužující poměr vychází hodně malý, což je způsobeno tím, že máme malý rozdíl mezi vstupní a výstupní plochou konfuzoru.

Podle dostupné literatury je koeficient tlakových ztrát v souvislosti na dynamickém tlaku v úzké části konfuzoru dán vztahem (6.3) [1].

$$\xi_K = \left\{ \frac{\lambda}{[16 \cdot \sin(\frac{\alpha_K}{2})]} \right\} \cdot \left(1 - \frac{1}{N^2} \right) + \left\{ \frac{\lambda}{[16 \cdot \sin(\frac{\beta_K}{2})]} \right\} \cdot \left(1 - \frac{1}{N^2} \right) \quad (6.3)$$

$$\alpha_K/2 = 15^\circ$$

$$\beta_K/2 = 5,18^\circ$$

$$\xi_K = 0,00151 + 0,00435 = \mathbf{0,00586}$$

Pak ztráty v konfuzoru podle rovnice (6.2).

$$Y_{12} = \xi_K \cdot \frac{w_2^2}{2} = 0,00586 \cdot \frac{98,2^2}{2} = \mathbf{28,25 \text{ J/kg}}$$

Z toho tlakové ztráty v konfuzoru:

$$\Delta p_k = \rho \cdot Y_{12} = 1,225 \cdot 28,25 = \mathbf{34,6 \text{ Pa}}$$

Na základě uvedených výpočtů byly tlakové ztráty v konfuzoru zanedbány.

6.4 Výpočet statického tlaku na konci konfuzoru

Pro výpočet tlaku je nutné znát hustotu vzduchu. Hustotu ρ získáme ze stavové rovnice (6.4).

$$p_{\text{atm}} \cdot v = r \cdot T \quad (6.4)$$

$r \dots$ měrná plynová konstanta, pro vzduch $r = 287,04 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$p_{\text{atm}} \dots$ atmosferický tlak $p_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$

$v \dots$ měrný objem $[\text{m}^3.\text{kg}^{-1}]$

$T \dots$ teplota $T = 288,15 \text{ K}$ (15°C)

$$v = \frac{r \cdot T}{p_{\text{atm}}}$$

hustota je převrácená hodnota měrného objemu $\rho = \frac{1}{v}$

$$\rho = \frac{p_{\text{atm}}}{r \cdot T} = \frac{101\,325}{287,04 \cdot 288,15} = \mathbf{1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

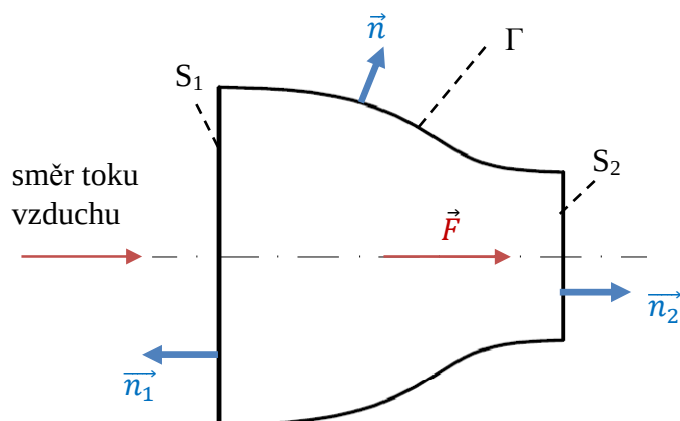
Pro výpočet statického tlaku na konci konfuzoru, vycházíme ze zákona zachování energie mezi dvěma místy na proudnici, respektive z Bernoulliho rovnice (6.5).

$$p_{s1} + \frac{w_1^2}{2} \cdot \rho_{\text{STŘ}} = p_{s2} + \frac{w_2^2}{2} \cdot \rho_{\text{STŘ}} \quad (6.5)$$

$$101325 + \frac{60^2}{2} \cdot 1,225 = p_{s2} + \frac{98,2^2}{2} \cdot 1,225$$

$$p_{s2} = \mathbf{97\,624 \text{ Pa}}$$

6.5 Výpočet působící síly na konfuzor v axiálním směru



Obr. 30 Schéma zatížení konfuzoru osovou silou

Vychází se z věty o změně hybnosti, podle vztahu (6.6).

$$\rho \cdot \int_S \vec{w} \cdot (\vec{w} \cdot \vec{n}) \cdot dS = \vec{G} - \int_S p \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (6.6)$$

Uvážíme-li, že:

$$\vec{F}_K = \int_{\Gamma} p \cdot \vec{n} \cdot dS$$

Po úpravě a vyjádření, se síla na konfuzor v axiálním směru rovná:

$$\vec{F}_K = Q_m \cdot (\vec{w}_1 - \vec{w}_2) + \vec{G} - (p_{s1} \cdot \vec{n}_1 \cdot S_1 + p_{s2} \cdot \vec{n}_2 \cdot S_2)$$

Hmotnost vzduchu se m_{vz} zanedbává, tzn. $\vec{G} = \vec{0}$. Z toho vyplývá, že síla bude ovlivněna pouze dynamickou a tlakovou složkou.

$$F_K = 25,725 \cdot (60 - 98,2) + 0 - (-101325 \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 97530 \cdot 0,330 \cdot 0,648)$$

$$F_K = -982,7 + 14608 = \mathbf{13\ 625\ N}$$

Sílu v axiálním směru přenese šroubový a svarový spoj. Konstrukční řešení můžeme vidět na str. 41, v kapitole upnutí konfuzoru.

6.6 Pevnostní výpočet konfuzoru

Výpočet minimální tloušťky plechu konfuzoru

Materiál zvolen: DC01 (1.0330 nebo 11 321)

Mez pevnosti v tahu R_m : (270 – 410) Mpa

Vzhledem k bezpečnosti zvolena nejnižší hodnota meze pevnosti (270 Mpa)

Výpočet vnějšího zatížení $\hat{p}_k$

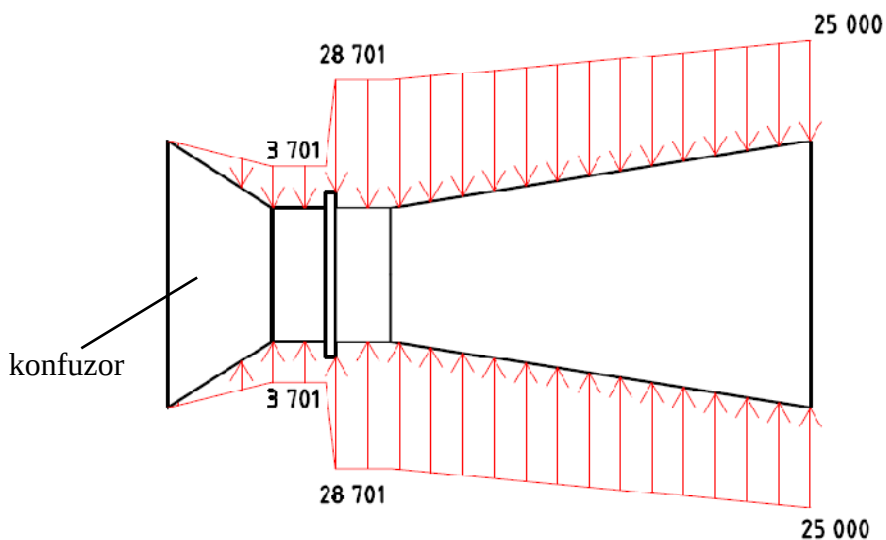
V konfuzoru dochází při proudění toku vzduchu ke snižování statického tlaku. Rozdíl mezi statickým tlakem uvnitř konfuzoru a vnějším atmosférickým tlakem způsobí zatížení stěn konfuzoru. Do výpočtu za vnější zatížení byla dosazena maximální hodnota podtlaku.

Statický tlak p_{s2} na konci v konfuzoru, byl vypočten na str. 24, z Bernoulliho rovnice (6.5).

$$p_{s2} = 97\,624\text{ Pa}$$

Největší podtlak $p_{\text{pod,max}}$ bude na konci konfuzoru. Vypočteme jej z rozdílu okolního atmosférického tlaku vně a statického tlaku uvnitř konfuzoru.

$$p_{\text{pod,max,K}} = p_{\text{atm}} - p_{s2} = 101\,325 - 97\,624 = 3\,701\text{ Pa}$$



Obr. 31 Průběh vnějšího zatížení na plochy tunelu

Maximální podtlak v konfuzoru dosazen do výpočtu za vnější zatížení.

$$p_{\text{pod,max}} = \hat{p}_k$$

Předpoklady pevnostního výpočtu

- výpočet je proveden k meznímu stavu ztráty stability
- rovná deska zatížená normálním tlakem
- deska po obvodě vetknutá
- vliv dynamické složky, která působí proti podtlaku zanedbána
- vnější zatížení způsobené největším rozdílem statických tlaků
- průběh tlaku lineární

Součinitel rezervy, dle vztahu (6.7).

$$\eta = \frac{R_m}{\sigma} \geq 1 \quad (6.7)$$

Pro návrh tloušťky stěn byl součinitel rezervy zvolen $\eta = 1,5$, z toho matematickou úpravou rovnice (6.7) plyne:

$$\sigma = \frac{R_m}{1,5} = \frac{270}{1,5} = 180 \text{ Mpa}$$

Maximální napětí $\sigma = 180 \text{ Mpa}$

Vztah pro maximální napětí, který byl získán z tabulek pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí (6.8).

$$\sigma = g_1 \cdot \hat{p} \cdot \left(\frac{b}{t_{\min}} \right)^2 \quad (6.8)$$

Kde g_1 je koeficient, který získáme z tabulky viz obr. (32). Koeficient g_1 je závislý na poměru výšky k délce plechu.

Délka plechu $a_k = 700 \text{ mm}$

Výška plechu $b_k = 317 \text{ mm}$

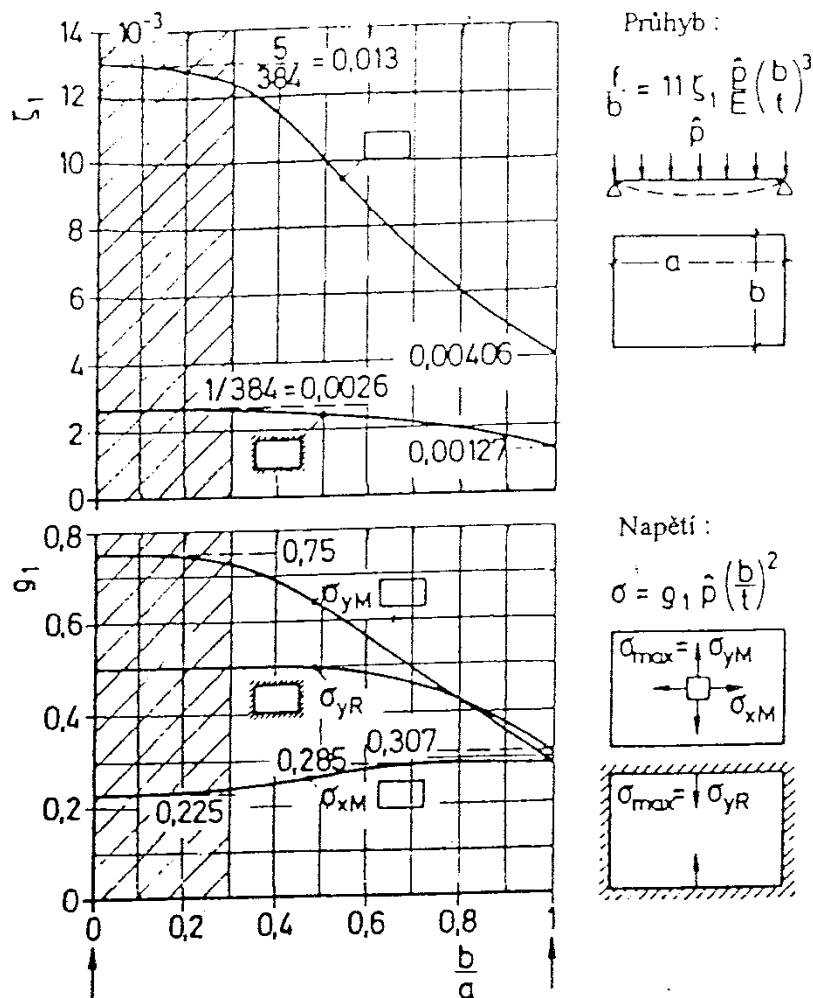
Z důvodů větší bezpečnosti, jsou brány největší rozměry plochy konfuzoru.

Poměr:

$$\frac{b_k}{a_k} = \frac{317}{700} = \mathbf{0,453}$$

g_{1k} ... určen z tabulek, pro poměr $b_k/a_k = 0,453$

$$g_{1k} = 0,5$$



Obr. 32 Tabulka 6.1

Minimální tloušťku plechu konfuzoru $t_{\min,K}$ vypočteme z rovnice (6.8).

$$t_{\min,K} = b_k \cdot \sqrt{\frac{g_{1k} \cdot \hat{p}_k}{\sigma}} = 317 \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot 3701 \cdot 10^{-6}}{180}} = 1,01 \text{ mm}$$

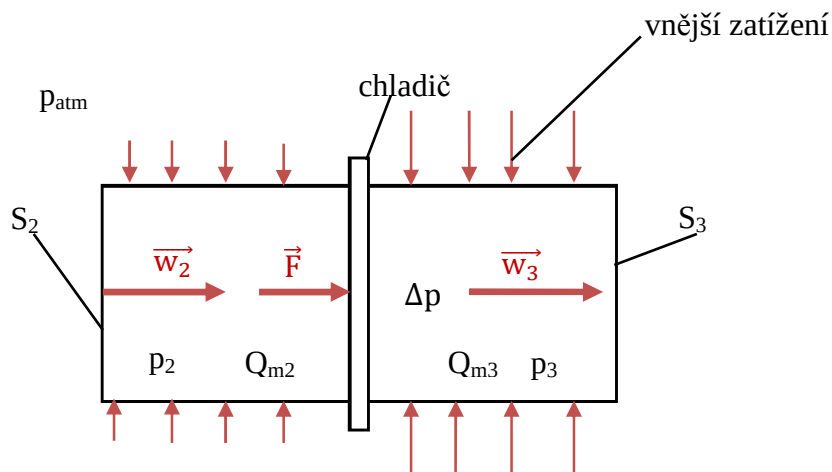
Volím $t_{\min,K} = 1 \text{ mm}$

Při výpočtu na vyšší úrovni, vyjde minimální tloušťka plechu méně. Z důvodů nezanedbání dynamické složky, která bude působit proti podtlaku, dále s uvažováním křivosti a zúžení plechu.

7 Výpočet měřicí sekce

7.1 Výpočet rychlosti za chladičem

Předpoklady proudění jsou stejné jako u konfuzoru.



Obr. 33 Schéma měřicí sekce

Z rovnice kontinuity podle vztahu (6.1) plyne, že hmotnostní tok před a za chladičem je stejný.

$$Q_{m2} = Q_{m3}$$

(hustota je konstantní)

$$w_2 \cdot S_1 = w_3 \cdot S_2$$

Průřezy před a za chladičem jsou stejné. Z toho platí, že:

$$w_2 = w_3 = \mathbf{98,2 \text{ m/s}}$$

Rychlost za chladičem je stejná, jako před ním.

7.2 Výpočet tlakových ztrát v měřící sekci

Podle dostupné literatury je koeficient tlakových ztrát v měřící sekci v souvislosti na dynamickém tlaku dán vztahem (7.2). [1]

$$\xi_M = \lambda \cdot \frac{L_M}{D_H} \quad (7.2)$$

Třecí ztrátový součinitel λ , je stejný jako u konfuzoru.

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \log(Re) - 1,64)^2} = 0,01$$

Reynoldsovo číslo Re a hydraulický průměr D_H , jsou také stejné jako u konfuzoru. Je to dáno tím, že se pro výpočet měřící sekce uvažuje takový průřez, který je shodný s koncovým průřezem konfuzoru.

L_M ... celková délka měřící sekce	$L_M = 0,515 \text{ m}$
D_H ... hydraulický průměr v měřící sekci	$D_H = 0,437 \text{ m}$
Re ... Reynoldsovo číslo	$Re = 2\,965\,681 [-]$

Dosazením do vztahu (7.2) vypočteme koeficient tlakových ztrát v měřící sekci.

$$\xi_M = 0,01 \cdot \frac{0,515}{0,437} = \mathbf{0,012}$$

Tlakové ztráty v měřící sekci:

$$\Delta p_M = \rho \cdot \xi \cdot \frac{w_3^2}{2} = 1,225 \cdot 0,012 \cdot \frac{98,2^2}{2} = \mathbf{70,59 \text{ Pa}}$$

Na základě uvedených výpočtů byly tlakové ztráty v měřící sekci zanedbány.

7.3 Výpočet statického tlaku za chladičem

Výpočet tlaku se stanoví z Bernoulliho rovnice (6.5).

Hodnotu tlakové ztráty chladiče Δp_{CH} , pro maximální rychlost toku vzduchu před chladičem, jsem získal od Bc. Petra Brožka, který provedl detailnější analýzu ve své diplomové práci.

$$\Delta p_{CH} = 25\,000\text{ Pa}$$

$$p_{s2} + \frac{w_2^2}{2} \cdot \rho_{STŘ} = (p_{s3} + \Delta p_{CH}) + \frac{w_3^2}{2} \cdot \rho_{STŘ}$$

rychlosti jsou stejné $\gg$ stejné dynamické tlaky

$$p_2 = p_3 + \Delta p_{CH}$$

Statický tlak za chladičem p_3 :

$$p_{s3} = p_{s2} - \Delta p_{CH} = 97624 - 25000 = \mathbf{72\,624\text{ Pa}}$$

7.4 Pevnostní výpočet zadní masky chladiče

Z důvodu tlakové ztráty chladiče budou plochy zadní masky chladiče více namáhány rozdílem statických tlaků, než plochy přední masky.

Výpočet vnějšího zatížení $\widehat{p}_M$

Vnější zatížení je způsobené rozdílem statických tlaků uvnitř a vně tunelu. Určíme ho stejným způsobem jako u konfuzoru.

Výpočet statického tlaku uvnitř tunelu za chladičem p_{s3} :

$$p_{s3} = \mathbf{72\,624\text{ Pa}}$$

Poté podtlak v tunelu za chladičem:

$$p_{\text{pod},M} = p_{\text{atm}} - p_{s3} = 101\,325 - 72624 = \mathbf{28\,701\text{ Pa}}$$

Tato hodnota dosazena do výpočtu pro stanovení minimální tloušťky plechu zadní masky.

$$p_{\text{pod},M} = \widehat{p}_M$$

Pevnostní předpoklady

- výpočet je proveden k meznímu stavu ztráty stability
- rovná deska zatížená normálním tlakem
- deska po obvodě podepřena podporami
- vnější zatížení způsobené rozdílem statických tlaků
- průběh tlaku konstantní

Pro pevnostní výpočet uvažuji materiál masek plech, stejný jako u konfuzoru.

$$\sigma = \frac{R_m}{1,5} = \frac{270}{1,5} = 180 \text{ Mpa}$$

Koeficient g_{1M} opět získáme z tabulky viz obr.(32). Tentokrát pro jiný poměr výšky k délce plechu.

Délka plechu $a_M = 648 \text{ mm}$

Výška plechu $b_M = 50 \text{ mm}$

Z důvodů větší bezpečnosti, jsou brány největší rozměry plochy masky. Konkrétně horní nebo spodní plocha.

Poměr:

$$\frac{b_M}{a_M} = \frac{50}{648} = \mathbf{0,08}$$

g_1 ... určen z tabulek

$$g_{1M} = \mathbf{0,75}$$

Minimální tloušťku plechu zadní masky $t_{\min,M}$ vypočteme z rovnice (6.8).

$$t_{\min,M} = b_M \cdot \sqrt{\frac{g_{1M} \cdot \widehat{p}_M}{\sigma}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{0,75 \cdot 28701 \cdot 10^{-6}}{180}} = 0,55 \text{ mm}$$

Tloušťku stěny volím stejnou jako u konfuzoru, z důvodů většího využití polotovaru materiálu. Polotovary tenkých plechů se prodávají podle předepsaných rozměrů. Je zbytečné kupovat další polotovar plechu o jiné tloušťce.

$$t_{\min,M} = \mathbf{1 \text{ mm}}$$

7.5 Pevnostní výpočet části obsahující drážku pro Pitot-statickou sondu za chladičem



Obr. 34 Člen s drážkou za chladičem

- pevnostní předpoklady jsou stejné jako u pevnostního výpočtu masky chladiče
- drážka pro Pitot-statickou sondu je zanedbána
- vnější zatížení způsobené rozdílem statických tlaků vně a uvnitř tunelu bude stejné, jako pro výpočet masky chladiče, protože se jedná o konstantní průřez.
- tlakové ztráty v měřicí sekci byly zanedbány
- pro výpočet je uvažována největší plocha části pro Pitot-statickou sondu, tzn. horní nebo spodní plocha
- materiál stejný jako u konfuzoru

Vnější zatížení $\widehat{p}_{PS2}$ způsobené podtlakem je stejné jako u pevnostního výpočtu masky chladiče (předchozí strana).

$$\widehat{p}_{PS2} = 28\,701\text{Pa}$$

Délka plechu $a_{PS2} = 648\text{ mm}$

Výška plechu $b_{PS2} = 160\text{ mm}$

Poměr výšky k délce plechu:

$$\frac{b_{PS2}}{a_{PS2}} = \frac{160}{648} = 0,25$$

$g_{1,PS1} \dots$ určen z tabulek $\gg g_{1,PS2} = 0,76$

Minimální tloušťku plechu konstantní části pro Pitot-statickou sondu $t_{\min,PS}$, vypočteme z rovnice (6.8).

$$t_{\min,PS2} = b_{PS2} \cdot \sqrt{\frac{g_{1,PS2} \cdot \widehat{p}_{PS1}}{\sigma}} = 160 \cdot \sqrt{\frac{0,76 \cdot 28701 \cdot 10^{-6}}{180}} = 1,76\text{ mm}$$

Volím stejnou tloušťku plechu jako u difuzoru, opět z důvodů většího využití polotovaru zakoupeného materiálu.

$$t_{\min,PS2} = 3\text{ mm}$$

7.6 Pevnostní výpočet části obsahující drážku pro Pitot-statickou sondu před chladičem



Obr. 35 Člen s drážkou před chladičem

Pevnostní předpoklady jsou stejné, jako u výpočtu části s drážkou, která se nachází za chladičem. Výpočet se liší pouze vnějším zatížením a rozměry.

Vnější zatížení $\widehat{p}_{PS1}$ způsobené rozdílem statických tlaků vně a uvnitř tunelu před chladičem.

$$\widehat{p}_{PS1} = p_a - p_{s2} = 101\,325 - 97\,624 = \mathbf{3\,701\,Pa}$$

Délka plechu $a_{PS1} = 648\,mm$

Výška plechu $b_{PS1} = 210\,mm$

Poměr výšky k délce plechu:

$$\frac{b_{PS1}}{a_{PS1}} = \frac{210}{648} = \mathbf{0,32}$$

$g_1 \dots$ určen z tabulek $\gg g_{1,PS1} = \mathbf{0,74}$

Minimální tloušťku plechu konstantní části pro Pitot-statickou sondu $t_{min,PS2}$ před chladičem, vypočteme z rovnice (6.8).

$$t_{min,PS1} = b_{PS1} \cdot \sqrt{\frac{g_{1,PS1} \cdot \widehat{p}_{PS1}}{\sigma}} = 210 \cdot \sqrt{\frac{0,74 \cdot 3701 \cdot 10^{-6}}{180}} = 0,82\,mm$$

Volím tloušťku plechu stejnou jako u konfuzoru. Opět z důvodů většího využití polotovaru zakoupeného materiálu.

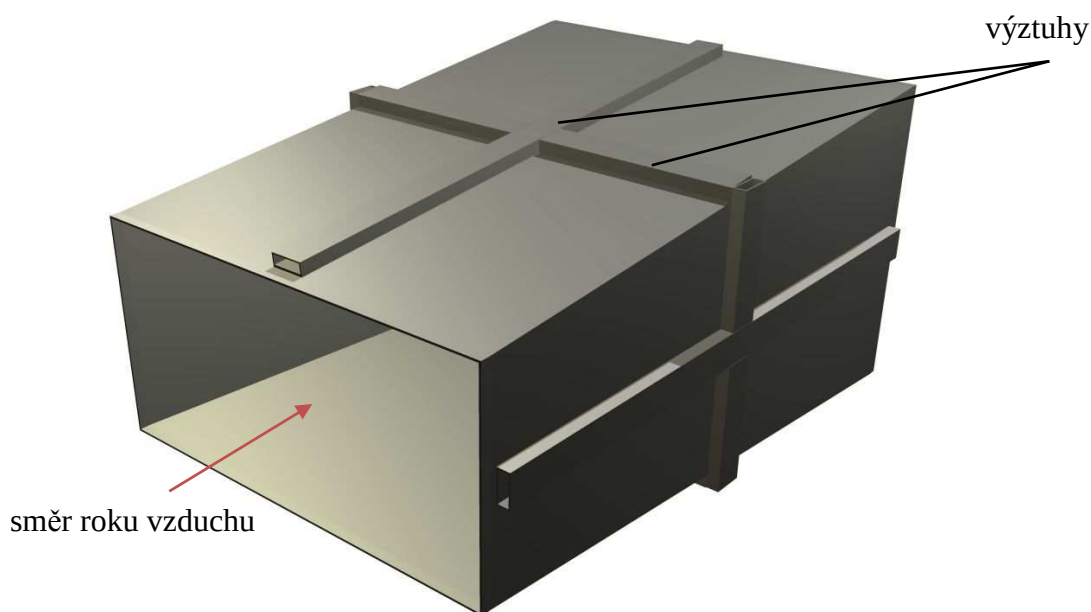
$$t_{min,PS1} = \mathbf{1mm}$$

8 Návrh difuzoru

Hlavní funkcí difuzoru je získat zpět statický tlak, tak aby se zvýšila účinnost aerodynamického tunelu. Proto je nutné dodržet správný sklon, který má vliv i na kvalitní tok v měřicí sekci, kde se nachází chladič [1].

Aby se zabránilo odtržení toku vzduchu, tak bylo dle dostupné literatury prokázáno, že maximální otevírající se úhel difuzoru $\alpha_D/2$ musí být menší než 5° . Při nesprávném úhlu může dojít k odtržení toku, což se projeví tlakovými pulzacemi, které jsou přenášeny proti proudu toku vzduchu ke chladiči. Následkem toho je nerovnoměrný tlak a rychlost, respektive vznik turbulentního proudění. Mimo jiné difuzor působí jako tlumič tlakových poruch, které se vytvářejí v rozích aerodynamického tunelu. Proto je velice důležité zachovat správný sklon toku vzduchu pro efektivní rekuperaci tlaku [1].

Na obr. (35) můžeme vidět tvar podzvukového difuzoru s obdélníkovým průřezem, který se skládá ze čtyř plechových částí svařených k sobě. Kvůli zabránění vlnění plechu a jeho průhybu, jsou jednotlivé plochy opatřeny výztuhy, tak aby se zvětšila únosnost ploch difuzoru a nedošlo k vlnění plechů.

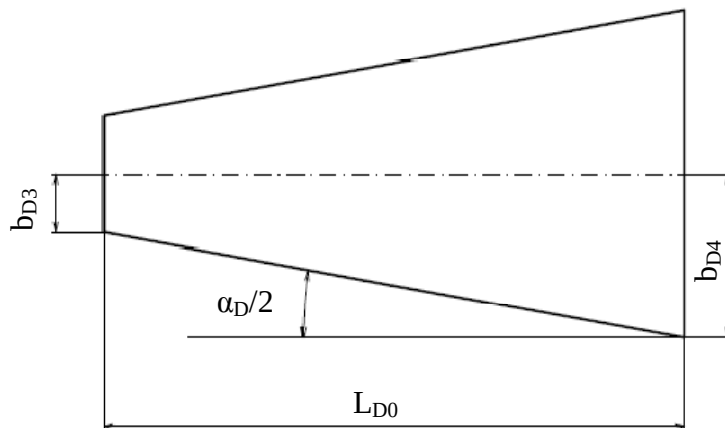


Obr. 36 Difuzor s obdélníkovým průřezem

8.1 Výpočet difuzoru délky difuzoru

Stanovení optimální délky difuzoru

Dle dostupné literatury, otevírací úhel $\alpha_D/2 = 4,8^\circ$. Z goniometrie vyplývá

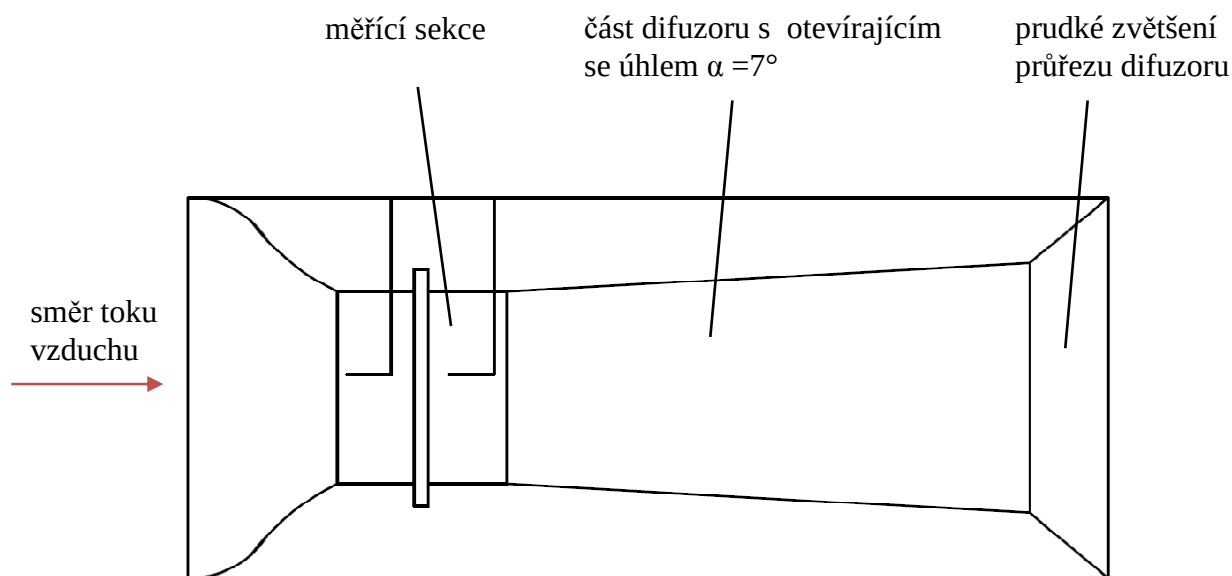


Obr. 37 Náčrt difuzoru

$$L_{D0} = \frac{b_{D3} - b_{D4}}{\tan(4,8)} = \frac{250 - 165}{0,0864} = \mathbf{1008 \text{ mm}}$$

Návrh řešení pro dodržení otevíracího se úhlu $\alpha/2 = 3,5^\circ$

Některé literatury doporučují otevírací se úhel difuzoru $\alpha/2 = 3,5^\circ$. Jedno z možných řešení, jak tento úhel dodržet je schematicky znázorněn na obr. (38). Na začátku difuzoru bychom směřovali tok vzduchu pod otevíracím se úhlem $3,5^\circ$. V dostatečné vzdálenosti od měřicí sekce, bychom tok vzduchu odtrhli prudkým zvětšením průřezu difuzoru.



Obr. 38 Schéma možného řešení dodržení otevíracího se úhlu $\alpha/2 = 3,5^\circ$

8.2 Tlakové ztráty v difuzoru

Koeficient tlakových ztrát v souvislosti na dynamickém tlaku v úzké části difuzoru je dán vztahem (8.1) [1].

$$\xi_D = 4,0 \cdot \tan\left(\frac{\alpha_D}{2}\right) \cdot \sqrt[4]{\tan\left(\frac{\alpha_D}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{S_{D1}}{S_{D2}}\right)^2} + \xi_f \quad (8.1)$$

S_{D1} ... plocha v nejužší části difuzoru

S_{D2} ... plocha v nejširší části difuzoru

$\alpha_D/2$... otevírající se úhel difuzoru

$$S_{D1} = 0,330 \cdot 0,648 = 0,21384 \text{ m}^2$$

$$S_{D2} = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35 \text{ m}^2$$

$$\alpha_D/2 = 4,8^\circ$$

Součinitel ξ_f je definován podle vztahu (8.2).

$$\xi_f = \frac{0,02}{8 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_D}{2}\right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{S_{D1}}{S_{D2}}\right)^2\right] \quad (8.2)$$

$$\xi_f = \frac{0,02}{8 \cdot \sin(4,8)} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,21384}{0,35}\right)^2\right] = \mathbf{0,0187}$$

Dosadíme do rovnice (8.1) a vypočteme koeficient tlakových ztrát v difuzoru

$$\xi_D = 0,33589 \cdot 0,53831 \cdot 0,627 + 0,0187 = \mathbf{0,132}$$

Pak tlakové ztráty v difuzoru Δp_D :

$$\Delta p_D = \rho \cdot \xi_D \cdot \frac{w_3^2}{2} = 1,225 \cdot 0,132 \cdot \frac{98,2^2}{2} = \mathbf{776,48 \text{ Pa}}$$

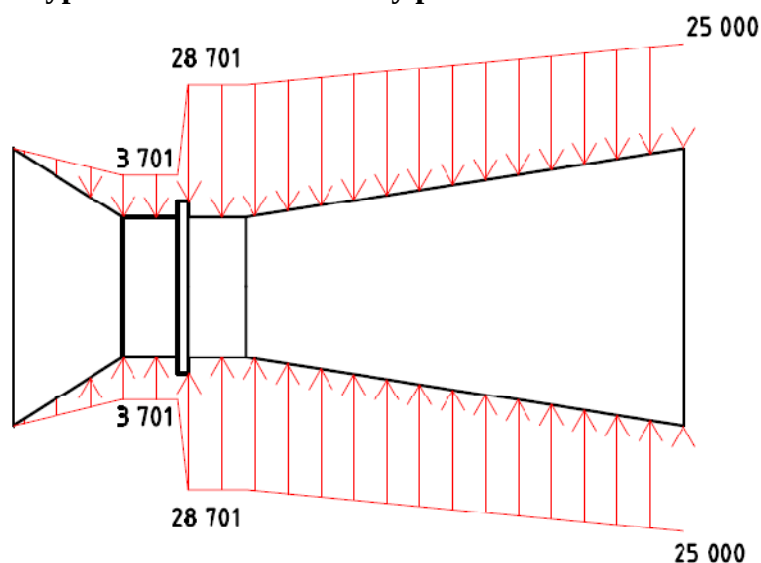
Na základě uvedených výpočtů byly tlakové ztráty v difuzoru zanedbány.

8.3 Statický tlak na konci difuzoru

$$p_{S3} + \frac{w_3^2}{2} \cdot \rho_{STR} = p_{S4} + \frac{w_4^2}{2} \cdot \rho_{STR}$$
$$72624 + \frac{98,2^2}{2} \cdot 1,225 = p_4 + \frac{60^2}{2} \cdot 1,225$$
$$p_{S4} = \mathbf{76\,325\,Pa}$$

Difuzor vrací zpět statický tlak na úkor rychlosti.

8.4 Pevnostní výpočet minimální tloušťky plechu difuzoru



Obr. 39 Průběh vnějšího zatížení na plochy tunelu

Pevnostní předpoklady výpočtu

- materiál plechu difuzoru je stejný jako u konfuzoru (DC01)
- výpočet je proveden k meznímu stavu ztráty stability
- rovná deska, zatížená normálním tlakem
- deska po obvodě vetknutá.
- vliv dynamické složky, který působí proti podtlaku je zanedbán
- vnější zatížení způsobené největším rozdílem statických tlaků, tj. na začátku difuzoru
- lineární průběh tlaku

Do výpočtu se zahrnuje i vliv výztuh. Výztuhy rozdělí plochu difuzoru na čtvrtiny. Uvažuje se největší rozměr desky, tj. horní nebo spodní plocha difuzoru.

Stanovení vnějšího zatížení

Vnější zatížení $\widehat{p_{DIF}}$ způsobené rozdílem statických tlaků na začátku difuzoru. Jako u předchozích částí za chladičem.

$$\widehat{p_{DIF}} = p_{atm} - p_{s3} = 101\,325 - 72\,624 = \mathbf{28\,701\,Pa}$$

Délka plechu $a_D = 1008/2 - 10 = 494\,mm$

Výška plechu $b_D = 700/2 - 10 = 340\,mm$

Poměr výšky k délce plechu:

$$\frac{b_D}{a_D} = \frac{340}{494} = \mathbf{0,69}$$

$g_{1,D} \dots$ určen z tabulek $\gg g_{1,D} = \mathbf{0,45}$



Obr. 40 Difuzor - výběr plochy

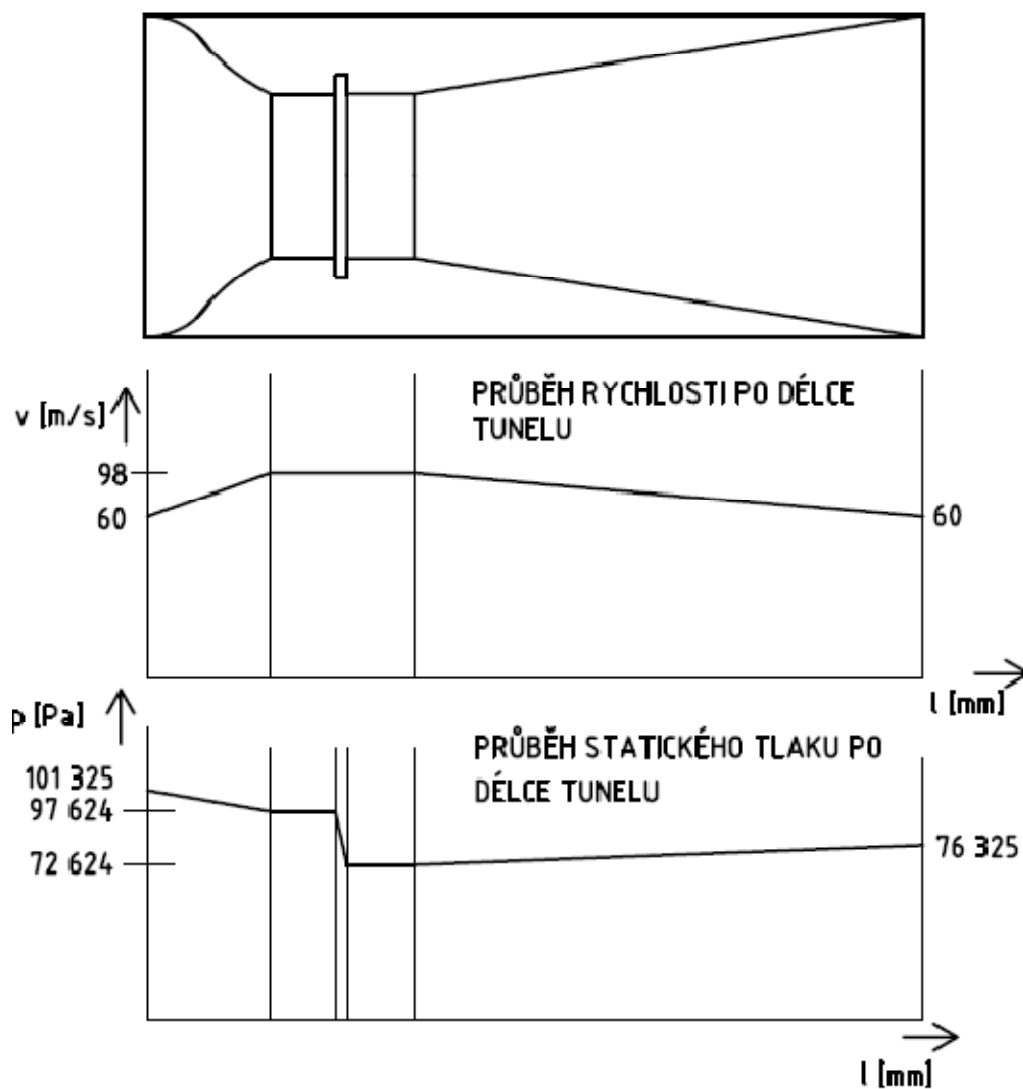
Minimální tloušťku plechu difuzoru $t_{min,DIF}$ vypočteme z rovnice (6.8).

$$t_{min,D} = b_D \cdot \sqrt{\frac{g_{1,D} \cdot \widehat{p_{DIF}}}{\sigma}} = 335 \cdot \sqrt{\frac{0,45 \cdot 28\,701 \cdot 10^{-6}}{180}} = 2,84\,mm$$

Volím tloušťku stěny plechu difuzoru $t_{min,D} = \mathbf{3\,mm}$.

9 Průběh rychlostí a tlaků po délce tunelu

Na obr. (41), můžeme vidět průběh teoretické rychlosti a statického tlaku po délce tunelu, se zanedbáním tlakových ztrát v jednotlivých částech.

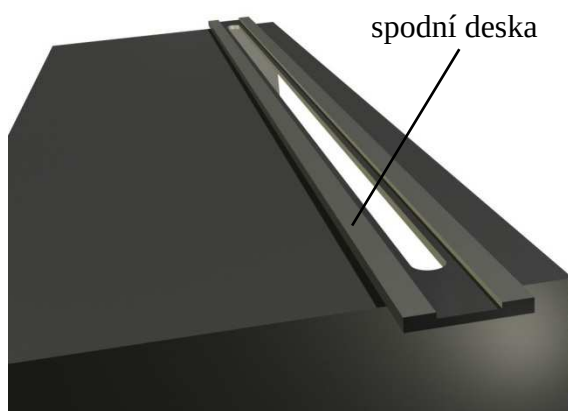


Obr. 41 Závislost teoretické rychlosti a tlaku po délce tunelu

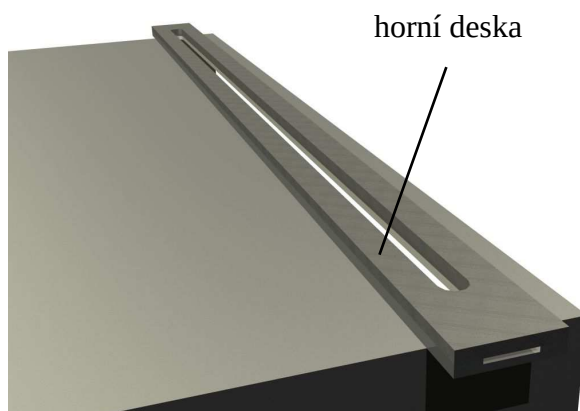
10 Utěsnění pohyblivé Pitot-statické sondy

Drážka pro Pitot-statickou sondu bude vyfrézována na přídavnou část tunelu, která bude umístěna před a za chladičem, bude uchycena pomocí L profilů k nepohyblivým částem konfuzoru a difuzoru. Řešení uchycení je provedeno na str. 43.

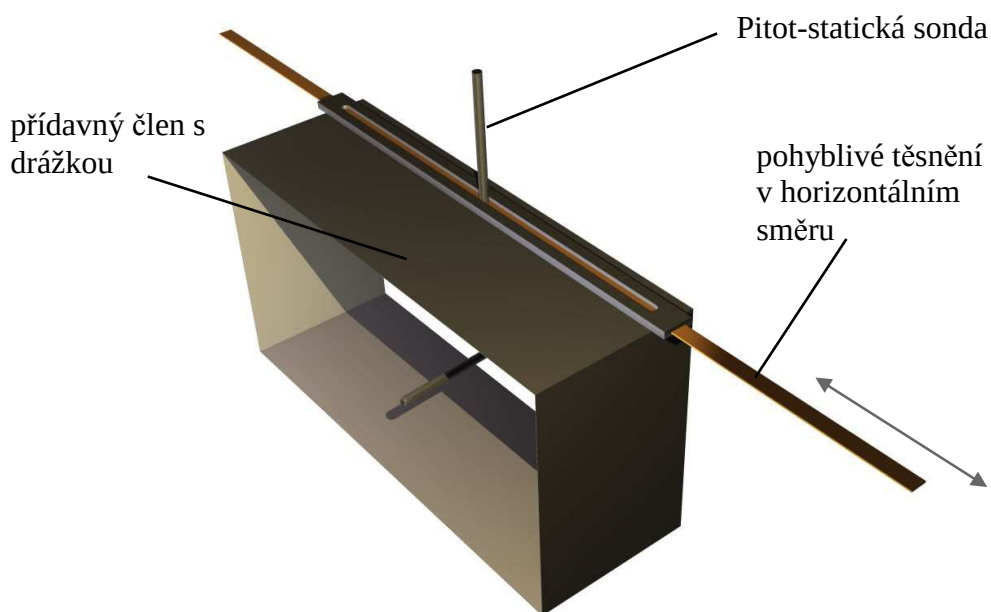
Na plochu přídavného členu, se přilepí nejdříve spodní a na ni horní deska obsahující drážku pro sondu. Mezi deskami vznikne drážka, do které se vsune plastové těsnění. Spoj bude utěsněn tvarovým stykem a umožní pohyb těsnění v horizontálním směru.



Obr. 42 Detail na spodní desku



Obr. 43 Detail na horní desku

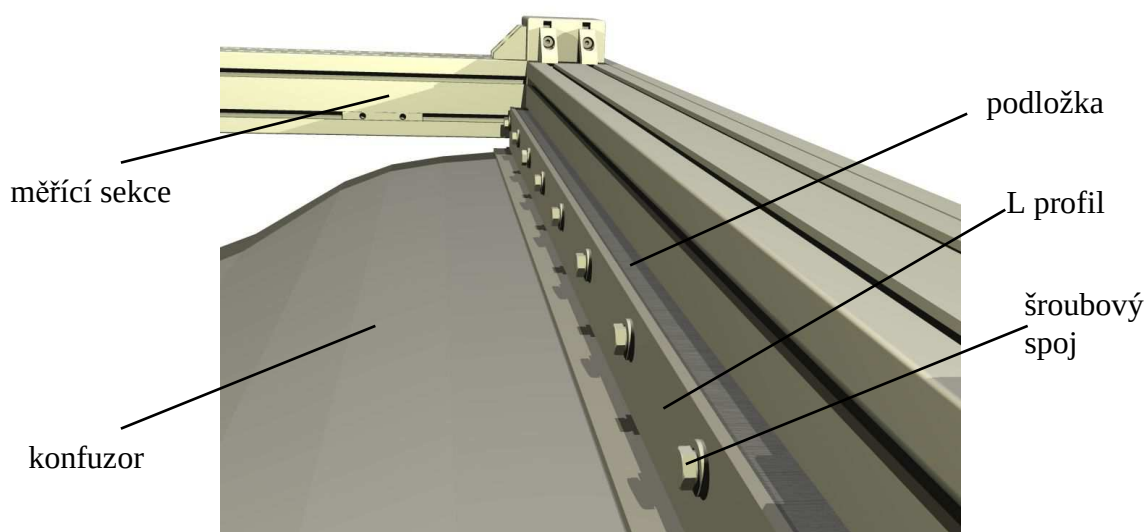


Obr. 44 Přídavný člen s drážkou pro sondu

11 Upnutí tunelu do měřící sekce

11.1 Upnutí konfuzoru

Vnější zatížení, které působí na konfuzor v axiálním směru, je zajištěno pomocí šroubového a svarového spoje. Na začátek konfuzoru se připevní příruba, která ke konfuzoru bude po obvodě svařena. Příruba se skládá ze čtyř L profilů, které budou uchyceny k měřící sekci pomocí šroubového spoje, kde matice šroubů jsou vsazeny do drážky v měřící sekci.



Obr. 45 Detail na uchycení konfuzoru k měřící sekci

Počet šroubů po obvodu $i = 32$ šroubů

Vnější zatížení na konfuzor v axiální směru viz str. 25, $F_k = 13\,625\text{ N}$

Z toho tahová síla na jeden šroub

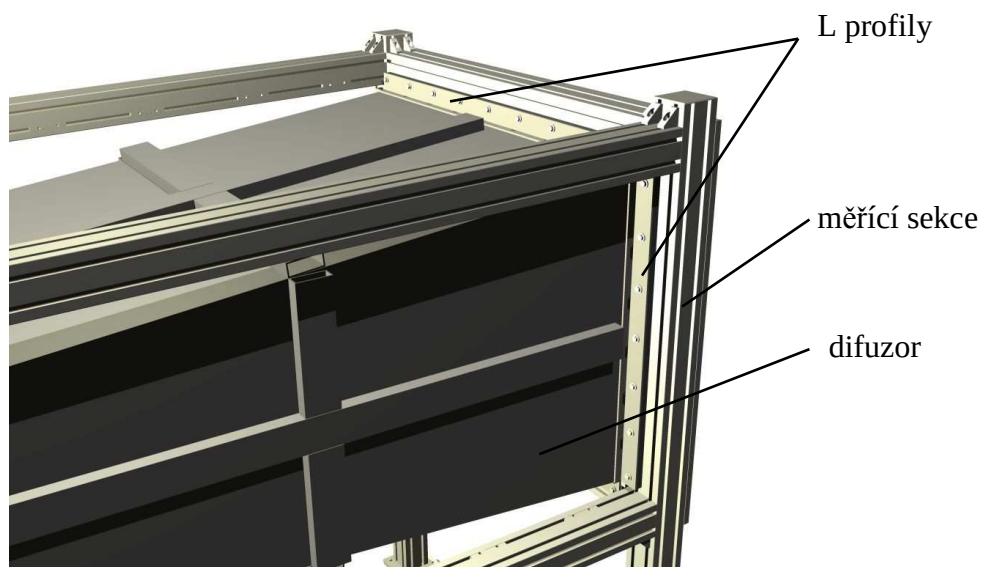
$$F_i = \frac{F_k}{i} = \frac{13\,625}{32} = 426\text{ N}$$

Tahové napětí působící na jeden šroub

$$\sigma_N = \frac{F_i}{A_s} = \frac{426}{14,2} = 30\text{ Mpa}$$

11.2 Upnutí difuzoru

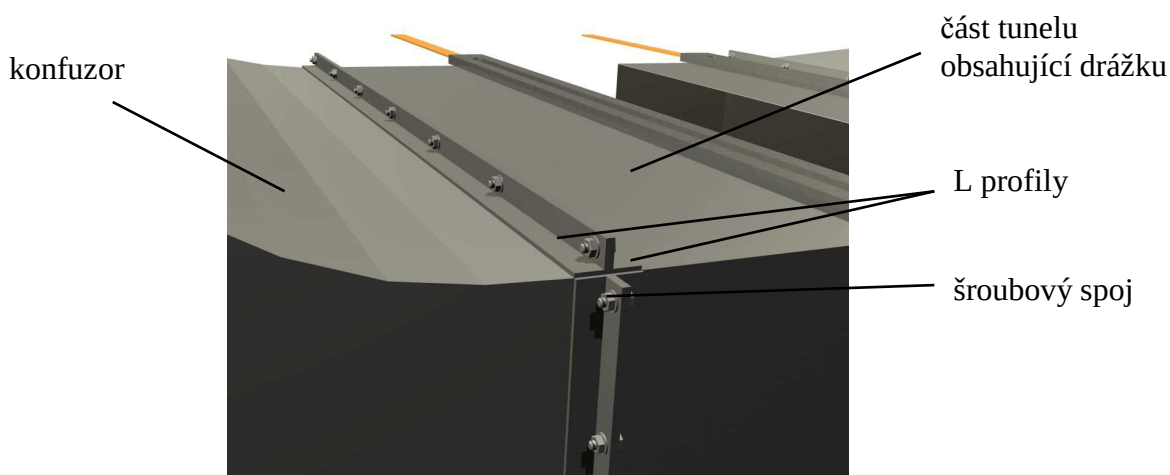
Upnutí difuzoru je stejné jako u konfuzoru. Difuzor se upne pomocí L profilů k měřící sekci viz obr. (46).



Obr. 46 Upnutí difuzoru k měřící sekci

11.3 Spojení konfuzoru a difuzoru s částmi obsahující drážku pro sondu

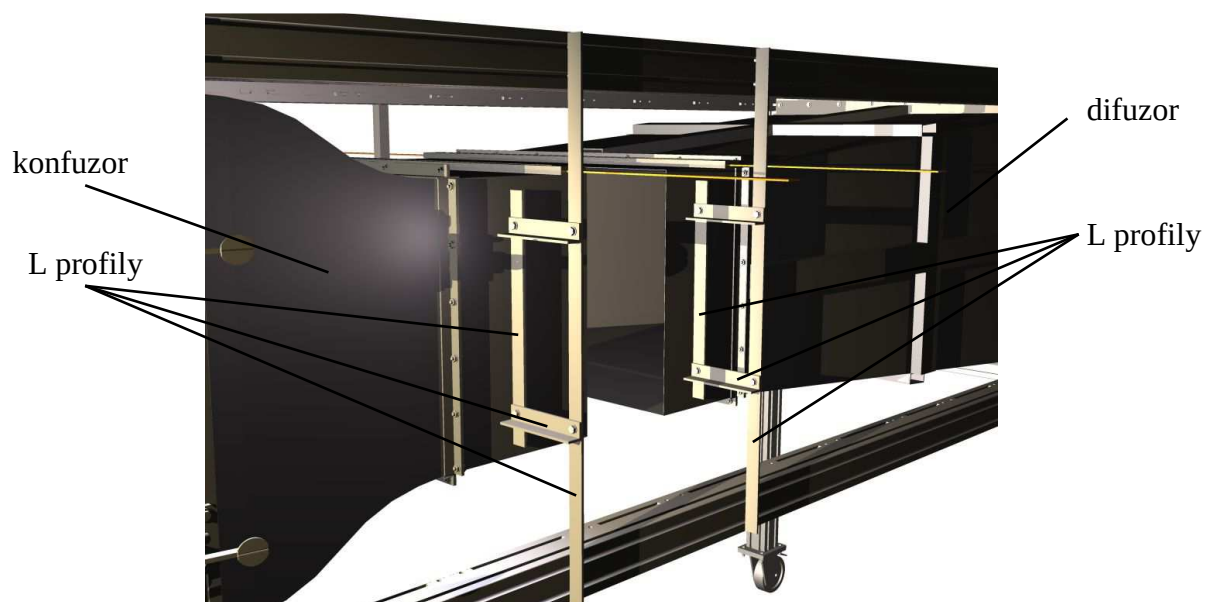
Část tunelu obsahující drážku pro Pitot-statickou sondu je spojena pomocí L profilů ke konfuzoru. L profily jsou připevněny ke konfuzoru a části s drážkou pomocí svarového spoje. Stáhnuty jsou k sobě pomocí šroubů a matic. Část s drážkou za chladičem je stejným způsobem spojena k difuzoru.



Obr. 47 Detail na spojení konfuzoru a části s drážkou

11.4 Návrh uchycení nepohyblivých konců tunelu k měřicí sekci

Konce nepohyblivých částí tunelů jsou uchyceny pomocí soustavy L profilů k měřicí sekci, tak aby nedocházelo k jejich kmitání způsobené vnějším zatížením od toku vzduchu. Detail uchycení můžeme vidět na obr. (48). K tunelu je L profil připevněn pomocí svarového spoje a k měřicí sekci je uchycen šroubovým spojem.



Obr. 48 Detail na uchycení nepohyblivých konců tunelu

12 Finanční odhad:

Do finančního odhadu není zahrnuta cena dělení materiálu, ohýbaní plechů, ruční a svařovací práce, a to z důvodu časové náročnosti při hledání těchto informací.

Tabulka 7.1: Finanční odhad zástavby chladiče	
Položka	Cena [Kč]
Plech 3x2500x1500	1500
Plech 1x1000x2000	483
Hliníková lepicí páska	112
Polyetylenový pytel	149
Výztuhy k difuzoru	61
Jekl L 15x15x2 - 8000	115
Jekl L 20x20x3 - 5000	122
Jekl L 35x15x3 - 5000	140
Tyč plochá 40x6 - 2700	82
Tyč plochá 25x10 - 4800	143
Šroub se šest.hlavou M5 (88)	18,48
Matice M5 (16 kusů)	1,28
Matice M4 (64 kusů)	3,84
Podložka 5 (96 kusů)	4,8
Podložka 4 (116 kusů)	3,48
CELKEM	2 938,88

Závěr:

V této bakalářské práci bylo navrženo možné konstrukční řešení projektu, který se bude realizovat. Jedná se o jedinečný projekt, který nemá doposud ve světě konkurenci. Při návrhu konstrukčního řešení nebylo v podstatě z čeho vycházet.

Mým cílem bylo vytvořit návrh na uchycení chladiče do měřicí sekce, tak aby byl možný jeho posuv v axiálním směru a bylo možné měřit aerodynamické síly a momenty, které na chladič působí od vnějšího zatížení, způsobené tokem vzduchu.

V práci byly navrženy tři konstrukčně realizovatelné varianty a po jejich z analyzování byla vybrána ta nejvýhodnější, po stránce ekonomické a konstrukčně jednoduché.

Dále byly navrženy statické části, které usměřňují tok vzduchu na chladič a vhodně od něj. Pro navedení toku vzduchu na chladič byl navržen konfuzor, u kterého bylo nutné zajistit, aby proudící tok vzduchu z měřicí sekce vstupoval ke chladiči hladce, tzn. plochy na vstupu a výstupu konfuzoru musely být tečné k toku vzduchu. Dále byl navržen difuzor pro výstup toku vzduchu od chladiče. Při jeho návrhu bylo dodrženo předepsaných otevírajících se úhlů $\alpha_D/2 = 5^\circ$ dle dostupné literatury.

Dále byl proveden návrh těsnění pro pohyblivou Pitot-statickou trubici, která měří celkové a statické tlakové rozložení v činném průřezu chladiče před a za ním. Těsnění bylo uchyceno na přídatné části tunelu obsahující drážku pro pohyblivou trubici. Přídatné části byly pevně uchyceny ke konfuzoru a difuzoru pomocí přírub.

Jednotlivé dílčí části (konfuzor, difuzor, přídatné členy a masky chladiče) byly pevnostně nadimenzovány k meznímu stavu ztráty stability plechu, při uvažování maximálně možného zatížení způsobené rozdílem statických tlaků vně a uvnitř tunelu. U návrhu tloušťky plechů byla snaha docílit toho, aby jednotlivé části měli stejnou tloušťku z důvodu většího využití zakoupeného polotovaru. Tloušťky dílčích částí před a za chladičem se liší o 2 mm. Tento rozdíl je způsoben tlakovými ztrátami chladiče při rychlosti toku vzduchu 98,2 m/s. U jednotlivých částí tunelu byl proveden výpočet tlakových ztrát, které byly kvůli nízkým hodnotám zanedbány.

Na závěr byl proveden stručný finanční odhad, ze kterého vyplývá, v jakých hodnotách se bude pohybovat zástavba chladiče.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HERNÁNDEZ, M., A. LÓPEZ a A. JARZABEK a kol. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. In: *Wind tunnel designs and their diverse engineering applications*. Chorvatsko: Iva Simcic, 2013. Kapitola 1, s. 13-29. ISBN 978-51-1047-7.
- [2] LAJZA, O. *Aircraft engine cooling system testing* (prezentace). Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 21. 2. 2014.
- [3] ŠTĚTINA, J. *Termomechanika* (přednáška). Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 8. 4. 2014.
- [4] ŠTIGLER, J. *Hydromechanika* (přednáška). Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 8. 4. 2014.
- [5] SHIGLEY, J., C. MISCHKE a R. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Nakladatelství VUT IUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [6] ČTVERÁK, J., V. MERTL a A. PÍŠTĚK. *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*. Brno: 1997
- [7] SVOBODA, P., J. BRANDEJS a F. PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. 4. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011. 228 s. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [8] SVOBODA, P., J. BRANDEJS a J. DVOŘÁČEK a kol. *Základy konstruování*. 4. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011. 236 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [9] LEINVEBER, J. a P. VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 4. vyd. Úvaly: Albra, 2008. 918 s. ISBN 978-80-7361-051-7
- [10] KONDOR. www.kondor.cz [online]. Copyright © 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/l-20x20x3/d-77889/>
- [11] KONDOR. www.kondor.cz [online]. Copyright © 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/jekl-l-15x15x2/d-78896/>
- [12] DAMA. www.hutni.idama.cz [online]. Copyright © 2012 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://hutni.idama.cz/jekl-50-x-20-x-2-157/>

- [13] NYPRO. www.nyprohutni.cz [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://nyprohutni.cz/valcovane-za-studena>
- [14] SALZGITER. www.salzgitter.cz [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.salzgitter.cz/index.php?page=33>
- [15] ALFUN. www.alfun.cz [online]. © Copyright 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/tyce-a-profily>
- [16] FERONKA. www.feronka.cz [online]. © Copyright 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.feronka.cz/inpage/plechy/>

Seznam použitých symbolů

Značka	Jednotka	Fyzikální veličina
$\dot{m}_1$	[kg/s]	Hmotnostní tok na začátku konf.
$\dot{m}_2$	[kg/s]	Hmotnostní tok na začátku konf.
$\hat{p}_k$	[Pa]	Vnější zatížení na stěny konfuzoru
$\hat{p}_M$	[Pa]	Vnější zatížení na zadní masku
$\widehat{p_{DIF}}$	[Pa]	Vnější zatížení na plochy difuzoru
$\widehat{p_{PS1}}$	[Pa]	Vnější zatížení na před. čl. s drážkou
$\widehat{p_{PS2}}$	[Pa]	Vnější zatížení na zad. čl. s drážkou
Δp_D	[Pa]	Tlakové ztráty v difuzoru
Δp_{CH}	[Pa]	Tlakové ztráta chladiče
$p_{pod,max,K}$	[Pa]	Maximální podtlak v konfuzoru
p_{s3}	[Pa]	Statický tlak na začátku difuzoru
$t_{min,D}$	[mm]	Min. tloušťka plechu difuzoru
$t_{min,K}$	[mm]	Min. tloušťka plechu konfuzoru
$t_{min,M}$	[mm]	Min. tloušťka plechu masky
$t_{min,PS1}$	[mm]	Min. tloušťka plechu před. části s dr.
$t_{min,PS2}$	[mm]	Min. tloušťka plechu zad. Části s dr.
ξ_D	[-]	Koef. tlakových ztrát v difuzoru
ξ_f	[-]	Pomocný součinitel u difuzoru
ξ_M	[-]	Koef. tlak. ztrát v měřící sekci
σ_D	[Mpa]	Dovolené napětí
σ_N	[Mpa]	Normální napětí
Δp_k	[Pa]	Tlakové ztráty v konfuzoru
Δp_M	[Pa]	Tlakové ztráty v měřící sekci
a	[m/s]	Rychlost zvuku
a_D	[mm]	Délka plechu difuzoru
a_k	[mm]	Délka plechu u konfuzoru
a_M	[mm]	Délka plechu masky
a_{PS1}	[mm]	Délka plechu přední části s dražkou
a_{PS2}	[mm]	Délka plechu zadní části s dražkou
A_s	[mm ²]	Výpočtový průřez šroubu
b_D	[mm]	Výška plechu difuzoru
b_{D3}	[mm]	Vstupní parametr difuzoru
b_{D4}	[mm]	Výstupní parametr difuzoru
b_k	[mm]	Výška plechu u konfuzoru
b_{k1}	[mm]	Vstupní parametr konfuzoru
b_{k2}	[mm]	Výstupní parametr konfuzoru
b_M	[mm]	Výška plechu masky
b_{PS1}	[mm]	Výška plechu přední části s dražkou
b_{PS2}	[mm]	Výška plechu zadní části s dražkou

D_H	[m]	Hydraulický průměr
F_i	[N]	Tahová síla působící na jeden šroub
F_K	[N]	Síla působící na konf. v axial. směru
$g_{1,D}$	[-]	Koeficient získaný z tab. pro dif.
$g_{1,PS1}$	[-]	Koeficient získaný z tab. přední člen
$g_{1,PS2}$	[-]	Koeficient získaný z tab. zadní člen
g_{1k}	[-]	Koeficient získaný z tab. pro konf.
g_{1M}	[-]	Koeficient získaný z tab. pro masku
i	[-]	Počet šroubů
k	[-]	Součinitel bezpečnosti
L_{Ko}	[mm]	Optimální délka konfuzoru
L_{Ks}	[mm]	Skutečná délka konfuzoru
L_M	[m]	Celková délka měřicí sekce
M	[-]	Machovo číslo
N	[-]	Zužující poměr
O_m	[m]	Omočený obvod
p_{atm}	[Pa]	Atmosferický tlak
p_c	[Pa]	Celkový tlak
p_{s1}	[Pa]	Statický tlak na začátku konfuzoru
p_{s2}	[Pa]	Statický tlak na konci konfuzoru
p_{s4}	[Pa]	Statický tlak na konci difuzoru
r	[J/kg.K]	Měrná plynová konstanta
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R_m	[Mpa]	Mez pevnosti
S_1	[mm ²]	Vstupní plocha konfuzoru
S_2	[mm ²]	Výstupní plocha konfuzoru
S_{D1}	[m ²]	Plocha difuzoru v užší části
S_{D2}	[m ²]	Plocha difuzoru v širší části
T	[K]	Teplota
t	[s]	Čas
v	[m ³ /kg]	Měrný objem
w_1	[m/s]	Rychlost na začátku konfuzoru
w_2	[m/s]	Rychlost na konci konfuzoru
w_3	[m/s]	Rychlost toku vzduchu za chladičem
w_s	[m/s]	Rychlost toku vzduchu
Y_{12}	[J/kg]	Měrná energie
α_D	[°]	Otevírající se úhel difuzoru
α_k	[°]	Zužující se úhel konfuzoru
β_k	[°]	Zužující se úhel konfuzoru
η	[-]	Součinitel rezervy
κ	[-]	Poissonova konstanta
λ	[-]	Třecí ztrátový součinitel
ν	[m/s ²]	Kinematická viskozita
ξ_K	[-]	koeficient tlakových ztrát v konf.

ρ	$[\text{kg/m}^3]$	Hustota
σ	$[\text{Mpa}]$	Maximální napětí

Přílohy

Seznam výkresové dokumentace:

Název výkresu	Číslo výkresu	Formát
SEZNAM POLOŽEK-TUNEL	4-3B/18-00	2 x A4
VÝKRES SESTAVY-TUNEL	1-3B/18-00	A1
KONFUZOR-SVAREK	3-3B/18-01	A3
DIFUZOR-SVAREK	3-3B/18-02	A3
MASKA CHLADIČE	3-3B/18-03	A3
PŘEDNÍ ČLEN S DRÁŽKOU SV.	3-3B/18-04	A3
ZADNÍ ČLEN S DRÁŽKOU SV.	3-3B/18-05	A3
TĚSNĚNÍ SONDY-HORNÍ DESKA	4-3B/18-06	A4
TĚSNĚNÍ SONDY-SPODNÍ DESKA	4-3B/18-07	A4

CD s následující obsahem

- Bakalářská práce ve formátu pdf
- Všechny výkresy v pdf
- 3D model sestavy ve formátu STP (model sestavy neobsahuje matice do drážek měřící sekce)