

# **Analýza proudění výfukových plynů tlumičem výfuku**

Bc. Dominik Horníček

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Horníček**

Osobní číslo: **T11791**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Analýza proudění výfukových plynů tlumičem výfuku**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na dané téma
2. Vytvořte 3D model výfuku
3. Proveďte simulace proudění pro různá konstrukční řešení výfuku
4. Zpracujte a analyzujte získané výsledky

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle zadání vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Maloch, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je pomocí simulačního softwaru vyhodnotit proudění výfukových plynů tlumičem výfuku. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části bude popsán princip funkce spalovacích motorů, výfukového systému. Dále budou objasněny termodynamické děje probíhající v tlumiči výfuku, jako jsou tlakové změny a přestup tepla. V praktické části bude nejdříve vytvořen 3D model výfuku. Poté bude simulováno proudění výfukových plynů tímto výfukem a budou okomentovány získané výsledky.

Klíčová slova: Výfukový systém, Tlumič výfuku, SolidWorks, Flow Simulation

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to analyze the flow of exhaust gasses in the muffler of exhaust system. The thesis is divided into theoretical and practical parts. In theoretical part will be described principle of the combustion engine and exhaust system. In next step will be described thermodynamic processes in muffler like change of pressure and heat transfer. In the practical part will be created 3D model of muffler. Then will be simulated flow of exhaust gasses in this model.

Keywords: Exhaust system, Muffler, SolidWorks, Flow Simulation

Děkuji panu Ing. Jaroslavu Malochovi CSc. za čas, trpělivost a odbornou pomoc, která mi byla poskytnuta při psaní této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MECHANISMY PŘENOSU TEPLA</b> .....	<b>12</b>
1.1 VEDENÍ - KONDUKCE .....	12
1.2 PROUDĚNÍ - KONVENCE .....	13
1.2.1 Přirozená (volná) konvekce.....	15
1.2.2 Nucená konvekce .....	15
1.2.3 Součinitel konvence tepla .....	15
1.3 ZÁŘENÍ.....	17
1.3.1 Černé těleso .....	18
1.3.2 Ozáření: .....	18
1.3.3 Zářivost: .....	18
1.3.4 Pohltivost ( $Q_A$ ): .....	18
1.3.5 Odrazivost ( $Q_R$ ):.....	19
1.3.6 Propustnost ( $Q_D$ ): .....	19
1.3.7 Intenzita vyzařování (E):.....	19
1.3.8 Vyzařování (e):.....	20
<b>2 TERMODYNAMICKÉ DĚJE V MOTORU</b> .....	<b>21</b>
2.1 TEPELNÝ STROJ .....	21
2.2 TEPELNÝ MOTOR .....	21
2.2.1 Carnotův motor .....	21
<b>3 PROUDĚNÍ V POTRUBÍ</b> .....	<b>25</b>
3.1 BERNOULLIOVA ROVNICE.....	25
3.2 PROUDĚNÍ VZDUCHU POTRUBÍM .....	26
3.3 TLAKOVÉ ZTRÁTY PŘI PRŮCHODU POTRUBÍM .....	27
3.3.1 Tlakové ztráty třením .....	27
3.4 TLAKOVÉ POMĚRY V POTRUBNÍ SÍTI .....	29
<b>4 PÍSTOVÉ SPALOVACÍ MOTORY</b> .....	<b>30</b>
4.1 DVOUDOBY SPALOVACÍ MOTOR .....	31
4.1.1 Princip činnosti.....	31
4.2 ČTYŘDOBY SPALOVACÍ MOTOR .....	32
4.2.1 Pracovní oběh čtyřdobého zážehového motoru .....	32
<b>5 VÝFUKOVÝ SYSTÉM</b> .....	<b>35</b>
5.1 VÝFUKOVÉ SVODY .....	36
5.2 KATALYZÁTORY .....	36
5.2.1 Katalyzátory keramické .....	36
5.2.2 Katalyzátory kovové .....	37
5.3 TLUMIČ VÝFUKU .....	37
5.3.1 Rezonanční tlumič.....	37
5.3.2 Interferenční tlumič.....	38
5.3.3 Tlumič s rozvětvenými rezonátory.....	39
5.3.4 Absorpční tlumič .....	39



<b>6</b>	<b>VŠEOBECNÉ TECHNICKÉ ŘÁDY - MOTOCYKL.....</b>	<b>40</b>
6.1	VOLNOST KONSTRUKCE .....	40
6.2	MĚŘENÍ OBJEMU VÁLCŮ .....	40
6.3	VÝFUKOVÉ POTRUBÍ.....	41
6.4	TECHNICKÉ ŘÁDY – PLOCHÁ DRÁHA .....	41
6.4.1	Třídy .....	41
6.4.2	Všeobecná specifikace .....	42
6.4.3	Výfukové potrubí .....	42
<b>7</b>	<b>KONTROLA HLUKU .....</b>	<b>45</b>
7.1	AKUSTIKA .....	45
7.1.1	Zvuk .....	45
7.1.2	Sluchový vjem zvukového signálu.....	45
7.2	HLUK MOTOCYKLŮ .....	47
7.3	METODA MAX METR.....	48
	<b>SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>49</b>
	<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....</b>	<b>51</b>
8.1	TOK PŘES KRUHOVÝ VÁLEC.....	52
<b>9</b>	<b>NASTAVENÍ ANALÝZY VE FLOW SIMULATION.....</b>	<b>56</b>
9.1	VYTVORENÍ MODELU .....	56
9.2	VYTVORENÍ PROJEKTU .....	59
9.3	DEFINICE JEDNOTEK .....	60
9.4	DEFINICE TYPU ANALÝZY .....	61
9.5	DEFINICE PROUDÍCÍHO MÉDIA .....	62
9.6	DEFINICE MATERIÁLU TLUMIČE VÝFUKU.....	62
9.7	DEFINICE POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK .....	63
9.8	DEFINICE SÍTĚ .....	64
9.9	DEFINICE OBLASTI VÝPOČTU .....	65
9.10	DEFINICE VNITŘNÍHO PROUDĚNÍ VE VÝFUKU.....	66
9.11	DEFINICE CÍLŮ ANALÝZY.....	68
<b>10</b>	<b>VÝPOČET .....</b>	<b>71</b>
<b>11</b>	<b>VÝSLEDKY PRO 1. TYP VÝFUKU: BEZ UCPÁVKY.....</b>	<b>72</b>
11.1	CUT PLOTS .....	72
11.1.1	Cut plot: Turbulent Intensity .....	73
11.1.2	Cut plot: Turbulent Energy .....	74
11.1.3	Cut plot: Temperature .....	75
11.1.4	Cut plot: Dynamic Pressure .....	77
11.1.5	Surface plot: Temperature (Solid).....	78
11.2	FLOW TRAJECTORIES .....	79
11.2.1	Flow Trajectories: Velocity.....	80
<b>12</b>	<b>VÝSLEDKY PRO 2. TYP VÝFUKU: S UCPÁVKOU.....</b>	<b>81</b>
12.1	CUT PLOTS .....	81
12.1.1	Cut plot: Turbulent Intensity .....	82

12.1.2	Cut plot: Turbulent Energy .....	83
12.1.3	Cut plot: Temperature .....	84
12.1.4	Cut plot: Dynamic Pressure .....	86
12.2	SURFACE PLOT .....	87
12.2.1	Surface plot: Temperature (Solid).....	87
12.3	FLOW TRAJECTORIES .....	88
12.3.1	Flow Trajectories: Velocity.....	88
<b>13</b>	<b>VÝSLEDKY PRO 3. TYP VÝFUKU: S UCPÁVKOU, DÍRY 5 MM.....</b>	<b>89</b>
13.1	CUT PLOTS .....	89
13.1.1	Cut plot: Turbulent Intensity .....	90
13.1.2	Cut plot: Turbulent Energy .....	91
13.1.3	Cut plot: Temperature .....	92
13.1.4	Cut plot: Dynamic Pressure .....	94
13.2	SURFACE PLOT .....	95
13.2.1	Surface plot: Temperature (Solid).....	95
13.3	FLOW TRAJECTORIES .....	96
13.3.1	Cut plot: Velocity .....	96
<b>14</b>	<b>POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH HODNOT POMOCÍ GOALS PLOT .....</b>	<b>97</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>100</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>102</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>104</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>107</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>108</b>

## ÚVOD

Problematika řešení výfukového systému je věčný boj mezi požadavky ekologickými, kdy je nutno používat katalyzátor a tlumič (snížení hluku a znečištění prostředí) a požadavky výkonnostními, kdy vynechání tlumiče zvyšuje výkon stroje. Efektivita tlumiče výfuku spočívá v komplexní kombinaci mnoha parametrů. Jeho hlavní funkcí je utlumit hluk vzniklý prací výfukových plynů. Taktéž se v něm chladí výfukové plyny přestupem tepla přes stěnu výfuku do okolí. Z hlediska počítačových simulací je řešení výfuku velmi zajímavou úlohou jelikož zde lze sledovat velké množství parametrů od prostého ochlazení výfukových spalin až po tlakové změny a turbulence uvnitř a vně výfuku.

V této práci bude řešeno konstrukční uspořádání vnitřní části tlumiče na plochodrážní motocykl. Nejdříve bude v programu SolidWorks sestaven co nejpřesnější model průchozího výfuku, který byt dříve používán v praxi ale následně byl zakázán z důvodu vysoké hladiny hluku. Tento výfuk měl určité problémy se správným ochlazením výfukových plynů. Proto bude využit simulační software k analýze problému a nástinu jeho adekvátního řešení.

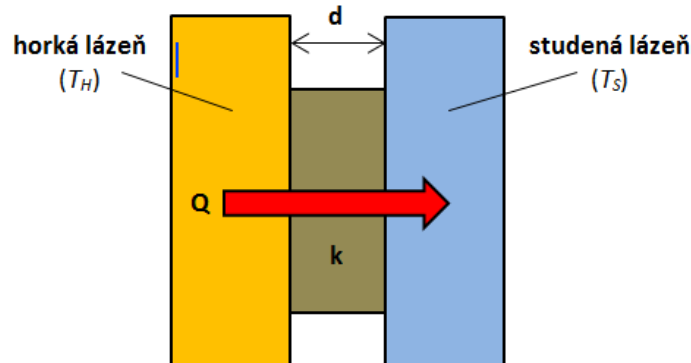
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MECHANISMY PŘENOSU TEPLA

Existují tři mechanismy přenosu tepla a to vedení, proudění a záření. Všechny tyto tři mechanismy se plně projevují u výfukového systému, kdy se teplo výfukových plynů přenáší vedením přes stěny trubek výfuku, které se tímto ohřívají, do okolí.

## 1.1 Vedení - Kondukce

Vedení je způsob přenosu tepla, při kterém se tepelná energie přesouvá z jednoho bodu do jiného pomocí interakce mezi atomy nebo molekulami hmoty. Vedení se vyskytuje v pevných tělesech, kapalinách a plynech. Při vedení nenastává žádný hromadný pohyb hmoty. Plyny přenáší teplo přímými srážkami mezi nabitými molekulami a jejich tepelná vodivost je při porovnání s pevnými tělesy nízká, protože jde o řídké hmoty. Vedení energie v kapalinách je stejné jako v plynech, ale situace je podstatně složitější, protože mezi molekulami jsou menší vzdálenosti a molekulární silová pole mají velký vliv na výměnu energií při procesu srážky. Nekovová pevná tělesa přenáší teplo vibrací v prostorové mřížce, takže při přenosu tepla nedochází k žádnému pohybu hmoty. Při běžných teplotách jsou kovy lepšími tepelnými vodiči než nekovy, protože mají volné elektrony, které přenáší tepelnou energii. [12]



Obr. 1. Přenos tepla z nádrže o vyšší teplotě k lázni o nižší teplotě

Deska o průřezu  $S$  a tloušťce  $d$ , jejíž stěny jsou udržovány na nepříliš rozdílných teplotách  $T_H$  a  $T_S$  tepelnými lázněmi (horkou a studenou) viz. obz.. Teplo  $Q$ , které je přeneseno deskou za dobu  $t$  od horké stěny ke studené. Pokus ukázal, že tepelný tok  $H$  (množství tepla za jednotku času) je dán vztahem: [12]

$$H = \frac{Q}{t} = k \cdot S \cdot \frac{T_H - T_S}{d} \quad (1)$$

kde veličina  $k$ , nazývaná součinitel tepelné vodivosti, je konstanta charakteristická pro materiál desky. Dobrý vodič tepla má vysokou hodnotu  $k$  a naopak. V následující tabulce se uvádí hodnoty tepelné vodivosti (W/m.K) při teplotě (K) pro vybrané materiály: [12]

Tab. 1: Závislost tepelné vodivosti (W/m.K) při teplotě (K) pro vybrané materiály [12]

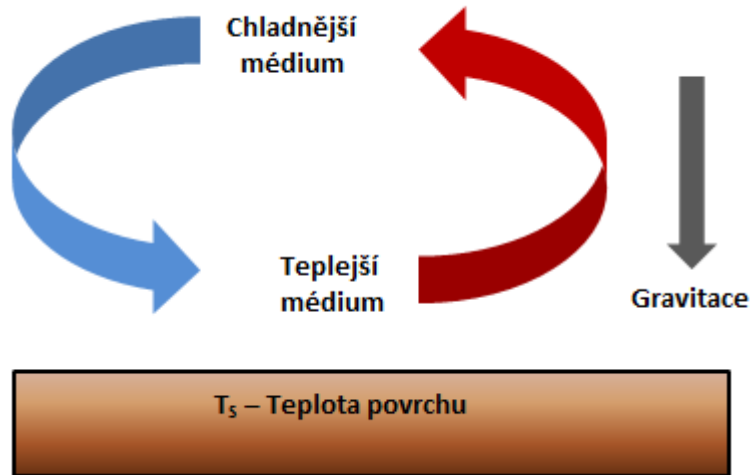
Kov	Teplota (K)							
	103	173	273	373	473	573	673	873
Nerezová ocel				15	17	19	21	25
Olovo	40	37	36	34	33	32	17 (tekuté)	20 (tekuté)
Platina	78	73	72	72	72	73	74	77
Zinek	124	122	122	117	110	106	100	60 (tekutý)
Křemík	856	342	168	112	82	66	54	38

## 1.2 Proudění - Konvence

Konvekce je způsob převodu tepla, kde se teplo převádí mezi povrchem tělesa a sousedící pohyblivou kapalinou (nebo plynem). Konvekce má dvě složky: [12]

- převod energie způsobený náhodným pohybem molekul (difúzí),
- převod energie pohybem objemu neboli makroskopickým pohybem kapaliny (advekce).

Mechanismus konvekce lze vysvětlit následujícím způsobem: když se vrstva kapaliny sousedící s horkým povrchem zahřívá, její hustota se snižuje (za konstantního tlaku je hustota nepřímo úměrná teplotě) a začne na ni působit vztlak. Studenější (těžší) kapalina u povrchu nahrazuje teplejší kapalinu a dochází k cirkulaci. [12]



Obr. 2. Princip sdílení tepla prouděním

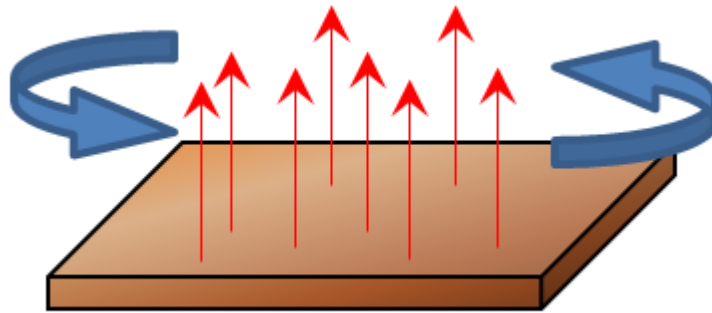
Míra převodu tepla mezi kapalinou o teplotě  $T_F$  a povrchem tělesa o teplotě  $T_S$  se řídí Newtonovým zákonem ochlazování, který lze napsat takto: [12]

$$Q_{KONVENCE} = h \cdot A \cdot (T_S - T_F) \quad (2)$$

kde  $h$  je součinitel konvekce převodu tepla. Jednotkami  $h$  jsou  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ . Součinitel konvekce převodu tepla ( $h$ ) závisí na pohybu kapaliny, geometrii a termodynamických a fyzikálních vlastnostech. Obecně existují dva způsoby převodu tepla konvencí a to přirozená neboli volná a nucená. [12]

### 1.2.1 Přirozená (volná) konvekce

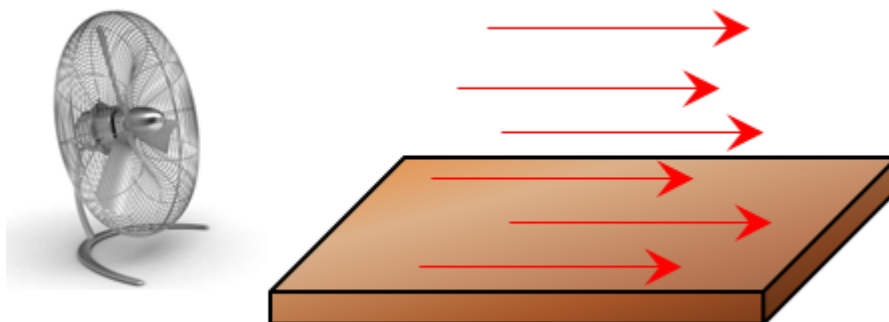
Pohyb kapaliny sousedící s povrchem tělesa je způsoben vztlakovými silami vyvolanými změnami hustoty kapaliny kvůli rozdílům v teplotě mezi tělesem a kapalinou. Když je horká deska nechána vychladnout na vzduchu, částice vzduchu u povrchu desky se zahřívají, jejich hustota se snižuje, a proto stoupají vzhůru. [12]



Obr. 3. Princip sdílení tepla volnou konvencí

### 1.2.2 Nucená konvekce

Pro urychlení proudění kapaliny kolem povrchu tělesa se používají externí prostředky, například ventilátor nebo pumpa. Rychlý pohyb částic kapaliny kolem povrchu tělesa maximalizuje teplotní gradient a zvyšuje velikost tepelné výměny. Na následujícím obrázku vzduch nuceně proudí nad horkou deskou. [12]

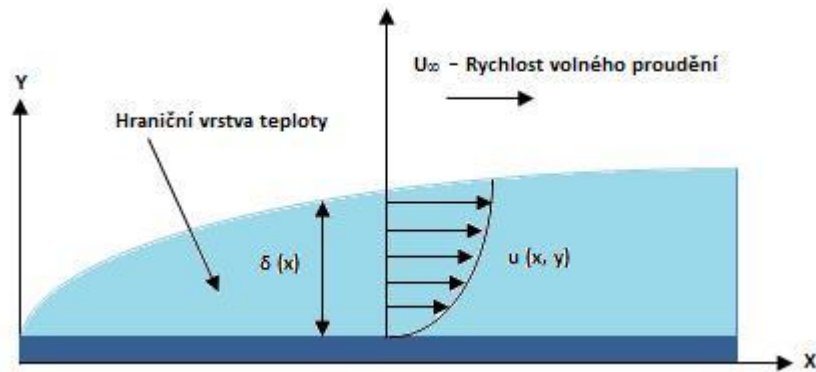


Obr. 4. Princip sdílení tepla nucenou konvencí

### 1.2.3 Součinitel konvence tepla

Konvekce je spojena s koncepcí hraniční vrstvy, což je tenká vrstva přechodu mezi povrchem, o kterém se předpokládá, že sousedí s nepohyblivými molekulami, a prouděním okolní kapaliny. Tato situace je vidět na následujícím obrázku proudění nad plochou deskou. [12]

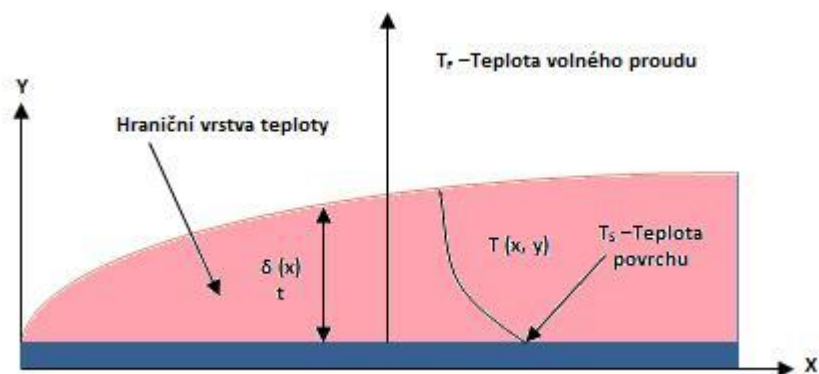




Obr. 5. Princip proudění kapaliny nad plochou deskou

kde  $u(x, y)$  je rychlost ve směru  $x$ . Oblast po vnější hranici vrstvy kapaliny definovaná jako 99 % rychlosti volného proudění se nazývá tloušťka hraniční vrstvy kapaliny  $d(x)$ .

Podobně by bylo možné vytvořit obrázek přechodu teploty z teploty povrchu na teplotu okolí. Na následujícím obrázku je schéma s různými teplotami. Všimněte si, že tloušťka hraniční vrstvy teploty není stejná jako tloušťka vrstvy kapaliny. Vlastnosti kapaliny tvořící Prandtlovo číslo řídí relativní velikost dvou typů hraničních vrstev. Prandtlovo číslo ( $Pr$ ) o velikosti 1 by znamenalo stejné chování pro obě hraniční vrstvy. [12]



Obr. 6. Princip přechodu z teploty povrchu na teplotu okolí při proudění nad plochou deskou

Převod tepla hraniční vrstvou vede teplo ve směru  $y$  přes nepohyblivou kapalinu vedle stěny a je roven míře konvekce z hraniční vrstvy do kapaliny. Tento jev je možné napsat následujícím způsobem: [12]

$$h \cdot A \cdot (T_S - T_F) = -k \cdot A \cdot \left(\frac{dT}{dy}\right) \cdot s \quad (3)$$

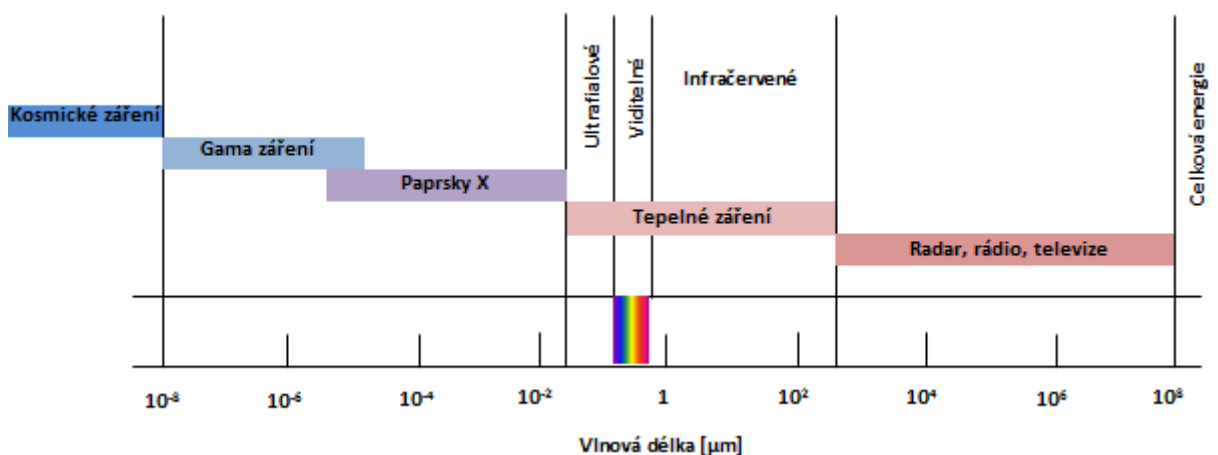
Součinitel konvekce pro danou situaci lze zjistit změřením převodu tepla a rozdílu teplot nebo změřením teplotního gradientu u povrchu a rozdílu teplot. Měření teplotního gradientu v hraniční vrstvě vyžaduje vysokou přesnost a obvykle se provádí ve výzkumné laboratoři. Mnoho příruček obsahuje tabulky součinitelů konvekce převodu tepla pro různé konfigurace. [12]

Tab. 2: Hodnoty součinitele konvekce převodu tepla pro některé materiály

Médium	Součinitel převodu tepla $h$ ( $W/m^2.K$ )
Vzduch (přirozená konvence)	5 - 25
Vzduch/ přehřátá pára (nucená konvence)	20 - 300
Olej (nucená konvence)	60 - 1800
Voda (nucená konvence)	300 - 6000
Voda (vařící)	3000 - 60000
Pára (kondenzující)	6000 - 120000

### 1.3 Záření

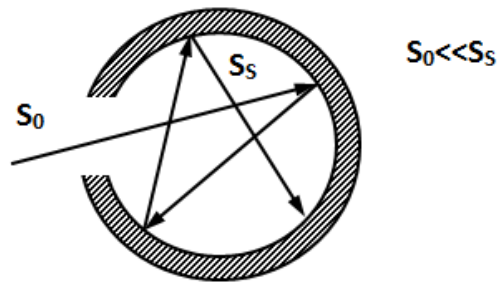
Tepelné záření je tepelná energie vyzařovaná tělesy ve formě elektromagnetických vln kvůli jejich teplotě. Všechna tělesa s teplotami nad absolutní nulou vyzařují tepelnou energii. Protože elektromagnetické vlny se šíří i ve vakuu, není pro záření nutné žádné médium. Na následujícím obrázku je rozsah vlnových délek tepelného záření srovnán se zářením vyzářeným jinými prostředky (paprsky X, paprsky g, kosmické záření atd). Tepelná energie Slunce se dostává na Zemi zářením. Protože elektromagnetické vlny se pohybují rychlostí světla, záření je nejrychlejší způsob převodu tepla. [12]



Obr. 7. Rozsah vlnových délek tepelného záření

### 1.3.1 Černé těleso

Ideální zářič, vyzařuje a absorbuje maximální možné množství záření s libovolnou teplotou a na libovolné vlnové délce. Příkladem černého tělesa je malý otvor v zahřáté dutině. [12]



Obr. 8. Příklad černého tělesa

Zářivost černého tělesa se vypočítá z rovnice:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (4)$$

nebo z S-F zákona:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (5)$$

kde  $T$  označuje teplo,  $C_0$  je emisní konstanta černého tělesa a  $\sigma$  je Stefan-Boltzmanova konstanta.

### 1.3.2 Ozáření:

Míra záření dopadajícího na povrch ze všech směrů na jednotku plochy.

### 1.3.3 Zářivost:

Míra, kterou záření opouští povrch kvůli vyzařování a odrazu ve všech směrech na jednotku plochy povrchu.

### 1.3.4 Pohltivost ( $Q_A$ ):

Část dopadajícího záření absorbovaná povrchem.

$$A = \frac{Q_A}{Q} \quad (6)$$

### 1.3.5 Odrazivost ( $Q_R$ ):

Část dopadajícího záření odražená povrchem. Odrazivost černého tělesa je rovna nule.

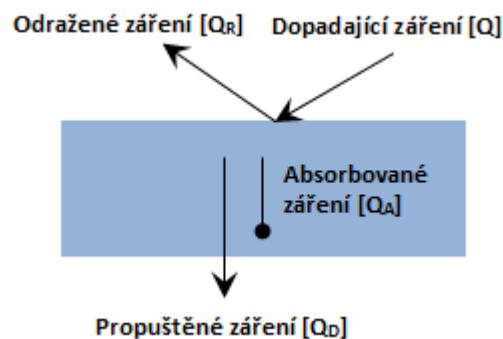
$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad (7)$$

### 1.3.6 Propustnost ( $Q_D$ ):

Část dopadajícího záření propuštěná povrchem. Software předpokládá, že propustnost je nulová. Mezi pohltivostí, odrazivostí a propustností povrchu je následující vztah:

$$A + R + D = 1. \quad (8)$$

$$D = \frac{Q_D}{Q} \quad (9)$$



Obr. 9. Schéma působení záření na povrch tělesa

### 1.3.7 Intenzita vyzařování (E):

Intenzita záření vyzářená povrchem ve všech směrech na jednotku plochy povrchu a vypočítá se: [12]

$$E = \frac{dQ}{dS} [W \cdot m^2] \quad (10)$$

**1.3.8 Vyzařování (e):**

Poměr energie vyzařování povrchu k energii vyzařování černého tělesa stejné teploty: [12]

$$e = \frac{E}{E_b} \quad (11)$$

,kde  $E_b$  je energie vyzařování černého tělesa stejné teploty. Vyzařování povrchu je funkcí teploty. [12]

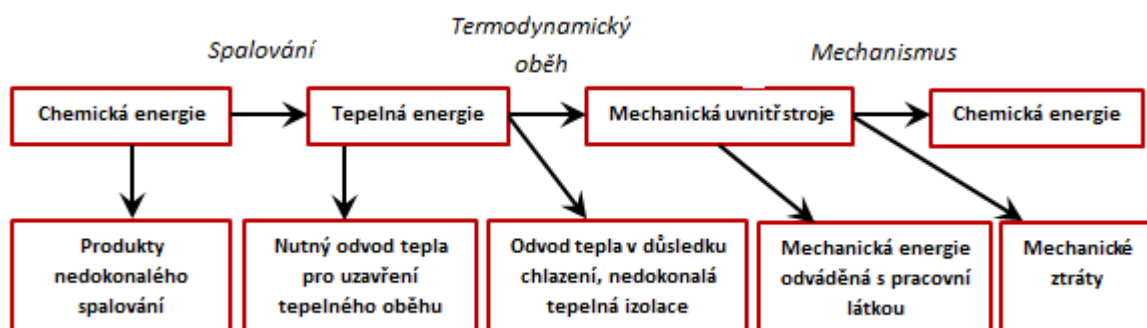
## 2 TERMODYNAMICKÉ DĚJE V MOTORU

### 2.1 Tepelný stroj

Je to takový stroj, který se svým okolím vyměňuje teplo a práci. Může to být tepelný motor, který s okolím vyměňuje teplo a dodává práce nebo například chladnička a tepelné čerpadlo. Těm je dodávána práce, aby odebírali teplo chladnější lázni a dodávali ho lázni teplejší. Může to být i kombinace uvedených strojů jako je například plynová chladnička, kde je dodáváno teplo k tomu, aby se přečerpalo z chladnější lázně do teplejší. [9]

### 2.2 Tepelný motor

Je to zařízení, které odebírá ze svého okolí teplo a koná užitečnou práci. Srdcem takového stroje je pracovní látka. V parním stroji je pracovní látkou voda, a to jak kapalném tak i pára. V automobilovém motoru je pracovní směs benzínových par a vzduchu, a to spálená i nespálená. Stroj má pracovat trvale, ne jednorázově. Předpokládá se proto, že probíhá cyklus, to znamená, že pracovní látka prochází jistou posloupností termodynamických stavů. Děje mezi nimi jsou nazývány takty. Na konci každého cyklu se stroj vrátí do výchozího stavu. [9]

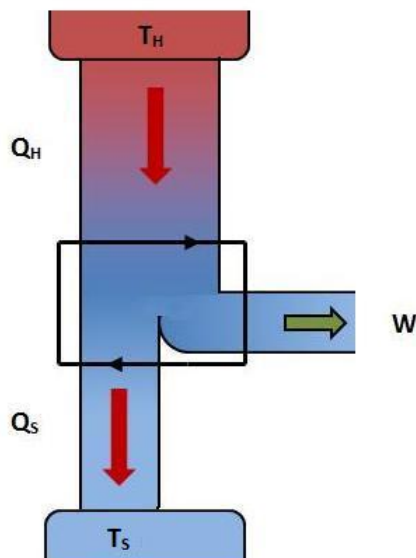


Obr. 10. Transformace energie ve spalovacím motoru

#### 2.2.1 Carnotův motor

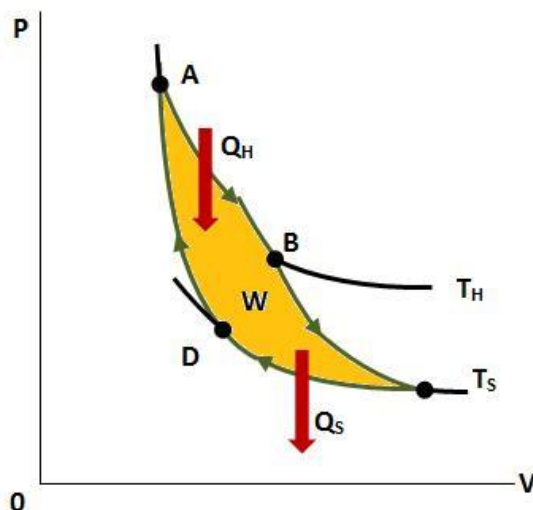
Tuto ideu formuloval poprvé francouzský vědec a inženýr Sadi Nicolas Léonard Carnot v roce 1824 a tedy ještě dříve než byl vůbec formulován první zákon termodynamiky a než byl zaveden pojem entropie. Tento stroj v principu převádí teplo na práci s nejvyšší účinností. Na obrázku je ukázána schematicky činnost Carnotova motoru, kdy během každého pracovního cyklu pohltí pracovní látka teplo  $|Q_H|$  z tepelné lázně za stálé teploty  $T_H$  a předá studenější tepelné lázni teplo  $|Q_S|$  za stále nižší teploty  $T_S$  ( $H =$  horká,  $S =$  studená). Smyč-

ka se dvěma černými šipkami ve středu obrázku symbolizuje pracovní látku cyklického stroje a připomene  $p$ - $V$  diagram. [9]



Obr. 11. Schéma tepelného motoru

Další obrázek ukazuje  $p$ - $V$  diagram pro Carnotův cyklus. Jak ukazují šípky, cyklus probíhá po směru otáčení hodinových ručiček. Pracovní látka, která v tomto případě může být například plyn, je uzavřena ve válci s pístem. Obrázek také ukazuje, že pokud je dán válec do kontaktu s horkou lázní o teplotě  $T_H$ , přenáší se teplo  $|Q_H|$  z lázně do pracovní látky a plyn se izotermicky rozpíná z objemu  $V_A$  do objemu  $V_B$ . Podobně, je-li pracovní látka v kontaktu se studenou lázní o teplotě  $T_S$ , přenáší se teplo  $|Q_S|$  z pracovní látky do lázně a plyn se izotermicky stlačuje z objemu  $V_C$  do objemu  $V_D$ . Cyklus sestává ze dvou izotermických dějů AB, CD a dvou adiabatických dějů BC, DA. Zvýrazněná plocha uzavřená smyčkou má velikost rovnou práci, kterou Carnotův motor vykoná během jednoho cyklu. [9]



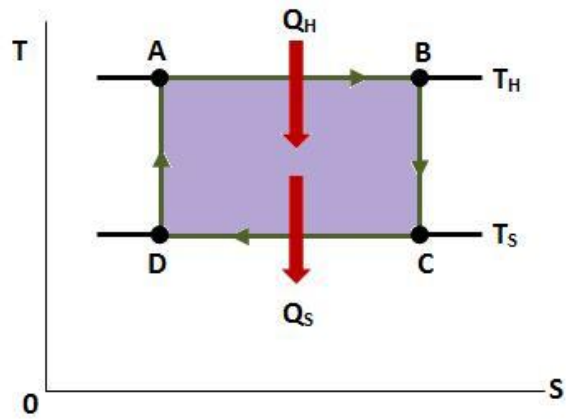
Obr. 12. *p-V diagram cyklu Carnotova motoru*

Ve stroji na obrázku 11 se předpokládá, že výměna tepla mezi pracovní látkou a lázněmi se koná výhradně během izotermických procesů AB a CD na obr. 12. Procesy zobrazené na obrázku čarami BC a DA, které spojují izotermy odpovídající teplotám  $T_H$  a  $T_S$ , musí být vratné adiabatické děje. Nepřenáší se tedy při nich žádná energie formou tepla. Aby to bylo zajištěno, je válec během těchto dějů umístěn do tepelné izolace. Píst se přitom pohybuje a plyn může vyměňovat práci s okolím. Během dějů AB a BC na předchozím obrázku se pracovní látka rozpíná a koná tedy kladnou práci zdviháním pístu. Tato práce je v obrázku zobrazena jako plocha pod křivkou ABC. Během dalších dvou dějů CD a DA se pracovní látka stlačuje, což znamená, že koná zápornou práci na svém okolí neboli že okolí koná kladnou práci tím, že stlačuje píst. Tato práce je na obrázku zobrazena plochou pod křivkou CDA. Celková práce během cyklu, která je označena  $W$ , je dána rozdílem mezi těmito dvěma plochami a je kladná. Je rovna ploše uzavřené cyklem ABCDA. Tato práce  $W$  koná na nějakém vnějším objektu, například na proměnné zátěži, kterou zvedáme. [9]

Pro znázornění změny entropie v Carnotově motoru byl znázorněn Carnotův Cyklus v  $T-S$  diagramu (proměnné teplota a entropie). Stavy označené jako A, B, C a D v obrázku 7 odpovídají týmž písmenům v obrázku 6. Dvě vodorovné čáry popisují izotermické děje v Carnotově cyklu (protože teploty jsou konstantní). Děj AB je izotermické rozpínání. Protože pracovní látka (vratně) přijímá během rozpínání teplo  $|Q_H|$  za stálé teploty  $T_H$ , roste její entropie. Podobně během izotermického stlačení CD předává pracovní látka (vratně) teplo  $|Q_S|$  za stálé teploty  $T_S$  a její entropie klesá. Dvě svislé čáry odpovídají



dvěma adiabatickým dějům Carnotova cyklu. Protože se během těchto dvou dějů nepřenáší žádné teplo, nemění se během nich entropie pracovní látky. [9]



Obr. 13. T-S diagram cyklu Carnotova motoru

### 3 PROUDĚNÍ V POTRUBÍ

Vypočet proudění vzduchu vychází z poznatků o proudění tekutin potrubím. Určujícími veličinami jsou teplota, hustota, rychlost a tlak média. Jestliže předpokládáme, že měrná tepelná kapacita vzduchu je nezávislá na tlaku a teplotě, tak platí stavová rovnice: [1]

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (12)$$

kde:

$p [Pa]$  ... tlak

$\rho [kg/m^3]$  ... hustota

$R [J/Kg.K]$  ... plynová konstanta

$T [K]$  ... termodynamická teplota

Rovnice kontinuity pro ustálené proudění:

$$M = \rho \cdot w \cdot S \quad (13)$$

kde:

$M [Kg/s]$  ... hmotnostní průtok

$S [m^2]$  ... průřez

$w [m/s]$  ... rychlost

V praxi se pro řešení úloh využívá věta o změně hybnosti a Bernoulliova rovnice.

#### 3.1 Bernoulliova rovnice

Byla poprvé popsána švýcarským fyzikem a matematikem Danielem Bernoullim v 18. století. Popisuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny v uzavřené trubici. Vyjadřuje závislost tlaku proudící kapaliny vzhledem k její rychlosti proudění neboli s rostoucí rychlostí proudění, klesá tlak proudící kapaliny. Platí tedy: [1]

$E_K$  - kinetická energie kapaliny:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (14)$$

$\rho [kg/m^3]$  ... hustota

$V [m^3]$  ... objem

$v [m/s]$  ... rychlost proudění

$p [Pa]$  ... tlak

$E_P$  – potenciální (tlaková) energie kapaliny:

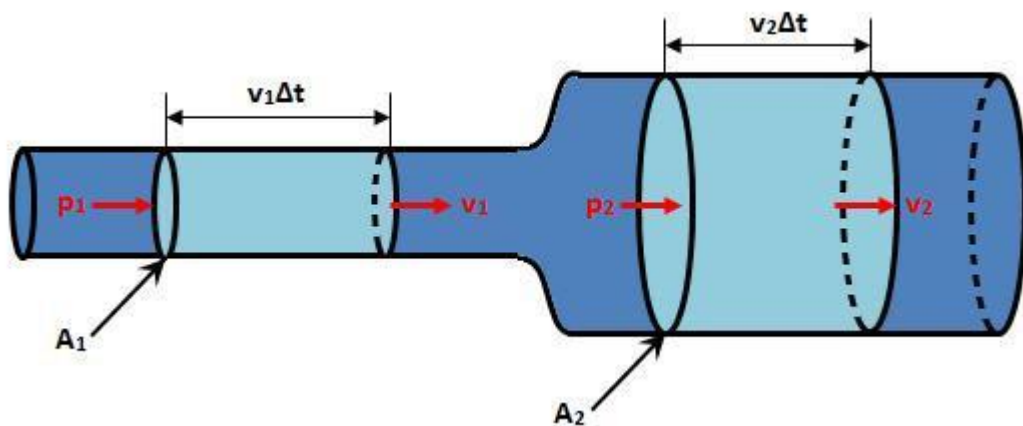
$$E_K = p \cdot V \quad (15)$$

Ze zákona o zachování energie platí:

$$E_K = E_P = konst. \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 = p \cdot V = konst. \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = konst. \quad (18)$$



Obr. 14. Náčrt principu výpočtu Bernoulliho rovnice

### 3.2 Proudění vzduchu potrubím

Proudění potrubím může být laminární nebo turbulentní. Hranice mezi nimi udává tzv. Reynoldsovo číslo, které se vyjadřuje: [1]

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (19)$$

$\nu [m^2/s]$  ... kinematická viskozita

$d [mm]$  ... charakteristický rozměr

Pokud je hodnota  $Re$  vyšší než kritická hodnota  $Re_{KRIT}$ , tak je proudění turbulentní. Bude-li pro kruhový průřez  $Re \leq 2300$ , proudění bude vždy laminární, je-li  $Re \geq 3000$ , bude proudění vždy turbulentní. Vlivem vazkosti je rychlost na stěnách potrubí nulová. Se

vzdáleností od stěny rychlost zpočátku prudce stoupá, gradient rychlosti pak směrem ke středu potrubí klesá. Rychlostní profil lze vyjádřit mocninným zákonem: [1]

$$\frac{w}{w_m} = \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (20)$$

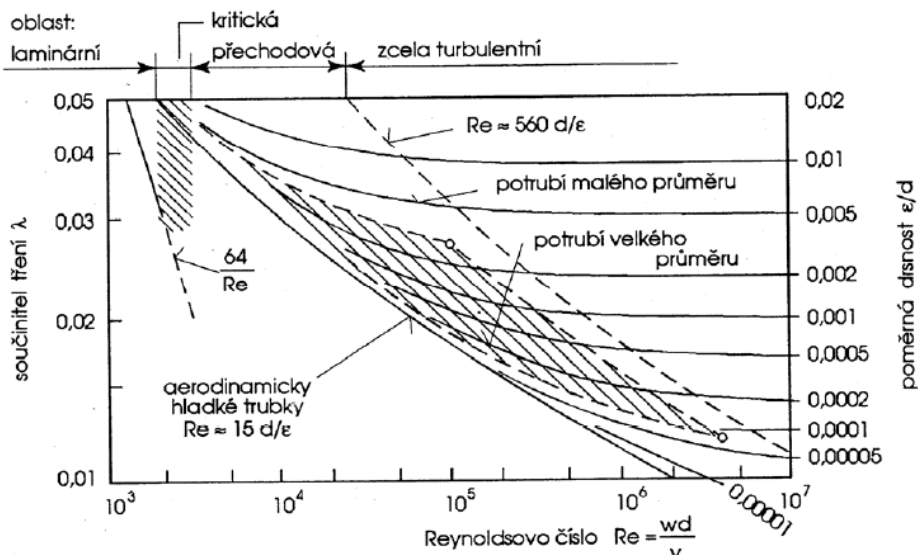
### 3.3 Tlakové ztráty při průchodu potrubím

Při proudění vzduchu potrubím se vlivem vazkosti přemění část mechanické energie v teplo. Nebudeme-li uvažovat o stlačitelnosti vzduchu, projeví se úbytek mechanické energie úbytkem tlaku. Hovoříme o tlakových ztrátách. Ty se rozdělují podle vzniku ztráty na: [1]

- místní – vznikají tam, kde je proud vzduchu narušen
- třením – provází proudící vzduch po celé délce potrubí

#### 3.3.1 Tlakové ztráty třením

Pro překonání odporu přímého potrubí o průřezu  $S$ , obvodu  $O$  (konstantní po délce  $l$ ), dojde k úbytku tlaku. Velikost tohoto úbytku závisí na délce, charakteristickém průřezu a drsnosti potrubí. [1]



Obr. 15. Závislost součinitele tření  $\lambda$  na  $Re$  a poměrné drsnosti  $\varepsilon/d$  při proudění potrubím kruhového průřezu [1]

Tlaková ztráta se počítá ze vztahu:

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot p_d = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (21)$$

- $\lambda$  [-] ... součinitel tření  
 $d$  [mm] ... charakteristický rozměr  
 $\varepsilon$  [mm] ... ekvivalentní drsnost stěn  
 $\varepsilon/d$  [-] ... poměrná drsnost

Tab. 3: Drsnost různých materiálů používaných pro rozvod vzduchu [1]

Provedení	$\varepsilon$ [mm]
Pozinkovaný plech, 12 přírubových spojů na 10m délky	0,15
Betonový kanál: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kovové bednění, pečlivě hlazená cementová omítka</li> <li>• bednění z hoblovaných prken, hlazená omítka</li> <li>• nehoblované prkenné bednění</li> <li>• hrubý povrch, vystupující šterk, prohlubně, přesazené bednění</li> </ul>	0,2 - 0,3 0,3 - 0,8 0,8 - 2 2 - 10
Azbestocement	0,2 - 0,6
Omítnuté rabicové pletivo	10 - 15
Asfaltovaná litina	0,12
Keramika s glazurou	1,4
Překližka	0,6
Sklo, vinidur, folie z plastů	0,0015 - 0,01
Tažené trubky z mědi, mosazi, hliníku	0,01 - 0,06

Oblast  $\lambda$  se při rychlosti proudění vzduchu v potrubí  $w = (0,5 - 30)$  m/s a průměrech 50 až 2000 mm pohybuje od 0,015 do 0,030. Na obrázku je vyznačena vyšrafovanou oblastí. [1]

Pro výpočet se používá vztah k přímému výpočtu:

$$\lambda = \frac{1,318}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (22)$$

Tlaková ztráta místní

Místní tlakové ztráty se počítají podle vztahu:

$$\Delta p_\xi = \xi p_d = \xi \frac{\rho}{2} w^2 \quad (23)$$

Součinitel místní tlakové ztráty  $\xi$  je dán experimentálně. Výsledky analytických řešení se od naměřených hodnot značně liší. Jediné analytické řešení, které odpovídá experimentům, platí pro náhlé rozšíření proudu a je dáno Bordovým vztahem: [1]

$$\Delta p_{\xi} = \frac{\rho}{2} (w_1 - w_2)^2 \quad (24)$$

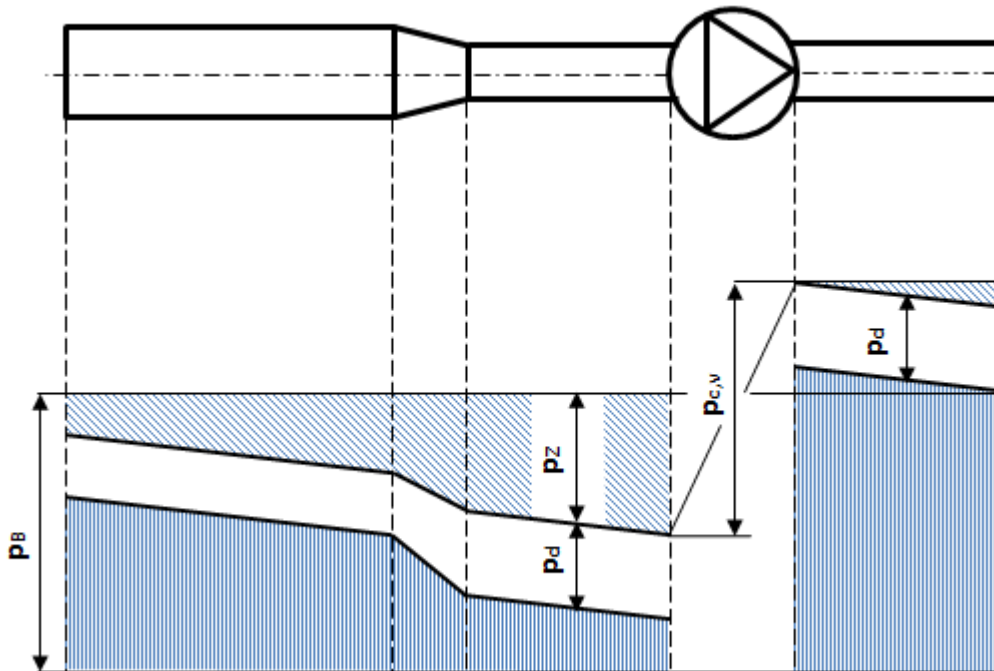
### 3.4 Tlakové poměry v potrubní síti

Při průtoku mezi průřezy 1 a 2, pro vyrovnaný rychlostní profil a za předpokladu, hustota vzduchu je konstantní  $\rho = \text{konst.}$  platí: [1]

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 + \Delta p_{z1,2} = \text{konst.} \quad (25)$$

Součet tlaků statického a dynamického v prvním průřezu se musí rovnat součtu těchto tlaků ve druhém průřezu a tlakové ztráty. Součet statického a dynamického tlaku se nazývá tlak celkový: [1]

$$p_s + p_d = p_c \quad (26)$$



Obr. 16. Tlakové poměry v potrubní síti

## 4 PÍSTOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

Jejich princip spočívá v přeměně chemické energie paliva v mechanickou práci, kdy se ve válci motoru spaluje směs vzduchu a paliva ve vhodném poměru. Ideálně takováto směs rychle a beze zbytku shoří a vlivem uvolněné tepelné energie stoupne ve válci tlak, který poté tlačí na píst. Motory se podle druhu zapálení dělí na zážehové a vznětové. U zážehových motorů je zápalná směs zapalována jiskrou mezi kontakty svíčky. Teplota ve válci u tohoto typu motoru musí být nižší než samozápalná teplota směsi. U vznětového motoru spočívá princip v samozapálení směsi díky teplotě vzniklé stlačením ve válci. Teplota musí být ovšem vyšší než samozápalná teplota směsi. [2]

### Výhody pístových spalovacích motorů:

- Vysoká celková účinnost (čtyřdobé motory zážehové 20 až 30 %, čtyřdobé motory vznětové 30 až 40 %,
- Jednoduchost konstrukce a kompaktnost pístových spalovacích motorů;
- Malá měrná hmotnost vyjádřená v kg hmotnosti motoru připadajících na 1 kW výkonu;
- Možnost rychlého spuštění a rychlého zatížení a krátkých přestávek provozu v porovnání s tepelnými motory s vnějším spalováním (např. spalovací turbíny);
- Používání paliv s vysokým energetickým obsahem;
- Možnost provedení motorů jako více palivových umožňujících přechod z jednoho paliva na druhé za chodu motoru, např. bioplyn  $\Leftrightarrow$  nafta, zemní plyn  $\Leftrightarrow$  benzin.

### Nevýhody pístových spalovacích motorů:

- Nutnost spouštět odlehčený motor cizím zdrojem energie;
- Nevýhodný průběh točivého momentu;
- Malá přetížitelnost pístových spalovacích motorů;
- Negativní vlivy provozu pístových spalovacích motorů na okolní prostředí;
  - a) hluk výfuku a sání motoru, spalování, mechanický hluk motoru a příslušenství;
  - b) vibrace v důsledku obtíží při vyvažování posuvného pohybu, v důsledku obtíží s přerušením přenosu vibrací na stroj;
  - c) exhalace - u zážehových motorů CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>.

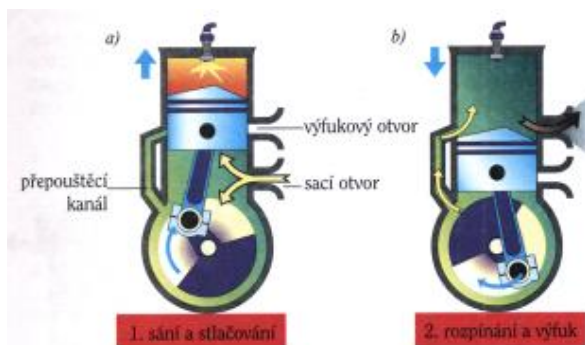
## 4.1 Dvoudobý spalovací motor

Tento typ motoru byl poprvé sestaven roku 1879 skotským konstruktérem Dugaldem Crerkem. Motor má čtyři fáze a to sání, komprese, expanze a výfuk stejně jako motor čtyřdobý motor. Hlavní rozdíl tkví v tom, že zde jsou zajištěny vždy dva takty najednou, z čehož vyplývá, že jeden oběh připadá na jedno otočení klikového hřídele.

### 4.1.1 Princip činnosti

Při pohybu pístu do horní úvratě vzniká pod pístem podtlak, který je využit pro nasátí směsi vzduchu, paliva a oleje. Směs poté proudí sacím kanálem do klikové skříně motoru. Například u některých drážních nebo lodních motorů bývá náplň ještě hnána dmychadly. Při sání je současně předchozí směs nad pístem stlačována ve spalovacím prostoru stejně, jako je tomu u čtyřdobého motoru. Těsně před horní úvratí je směs zapálena jiskrou. Vzniklá expanze hořící směsi tlačí píst do dolní úvratě a současně spodní hrana pístu uzavírá sací kanál. Směs v klikové skříně se pohybem pístu stlačuje. Při dalším pohybu pístu otevírá pravá horní hrana pístu výfukový kanál a hned poté se otevírá horní hrana pístu i přepouštěcí kanál. Stlačená směs začne vytlačovat zbylé zplodiny a dostává se do prostoru nad píst. Expanze plynů v každé otáčce probíhá dvakrát častěji než u čtyřdobého motoru a bylo by logické předpokládat, že lze takto teoreticky dosáhnout dvojnásobného výkonu. Ve skutečnosti je výkon mnohem nižší vlivem nižší účinnosti dvoutaktního motoru způsobenou mícháním zápalné směsi s výfukovými plyny a nedostatečným plněním. Otevřená výměna plynů má taktéž nepříznivý vliv na spotřebu paliva a vznikající škodlivé látky ve výfukových plynech. Řízení výměny plynů se optimalizovalo použitím otočných šoupátek, nebo membránových ventilů. Otočná šoupátka pohání klikový hřídel, membránové ventily řídí tlak plynů. K dosažení co nejvyššího výkonu alespoň v určitém poli otáček se používala optimalizace výměny plynů s pulzním kmitáním v sacím a výfukovém potrubí. Z důvodu již více zmíněné vyšší spotřeby paliva a tvorby škodlivin se dnes nepoužívají v automobilech. Naproti tomu se hojně používají u malých motorek a například u sekaček na trávu. [3]





Obr. 17. Princip dvoudobého spalovacího motoru [2]

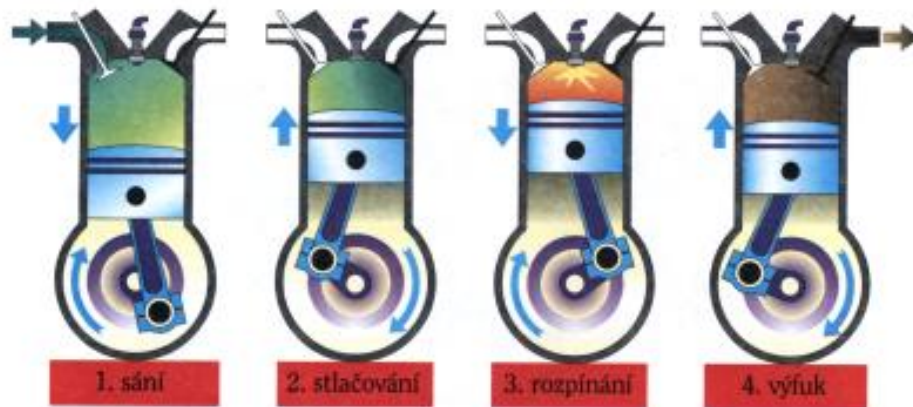
## 4.2 Čtyřdobý spalovací motor

Zážehový čtyřdobý motor byl vynalezen konstruktérem Nicolausem Ottou v roce 1876. Vznětový typ motoru byl uveden do provozu až v roce 1897 známým vynálezcem Rudolfem Dieselem.

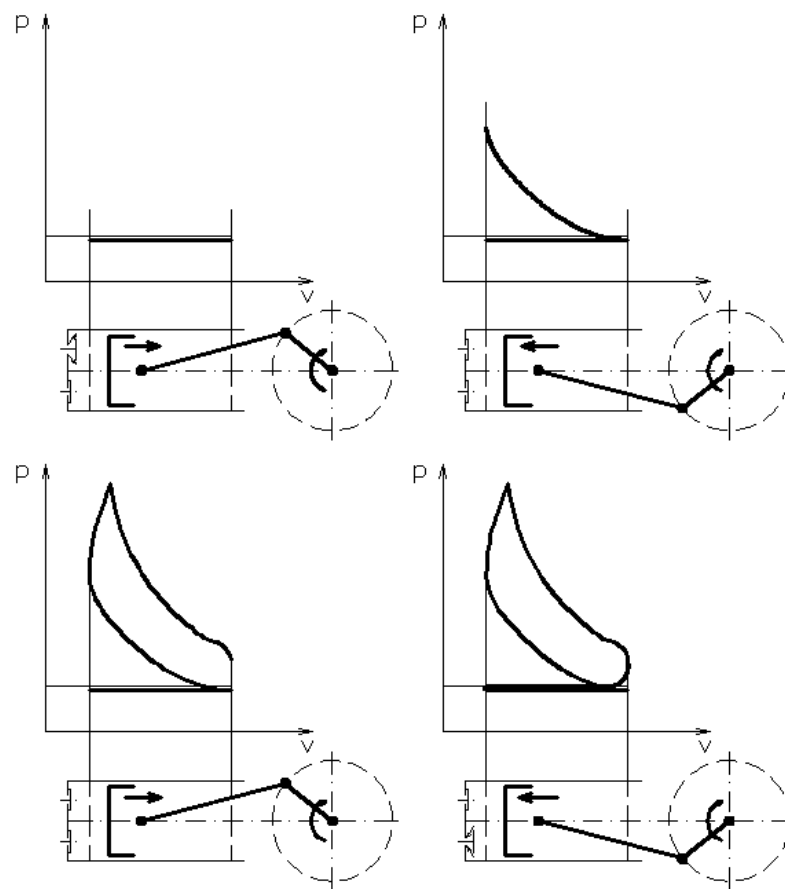
### 4.2.1 Pracovní oběh čtyřdobého zážehového motoru

Změna objemu k uskutečnění pracovního pochodu ve válci se realizuje pístem spojeným ojnici s klikovým hřídelem. Píst se pohybuje mezi dvěma krajními polohami – horní úvratí HÚ a dolní úvratí DÚ. Jeden oběh se uskuteční za čtyři zdvihy pístu. Schéma práce motorů je znázorněno na obr. 3. [8]

- a) Při plnicím zdvihu se píst pohybuje z HÚ do DÚ. Ve válci se vytváří podtlak a do válce se přes otevřený sací ventil nasává směs vzduchu a paliva. U přeplňovaných motorů dodává dmychadlo směs s určitým přetlakem. V průběhu tohoto zdvihu je výfukový ventil uzavřen. [8]
- b) Kompresní zdvih – na začátku se sací ventil uzavírá. Píst se posouvá z DÚ do HÚ a stlačuje obsah válce. Před dosažením HÚ se směs zapálí elektronickou jiskrou. [8]
- c) Expanzní zdvih – při obou zavřených ventilech se spaluje pracovní směs a spaliny expandují, píst se pohybuje k DÚ. Tento zdvih je pracovní. [8]
- d) Na konci expanze se otevírá výfukový ventil a píst vytlačuje při pohybu z DÚ z válce spaliny. Ve válci zůstane po ukončení výfuku ještě určité množství zplodin spalování, které se mísí s čerstvou směsí a tvoří s ní pracovní směs. [8]



Obr. 18. Princip čtyřdobého spalovacího motoru [2]



Obr. 19. Průběh tlaku ve válci pro jednotlivé zdvihy pístu

Na obrázku je znázorněn průběh tlaku ve válci motoru v závislosti na objemu pro jednotlivé zdvihy pístu. Měřením průběhu tlaku na skutečném motoru získáme indikátorový diagram. Skutečné pracovní oběhy se liší od porovnávacích: [8]

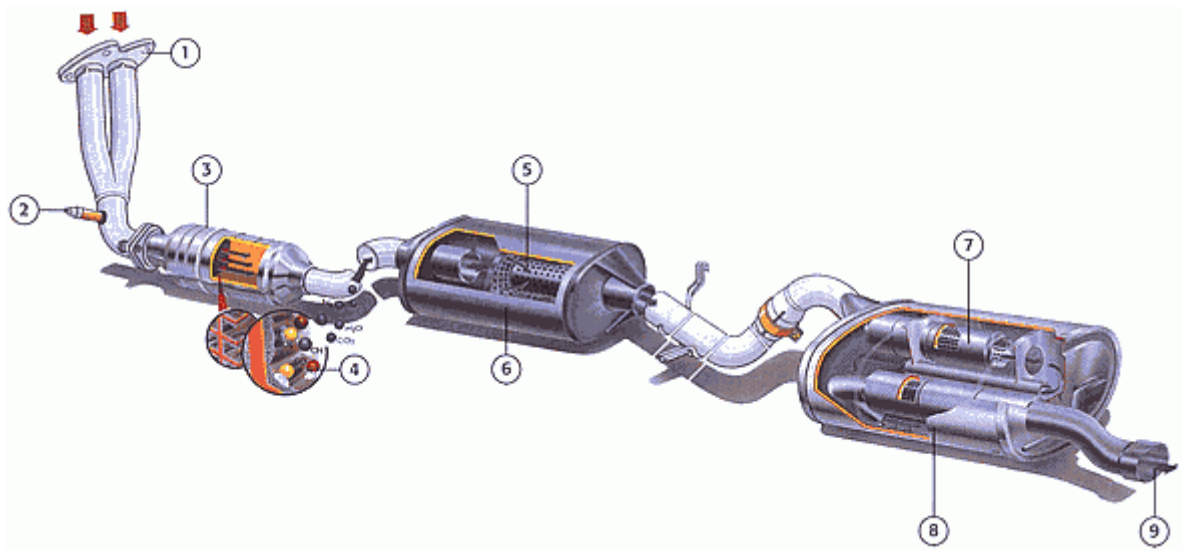
- a) Nestejným průběhem pracovních pochodů, z nichž se teoretické a skutečné pracovní oběhy skládají. U skutečných oběhů se pracovní náplň vyměňuje. Průběh komprese a expanze je polytropický, nikoli adiabatický. Dochází k přestupu tepla mezi

stěnou a náplní. Spalování se odchyluje od izochory. Otevírání a zavírání výfukového ventilu ovlivňuje průběh tlaku ve válci. Indikátorový diagram má zaoblené přechody mezi jednotlivými částmi oběhu. V průběhu cyklu dochází k tepelným i hydraulickým ztrátám. [8]

- b) Rozdílnými vlastnostmi pracovní látky. U porovnávacích oběhů jsme předpokládali, že pracovní látkou je ideální plyn. Ve skutečnosti má směs odlišné termofyzikální vlastnosti a v průběhu spalování dochází ke složitým změnám. [8]

## 5 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Výfukový systém slouží k odvodu výfukových plynů vznikajících při práci motoru hořením paliva a rovněž k výraznému snížení hlučnosti, kterou motor při práci produkuje. Výfukové systémy vybavené katalyzátorem (všechny nová vozidla) přispívají aktivně ke snižování hladiny škodlivých emisí uvolňovaných do ovzduší. Další důležitou funkcí je odvod spalin mimo karoserii vozidla, aby se nedostaly do kabiny vozu. Nesprávný nebo poškozený výfuk, nebo některá z jeho částí, může mít negativní vliv na produkovaný hluk vozidla nebo zvýšení hladiny škodlivých emisí a rovněž se také může zvýšit spotřeba paliva nebo snížit výkon vozidla. Výfuk je jedním z nejmáhaných součástí automobilu. Díky výraznému střídání teplot, působením kyselé vody vzniklé kondenzací výfukových plynů, podléhá celé výfukové potrubí extrémní korozi. Z venkovní strany na výfuk působí voda, nečistoty na cestách (kameny a jiné předměty). Dalším faktorem, který na výfuk působí, jsou vibrace, které namáhají ohyby a především spoje. [6]



Obr. 20. Schéma výfukového systému automobilu [7]

- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1) Příruba ke sběrnému potrubí     | 6) Dvojitý plášť s izolační vrstvou |
| 2) Lambda sonda                    | 7) Tlumičí prvky druhého tlumiče    |
| 3) Třícestný katalyzátor,          | 8) Dvojitý plášť s izolační vrstvou |
| 4) Chemická činnost katalyzátoru   | 9) Vyústění výfuku                  |
| 5) Expanzní komora prvního tlumiče |                                     |

## 5.1 Výfukové svody

Výfukové svody jsou prvním dílem výfukového systému, odvádějícího výfukové plyny od hlav válců motoru do dalšího dílu výfukového potrubí. Jde o sběrné potrubí, které je pevně uchyceno přímo na hlavu motoru. Z důvodu vysokých teplot odváděných plynů (přes 1200°C) jsou vyrobeny z litiny. U nejběžnějších čtyř válcových motorů dochází obvykle k postupnému spojení 4 trubek do 2 a do 1 trubky, přičemž se vždy zvýší průměr trubky pro zabezpečení odvodu zvětšeného objemu plynů. Podle spalování se spojují vždy nejdříve vzdálené válce, nejčastěji 1+4 a 2+3. V ideálním případě by měly být trubky stejně dlouhé, vzhledem k omezeným možnostem v motorovém prostoru není toto vždy proveditelné. Svody vyúsťují v přední výfukové potrubí nebo přímo v katalyzátor. [6]

## 5.2 Katalyzátory

Katalyzátor je velice jemné síto malých komůrek potažených vrstvou vzácných kovů (platina, paladium, rhodium atd.). Katalyzátor je zařízení, které pomocí chemického procesu (katalýzy) zajišťuje snižování obsahu kyslíčnicku uhelnatého a uhlovodíků ve výfukových plynech. Vedlejším produktem této reakce je voda, která kondenzuje ve výfukové soustavě. Poškozený nebo nefunkční katalyzátor může být příčinou zvýšení škodlivých emisí, zvýšení spotřeby paliva, snížení výkonu motoru a také toho, že vozidlo neprojde zkouškou STK. Katalyzátor je u novějších modelů automobilů jak u benzínových, tak u dieselových motorů. Technicky se jedná o totožný katalyzátor, rozdíl je ve složení vrstvy vzácných kovů. Starší dieselové motory musí mít kvůli kouřivosti katalyzátor se sníženou hustotou komůrek. Originální katalyzátory jsou v drtivé většině keramické. Univerzální katalyzátory se vyrábějí i s kovovou vložkou, což má spoustu výhod. [6]

### 5.2.1 Katalyzátory keramické

Tyto katalyzátory mají keramickou vložku. Jedinou výhodou těchto katalyzátorů je pouze o něco nižší cena. Keramické katalyzátory jsou mnohem citlivější na poškození jak mechanické (úder cizího předmětu na vozovce) tak chemické a to zejména při špatném seřízení motoru. Keramické katalyzátory se nehodí pro vozy upravené na alternativní pohon LPG/CNG ani dieselových motorů. [6]

### 5.2.2 Katalyzátory kovové

Tyto katalyzátory mají vložku kovovou. Tyto katalyzátory jsou jen o trochu dražší než katalyzátory keramické. Zato mají mnohem širší použití. Kovové katalyzátory nejsou tak citlivé na mechanické poškození, není tak velké riziko poškození vlivem horšího chodu motoru. Tyto katalyzátory jsou vhodné pro dieselové motory i motory poháněné alternativním pohonem LPG/CNG. [6]

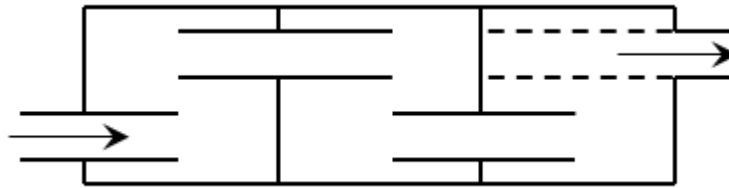
## 5.3 Tlumič výfuku

Tlumič výfuku je další část výfuku, přes kterou proudí zplodiny mimo automobil. Je to nádoba, zhotovená z plechu většinou ve tvaru válce, opatřená komorami nebo přepážkami s různě uspořádanými otvory. Tlumič především účinně snižuje hluk vznikající prací motoru a prouděním výfukových plynů. Většinou je součástí výfukového systému přední a zadní tlumič. Na některých vozidlech mohou být i tlumiče další. Dle tlumení hluku existují tři typy tlumičů - absorpční, rezonanční a absorpčně-rezonanční. U absorpčního tlumiče může plyn volně procházet. Tlumení hluku probíhá skrz perforované trubky, které jsou obklopeny hluk pohlcujícím materiálem, buď vzduchovými komorami anebo nejčastěji skelným vláknem. U reflexních tlumičů jsou uvnitř využívány reflektující překážky, které eliminují nežádoucí zvukové frekvence. Většina dnešních předních tlumičů je absorpční, vzhledem k provozním teplotám kolem 800°C se hluk absorbuje do vzduchových komor. U koncových tlumičů, kde teploty dosahují maxim kolem 350°C a nehrozí tak poškození tlumícího materiálu, je časté užití absorpční (s absorpcí hluku do tlumícího materiálu), a dále reflexní respektive kombinace obou zmíněných. [6]

### 5.3.1 Rezonanční tlumič

Používá se v promyšlených kombinacích pro tlumení vysoko nebo nízkofrekvenčního hluku. Pro tlumení vysokofrekvenčního hluku musí být výfukové plyny rozvedeny do několika za sebou umístěných komor. V těchto komorách se výfukové plyny rozpínají a zmenšuje se tak jejich kinetická energie. Vysokofrekvenční tlumiče propouštějí nízkofrekvenční hluk a tlumí hluk vysokofrekvenční a používají se především u dvoutaktních a u maloobjemových vysokootáčkových čtyřtaktních motorů. Nízkofrekvenční tlumiče jsou tvořeny pouzdrem s trůbkou s mnoha otvory, která obepíná vlastní výfukové potrubí. Těmito otvory se mohou výfukové plyny rozpínat do velkého prostoru a odtud unikají ven. Nízkofrekvenční tlumiče dobře tlumí nízkofrekvenční zvuky, vysokofrekvenční jen slabě.

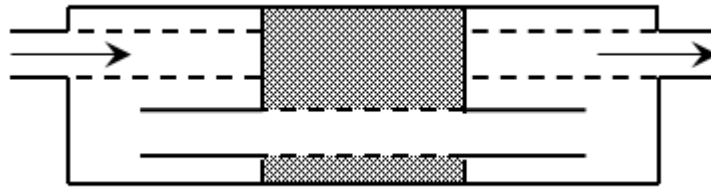
Nízkofrekvenční tlumiče se používají u čtyřtaktých velkoobjemových motorů, které se neprovozují na vysokých otáčkách. [5]



Obr. 21. Schéma rezonančního tlumiče

### 5.3.2 Interferenční tlumič

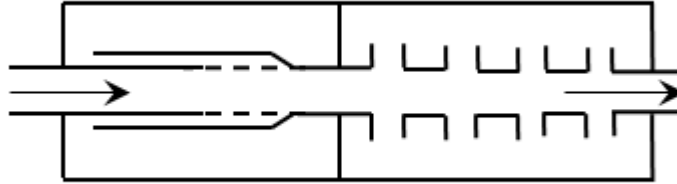
Tento tlumič je tvořen trubicou položenou uprostřed tlumiče. V trubce je velký počet otvorů, které jsou od sebe umístěny v přesně vypočítaných vzdálenostech. Mezera mezi děrovanou trubicou a pláštěm tlumiče vytváří za chodu motoru rezonance frekvencí akustických vlnění tak, aby se frekvence setkávali pokud možno s opačnými fázemi. V ideálním případě při rezonanci frekvencí posunutých fázově o  $180^\circ$  dojde k úplnému vyrušení a zániknutí hluku. V praxi lze tímto způsobem dosáhnout podstatného utlumení hluku. Interferenční princip se většinou kombinuje s odrazovým tlumením. [5]



Obr. 22. Schéma interferenčního tlumiče

### 5.3.3 Tlumič s rozvětvenými rezonátory

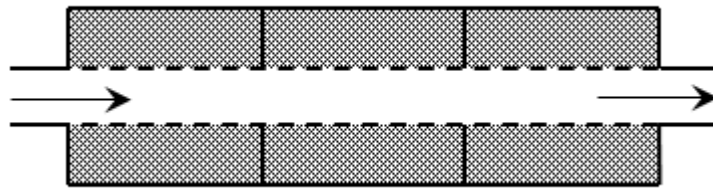
Tyto tlumiče jsou tlumit velmi hlasité tóny bez zvýšení odporu proti proudění spalin. Při průtoku velkého množství plynů je při vysokých otáčkách k dosažení špičkového výkonu zapotřebí jen nepatrný odpor proti proudění. [5]



Obr. 23. Schéma tlumiče s rozvětvenými rezonátory

### 5.3.4 Absorpční tlumič

Charakteristickým znakem těchto tlumičů je nepatrný odpor proti proudění spalin. Tyto tlumiče produkují pouze malý protitlak, podobně jako rozvětvené rezonátory. Absorpční tlumiče mají mnoho komor vyplněných žáruvzdorným a porézním materiálem (na bázi křemíku), který dobře pohlcuje hluk. Komory jsou propojeny velkými otvory, kterými proudí výfukové plyny. Třením o tlumicí materiál se proudění plynů zbrzdí a tím se tlumí vibrace a tím pádem i hluk. [5]



Obr. 24. Schéma absorpčního tlumiče

Nejlepších výkonů lze dosáhnout u absorpčního tlumiče, u kterého může plyn volně procházet. Odstraněním hlavního tlumiče lze dosáhnout dalšího nárůstu výkonu, vzhledem k výraznému nárůstu hluku je to však nepřijatelné. [6]



## 6 VŠEOBECNÉ TECHNICKÉ ŘÁDY - MOTOCYKL

Výraz motocykl zahrnuje všechna vozidla, která mají méně než čtyři kola, jsou poháněna motorem a jsou určena v podstatě pro dopravu jedné nebo více osob, z nichž jedna je řidičem vozidla. Všechna kola musí být normálně ve styku se zemí, vyjma přechodných okamžiků a za určitých výjimečných okolností. Mimoto pro překonávání určitých povrchů může být jedno nebo všechna kola nahrazena skluznicemi, běhouny nebo řetězy.

### 6.1 Volnost konstrukce

Jestliže motocykl vyhovuje požadavkům předpisů FIM, Zvláštním ustanovením, jakož i určitým specifikovaným podmínkám, které může FIM požadovat pro určité podniky, neexistují žádná omezení, pokud jde o značku, konstrukci nebo druh motocyklu, používaného při mezinárodních podnicích. Všechny motocykly sólo (Skupina A) musí být konstruovány takovým způsobem, aby byly plně ovladatelné jezdcem. [10]

### 6.2 Měření objemu válců

#### a) Motor s vratným pohybem – Ottův cyklus

Objem každého válce motoru se vypočte podle geometrického vzorce pro objem válcových těles; průměr je dán vrtáním a výška zdvihem pístu od nejvyššího do nejnižšího bodu [10]:

$$\text{Objem} = \frac{D^2 \cdot 3,1416 \cdot C}{4} \quad (27)$$

$D$  = vrtání;  $C$  = zdvih pístu (v cm)

Vrtání válce musí být měřeno s tolerancí 1/10 mm. Jestliže při měření s touto tolerancí objem válců překročí limit pro danou třídu, je nutné provést nové měření studeného motoru s tolerancí 1/100 mm.

#### b) Rotační motor

Objem motoru, podle něhož se určí, ve které třídě bude motocykl startovat, se určí takto [10]:

$$\text{Objem} = \frac{2 \cdot V}{N} \quad (28)$$

$V$  = objem všech komor, ze kterých se skládá motor

$N$  = počet otáček motoru, nutných pro dokončení jednoho cyklu v komoře

### 6.3 Výfukové potrubí

Konec tlumiče musí být vodorovný a rovnoběžný s podélnou osou (o minimální délce 30 mm) motocyklu sólo (s tolerancí  $\pm 10$ ) a vyústění výfukové trubky z tělesa tlumiče výfuku nesmí být delší než 5 mm a konec této trubky musí být zakončen zaoblením min. R 2 mm.

31.02 Výfukové plyny musí být vyfukovány směrem dozadu. Nesmí zvedat prach, znečišťovat pneumatiky nebo brzdy nebo obtěžovat případné spolujezdce nebo ostatní jezdce

Musí být učiněna všechna opatření, aby se zabránilo unikání spotřebovaného oleje, což by mělo nepříznivý důsledek pro následující jezdce

31.03 Nejvzdálenější konec výfukového potrubí motocyklů sólo nesmí sahat dále než k svislé rovině procházející zadním okrajem zadní pneumatiky.

31.04 U motocyklu se sajdkárem musí výfukové potrubí vypouštět výfukové plyny vodorovně směrem dozadu v úhlu nejvýše 30° od podélné osy vozidla.

### 6.4 Technické řady – plochá dráha

Protože jsou některé normy shodné z všeobecných norem, tak jsou dále uvedeny pouze normy lišící se od všeobecných technických specifikací. [10]

#### 6.4.1 Třídy

Skupiny jsou rozděleny do tříd podle objemů válce, jak je uvedeno dále. Tyto třídy musí být dodrženy pro všechny podniky. [10]

Tab. 4: Rozdělení motocyklů do tříd podle objemů válce

TŘÍDA	NAD ccm	DO ccm
50	0	50
80	50	80
100	80	100
125	100	125
175	125	175
250	175	250
350	250	350
500	350	500
750	500	750
1000	750	1000

1300	1000	1300
------	------	------

Třída 250 ccm do 250ccm čtyřdobý jednoválcový motor

Třída 500 ccm do 500ccm čtyřdobý jednoválcový motor

### **Skupiny B1, B2 sajdkár**

Jako pro skupiny A1 a A2 nad 175 cm<sup>3</sup>.

#### **6.4.2 Všeobecná specifikace**

**25.01** Použití titanu pro motocykly na Plochou dráhu je kompletně zakázáno.

**25.03** Použití karbonu pro plochodrážní motocykly je povoleno.

**25.03** Použití carbonu-fibr krytů pro Plochou dráhu schválené. Ale carbon-carbon, carbon-kevlar a jiné kompozitní materiály pro výrobu řídítek není dovoleno.

**25.05** Zařízení pro záznam dat a automatické elektronické zapalování je povoleno.

Přenos dat z jedoucího motocyklu není povolen s výjimkou přenosu dat z časoměrného zařízení (transponderu) nebo kamery.

**25.06** Pro všechny závody (je povoleno použití 1000 ccm plochodrážního sajdkáru) s jednoválcovým motorem.

**25.08** Může být použit jen klasický karburátor. Jakékoliv elektronické zařízení pro přípravu pohonné směsi není dovoleno. [10]

#### **6.4.3 Výfukové potrubí**

Výfukové potrubí a tlumiče musí splňovat všechny požadavky, které vyplývají z kontroly hluku. Výfukové plyny musí být vyfukovány směrem dozadu a nesmí být vyfukovány takovým způsobem, aby zvedaly prach, znečišťovaly pneumatiky nebo brzdy nebo obtěžovaly případného spolujezdce nebo ostatní jezdce. [10]

**31.01** Tlumiče pro 500ccm a 250 ccm na motocykly pro plochou dráhu musí být homologovány FIM. Homologace je platná 5 let od roku homologace. Rok výroby a homologační číslo musí být vyraženo na výrobním štítku tlumiče.

Je povolena modifikace tlumiče pro motocykly 250ccm na Plochou dráhu a to: vyústění tlumiče je zmenšeno na Ø 40 mm.

**31.03** Tlumič musí být mechanického nebo přepážkového typu a pro dosažení předepsané hladiny hluku. Rovná trubka, spojující bez odrazu výfukových plynů přímo vstup a výstup tlumiče není dovolena. Nesmí být použita žádná zkosená, kuželová nebo jinak tvarovaná část, která by vyvolávala megafonový účinek.

Tlumič musí být kompletní, tak jak byl vyroben a není možná žádná oprava nebo úprava.

**31.03.1** Výfukové potrubí musí být připevněno k hlavě válce a rámu nejméně třemi objímkami (bod upevnění k hlavě válce je považován za jednu z objímek). Tlumič musí být přichycen k rámu nejméně jednou objímkou. Kromě toho musí být z bezpečnostních důvodů druhé pohyblivé spojení od první třetiny tlumiče k rámu (ocelovým kabelem o průměru nejméně 3 mm nebo silnou ocelovou pružinou).

**31.03.2** Vnější průměr jednoduché výfukové trubky nesmí překročit 50 mm a musí být v zásadě konstantní v celé své délce.

**31.03.3** Výstupní část tlumiče musí zůstat konstantní v délce 40 mm. Nesmí být perforována, ani opatřená štěrbinami nebo otvory a její průměr nesmí překročit 45 mm nebo ekvivalentní plochu.

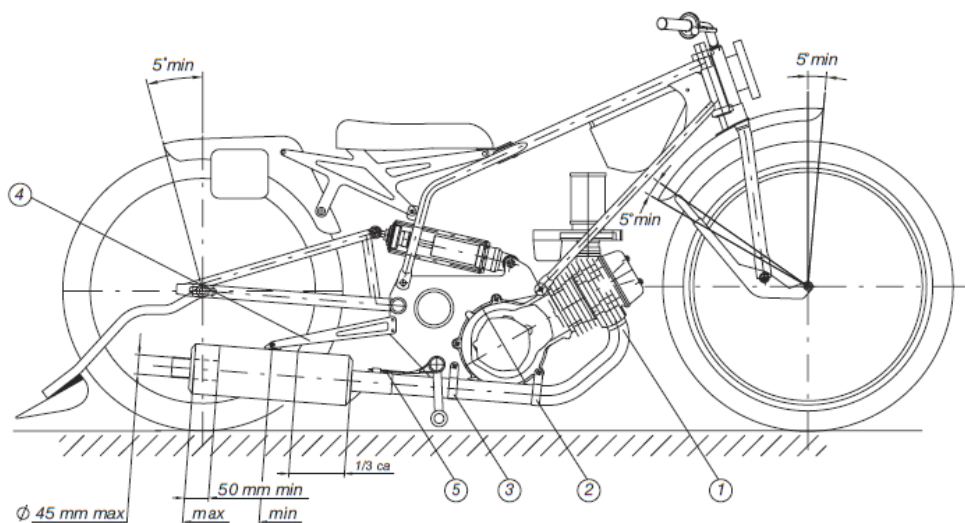
**31.03.4** Konec tlumiče musí být vodorovný a rovnoběžný s podélnou osou (o minimální délce 30 mm) motocyklu sólo (s tolerancí  $\pm 10^\circ$ )

**31.03.5** Vyústění výfukové trubky z tělesa tlumiče výfuku nesmí být delší než 5 mm a konec této trubky musí být zakončen rádiusem (obr.G,H,K,P)

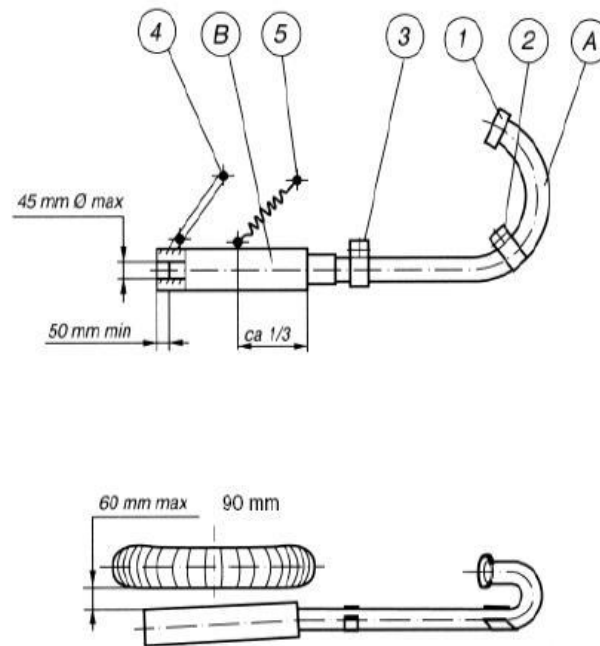
**31.03.6** Mezi tlumičem a pneumatikou může být největší vůle 60 mm, která však nesmí být překročena. Pro ledovou plochou dráhu 90 mm tolerancí  $\pm 10$  mm)

**31.04** Výfukový systém nesmí sahat za vnější obvod zadní pneumatiky a jeho nejvzdálenější část musí přesahovat střed zadního kola.

**31.05** U stroje se sajdkárem musí výfukové potrubí vypouštět výfukové plyny vodorovně a směrem dozadu nejvýše v úhlu  $30^\circ$  k ose stroje a na konci musí mít stálý průměr v délce 30 mm. [10]



Obr. 25. Schéma umístění výfukového potrubí na motocyklu [10]



Obr. 26. Schéma výfukového systému včetně rozměru mezery mezi tlumičem a pneu. [10]

## 7 KONTROLA HLUKU

Hluk na motocyklových sportovních podnicích není limitován pouze samotnými stroji. Kromě předpokládaného hluku motorů musí brát pořadatelé a činovníci pro životní prostředí zřetel i na intenzitu hluku vznikajícího ozvučením, diváky a ostatními zdroji spojenými se sportovním podnikem. Je věcí a odpovědností všech osob, tj. jezdců, klubů, pořadatelů a všech činovníků aby zajistili snížení hluku spojeného s motocyklovou činností na minimum a vyhnuli se tak všeobecným reakcím veřejnosti na hluk. [10]

### 7.1 Akustika

Akustika je rozsáhlý vědní obor, zabývající se komplexně zvukem od jeho vzniku, přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly. Má celou řadu podskupin, např. hudební akustika zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a prostorů, stavební akustika zvukové jevy a souvislosti v uzavřeném prostoru, budovách a stavbách, prostorová akustika šíření zvuku v obecném prostoru, fyziologická akustika vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu, psychoakustika vnímání zvuku v mozku atd. [11]

#### 7.1.1 Zvuk

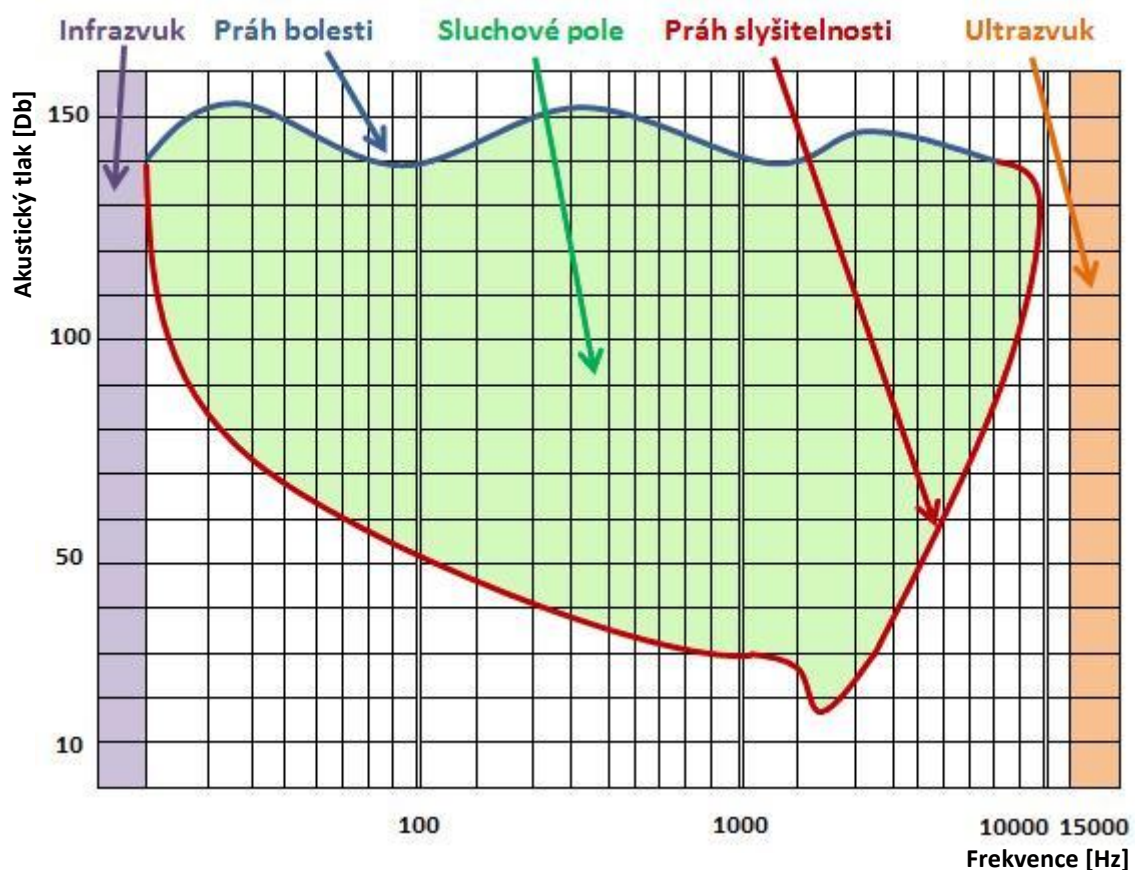
Zvuk obecně můžeme definovat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry pohybu částic pružného prostředí nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. Část zvuků se projevuje jako slyšitelný zvuk - což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu frekvencí od 16 Hz do 20 kHz, schopné vyvolat zvukový vjem. Frekvenční závislost definice slyšitelného zvuku je silně individuální, jen málokdo je schopen vnímat celé pásmo frekvencí (především horní hranice je velmi proměnná a závislá mj. na věku). Zvuky mimo toto pásmo neslyšíme, přesto jsme je schopni vnímat a mohou mít i nepříznivý vliv na zdraví či psychiku. Zvuky pod slyšitelnou hranicí (0,7 - 16 Hz) označujeme jako infrazvuk (velmi nízké frekvence, lidské tělo je vnímá hmatem - jsou schopny rozvibrovat celý povrch těla či bránici), zvuky nad slyšitelnou hranicí (do 50 kHz) jako ultrazvuk. [11]

#### 7.1.2 Sluchový vjem zvukového signálu.

Z hlediska hudební akustiky je důležitý i koncový prvek celého akustického řetězce zdroj - prostor - posluchač. Výše popisovaný kmitavý pohyb zdroje (hudebního nástroje) dorazí až do sluchového orgánu (lidského ucha), kde z roviny objektivní fyzikální

reality přejde do oblasti subjektivního vnímání. Zvuk je ve vnitřním uchu převeden na nervové signály, které jsou složitým způsobem zpracovány v mozku. Jejich analýza, srovnání s dosavadními zkušenostmi a vybavení ve vědomí a podvědomí už probíhají u každého jedince individuálně, konečný účinek zvukového signálu tak není přesně popsatelný, lze definovat jen obecné a obecně platné závislosti. [11]

Vjem zvukového signálu je souhrnem subjektivních veličin - výška tónu, hlasitost a barva zvuku, které jsou přímým obrazem objektivních fyzikálních veličin - frekvence, amplitudy, intenzity a časového průběhu zvukového signálu (zkreslení - podílu harmonických). Sluchový vjem je závislý na frekvenci (velmi silně) a intenzitě zvuku, výsledný vjem je rovněž značně ovlivněn tím, zda posloucháme zvuk s jednou frekvencí nebo jejich více či méně složitou směs. Zvuky, které u posluchače vyvolají sluchový vjem lze zařadit do tzv. sluchového pole: [11]



Obr. 27. Sluchové pole.

Tvar sluchového pole je opět individuální pro každého člověka. Zdola je vymezen křivkou, popisující práh slyšitelnosti (zvuky pod tímto prahem neslyšíme), shora pak křivkou prahu bolesti (zvuky nad tímto prahem vyvolávají bolestivý vjem a mohou vést k poškození psychiky i samotného sluchového orgánu). Maximální citlivost sluchu spadá do oblasti

mezi 500 až 4000 Hz, pro nižší a vyšší frekvence prudce klesá. Sluchový vjem jako subjektivní odraz objektivní reality nekopíruje přesně fyzikální skutečnost. Zřetelné je to především u vjemu hlasitosti, kde míra podráždění sluchu způsobená zvukem není přímo úměrná fyzikální energii. Podle Fechner-Weberova zákona hlasitost roste s logaritmem intenzity zvuku. Tato závislost však opět není lineární (je frekvenčně závislá). Jednotkou hlasitosti je fón [Ph] - (odpovídá hodnotě intenzity při referenční frekvenci 1 kHz). Kromě uvedených závislostí na frekvenci a intenzitě se při vnímání zvuku uplatňuje ještě celá řada dalších jevů, uveďme alespoň vliv adaptace - sluch po určité době působení zvuku ztrácí citlivost (především při působení zvuků velké intenzity nastává částečné "ohluchnutí" - únava sluchu), schopnost znovu slyšet se obnovuje do jedné sekundy, v případě větších intenzit zvuku i po několika minutách až dnech. Dalším významným jevem je maskování - posloucháme-li současně více zvuků, mohou silnější z nich překrýt slabší natolik, že je nejsme schopni vnímat a ve slyšeném zvuku rozlišit (na této skutečnosti je založena např. celá oblast záznamu zvuku a jeho komprese mj. známý formát MP3). [11]

## 7.2 Hluk motocyklů

Zvuk je měřitelný jev, který vzniká, když nějaký zdroj, jako například motor motocyklu, vyvolá vibrace vzduchu. Na rozdíl od toho je hluk subjektivní interpretace dopadu tohoto zvuku. Zvuk, který se líbí jednomu, může být pro druhého obtěžující. Motocykly s vysokou úrovní zvuku jsou téměř vždy považovány za hlučné. Činovník pro životní prostředí musí porozumět rozdílu mezi těmito dvěma faktory a i tomu jak je zvuk kvantifikován. Decibel (dB) je jednotkou zvuku používaná pro vyjádření úrovně tlaku zvuku a je měřena na několika stupnicích. Zvuk motocyklu je testován na stupnici „A“ a je vykazován v dB (A). Úroveň tlaku zvuku se zvyšují logaritmickou řadou (velmi rychle), zatímco lidské ucho toto zaznamenává mnohem pomaleji. Proto pokaždé, když se počet identických zdrojů zvuku zvýší dvojnásobně (například počet motocyklů na startovní čáře), zvýší se úroveň měření zvuku pouze o 3 dB (A). Úroveň hluku se snižuje zvyšováním vzdálenosti od jeho zdroje. Zdvojnásobení vzdálenosti zdroje od lidského ucha vyvolá snížení hluku o 6 dB (A). Teplota, nadmožská výška, vlhkost vzduchu a frekvence zvukových vln přispívají také ke ztrátě energie. Stejně tak jako spadané listí, členitý povrch a velké překážky jako zdi, vozidla nebo šikmé plochy odrážejí zvuk, jehož důsledky se projeví na úrovni zvuku v nejbližším okolí. [10]



### 7.3 METODA MAX METR

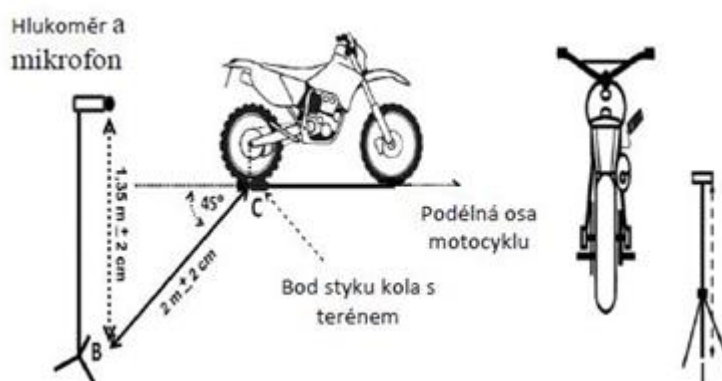
(netýká se motocyklů TRIÁL)

Za účelem sledování opatření přijatá ke snížení hladiny akustického tlaku ve prospěch životní prostředí v rámci "Kampaně tichá jízda, je nová metoda pro měření hladiny akustického tlaku názvem „2 m max " která bude postupně používána od roku 2010 v motokrosu, Enduro. Metoda ukazuje velmi dobrou korelaci mezi intenzitou zvuku Úroveň (LWA), které vydávají motocykly v plné akceleraci a maximální hladina akustického tlaku měřená v blízkosti stejných motocyklů s motory běžících na volnoběh a jsou rychle uvedeny do svých maximálních otáček. Technické specifikace a zdroje k zahájení uplatňování této Nové metody pro použití technických komisařů a činovníky jsou uvedeny v článku. Tento článek podrobně popisuje metodu "2metry max", nezbytné nástroje, ale i tolerance použité staré metody v roce 2010 jako výchozí atd. [10]

Nejsou – li naměřené hladiny akustického tlaku (hluku) metodou " 2 metry max "u motocyklu ve shodě s maximální hladinou akustického tlaku rozhodne technický komisař a jury závodu o dalším postupu. [10]

Tab. 5: Hlukový limit pro plochou dráhu [10]

PLOCHÁ DRÁHA		2 METRY MAX.
Všechny kategorie a všechny typy motorů	117 dB/A	Základ 115 dB/A Návaznost na současný systém FIM homologovaných tlumičů 116 + 2 dB/A tolerance na přesnost měření



Obr. 28. Schéma umístění hlukoměru při kontrole [10]

## SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část práce se snažila komplexně dotknout všech problémů, které se týkaly jevů probíhajících ve výfuku při provozu. V první části se práce obecně zabývala mechanismy přenosu tepla, jelikož ty hrají klíčovou roli při ochlazování výfukových plynů. Byly zde zmíněny a popsány principy vedení, proudění záření protože všechny tyto jevy se u pracujícího výfuku vyskytují. Výfukové plyny vznikají v motoru, a proto jsou zde taktéž popsány termodynamické děje v motoru a také základní typy motorů používaných v praxi. Výfukový systém se skládá z trubek, ve kterých probíhá tlaková ztráta. Tato ztráta vychází z rovnic, jež zde byly dopodrobna popsány. V další části byl vysvětlen princip používání výfukového systému a z jakých důležitých částí se skládá, aby mohl efektivně plnit svou funkci. Samotný tlumič výfuku je rozdělen na několik základních a používaných typů a u každého z nich je popsána konstrukce a využití v praxi. V předposlední kapitole teoretické části jsou zmíněny oficiální technické předpisy pro plochou dráhu. Ty se týkají jak konstrukce motocyklu tak hlavně povolených typů tlumičů výfuků. Na konec je popsána kontrola hluku u motocyklů ploché dráhy, která probíhá podle přesně daných parametrů, protože všechny výfuky musí splňovat povolené normy hluku.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

Pro komplexní simulace dynamiky tekutin a sdílení tepla (CFD – computational fluid dynamics) je určen integrovaný nástroj SolidWorks Flow Simulation. Jeho praktické nasazení se týká nejrůznějších oblastí, jako je například proudění plynů ve vzduchotechnice, kapalin v potrubí, analýza chlazení uzavřených prostorů či exponovaných součástí nebo externí aerodynamika. Základní verze může být navíc rozšířena o modul HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) pro obor vzduchotechniky a klimatizace a modul Electronics Cooling určený zejména pro tepelné analýzy elektronických zařízení. [12]

### Hlavní funkce Flow Simulation: [12]

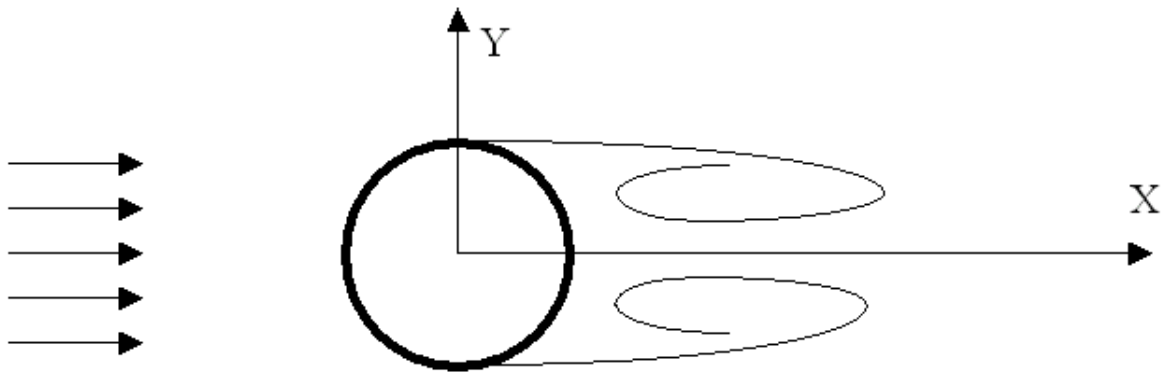
- Analýza sdílení tepla - vedením, prouděním a zářením
- Analýza vnitřního a vnějšího proudění
- Analýza rotačních oblastí (ventilátory, čerpadla,...)
- Analýza přechodových dějů, tj. časově proměnné děje

### Další funkce Flow Simulation: [12]

- Analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles (například obtékání vzduchu nad křídlem letadla nebo proudění vody kolem ponorky).
- Analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-epsilon pro výpočet turbulentního proudění (například proudění plynů z motorové trysky letadla).
- Simulace skutečného plynu pro přesné řešení aplikací plynu o vysokém tlaku nebo nízké teplotě.
- Analýza stlačitelného proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech.
- Výpočet poklesu tlaku v trubkách se započtením vlivu nerovnosti povrchu.
- Optimalizace návrhu pomocí proudění na základě parametrů simulace proudění a rozměrových parametrů.
- Analýza proudění neneutronovských kapalin (krev, zubní pasta a roztavený plast).
- Analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu.
- Analýza kavitace a identifikaci oblastí, kde k ní dochází.

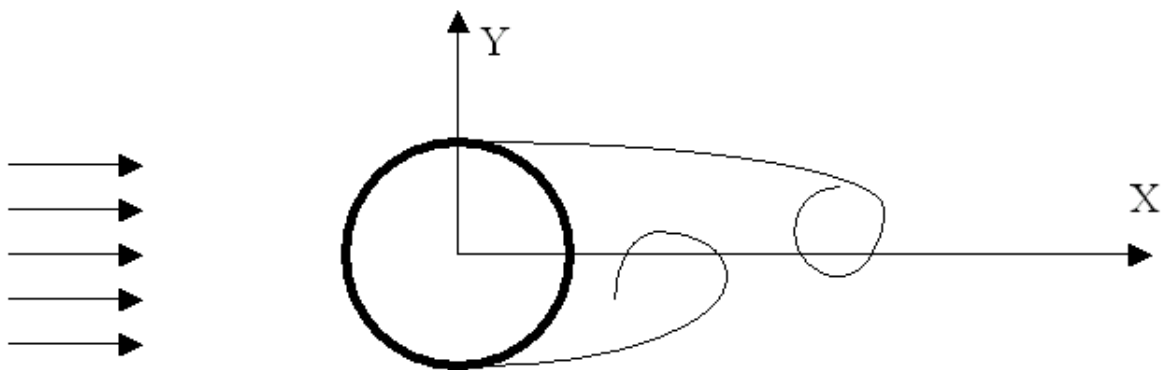
## 8.1 Tok přes kruhový válec

Na tomto příkladu si můžeme ověřit přesnost výpočtů programu SolidWorks Flow Simulation. V tomto příkladu voda o teplotě 293.2 K a tlaku 1 atm teče válcem o průměru 1m. Proudění v tomto případě do značné míry závisí na hodnotě Reynoldsova čísla. Při jeho nízkých hodnotách ( $4 < Re < 60$ ) se za válce tvoří dva stabilní víry, jak je znázorněno na obrázku č. 31. [14]



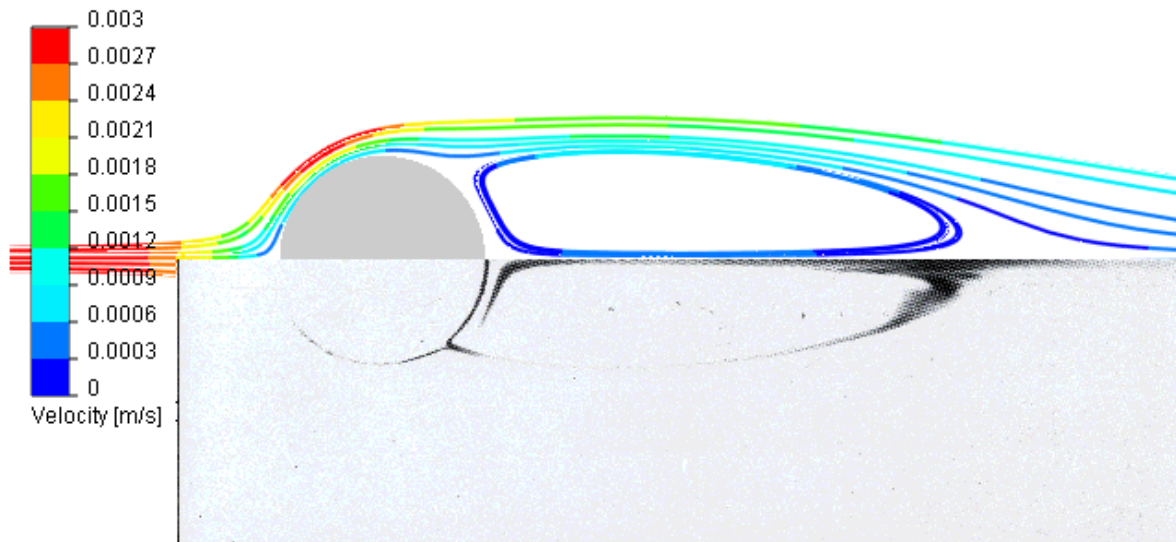
Obr. 29. Proudění kolem válce při nízkých hodnotách  $Re$  ( $4 < Re < 60$ ) [14]

Naopak při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla ( $60 \dots 100 < Re$ ) se tok stává nestabilní a navíc víry začnou kmitat, jak můžeme vidět na obrázku č. 32. [14]



Obr. 30. Proudění kolem válce při vyšších hodnotách  $Re$  ( $60 \dots 100 < Re$ ) [14]

Na obrázku můžeme vidět barevné porovnání výsledků výpočtů, které byly provedeny program Flow Simulation (přesnost výpočtu byla nastavena na 7), s fotografií pořízenou v aerodynamickém tunelu při Reynoldsově čísle rovno 41 viz obrázek č. 33. [14]



Obr. 31. Porovnání přesnosti výpočtu v programu Flow Simulation s fotografií pořízené v aerodynamickém tunelu. [14]

Součinitel odporu je definován jako: [14]

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (29)$$

Kde:

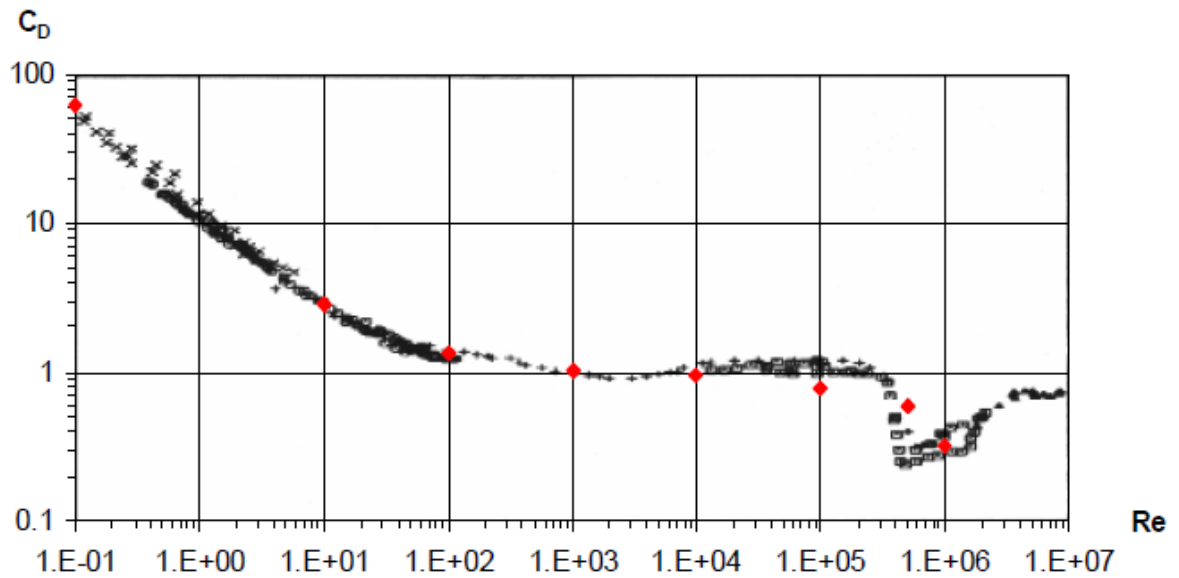
$D$  ... průměr válce [m]

$L$  ... délka válce [m]

$F_D$  ... síla působící na válec [N]

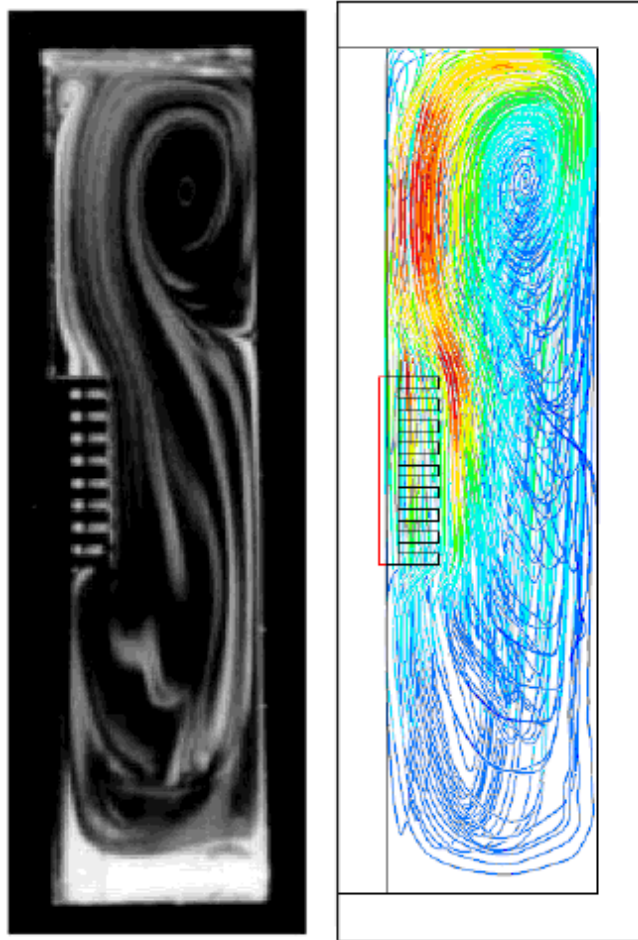
$\rho U^2/2$  ... vstupní dynamický proud

Závislost součinitele odporu  $C_D$  a Reynoldsova čísla  $Re$  podle programu Flow Simulation (červené označení) v porovnání s experimentálními výpočty (černé označení) viz obrázek č. 34. [14]



Obr. 32. Závislost součinitele odporu  $C_D$  a Reynoldsova čísla  $Re$  [14]

Dalším příkladem je demonstrace průtoku vzduchu pomocí kouře v porovnání se získanými výsledky v programu Flow Simulation (viz obrázek č. 35). [14]



*Obr. 33. Porovnání průtoku vzduch pomocí kouře a pomocí Flow Simulation [14]*

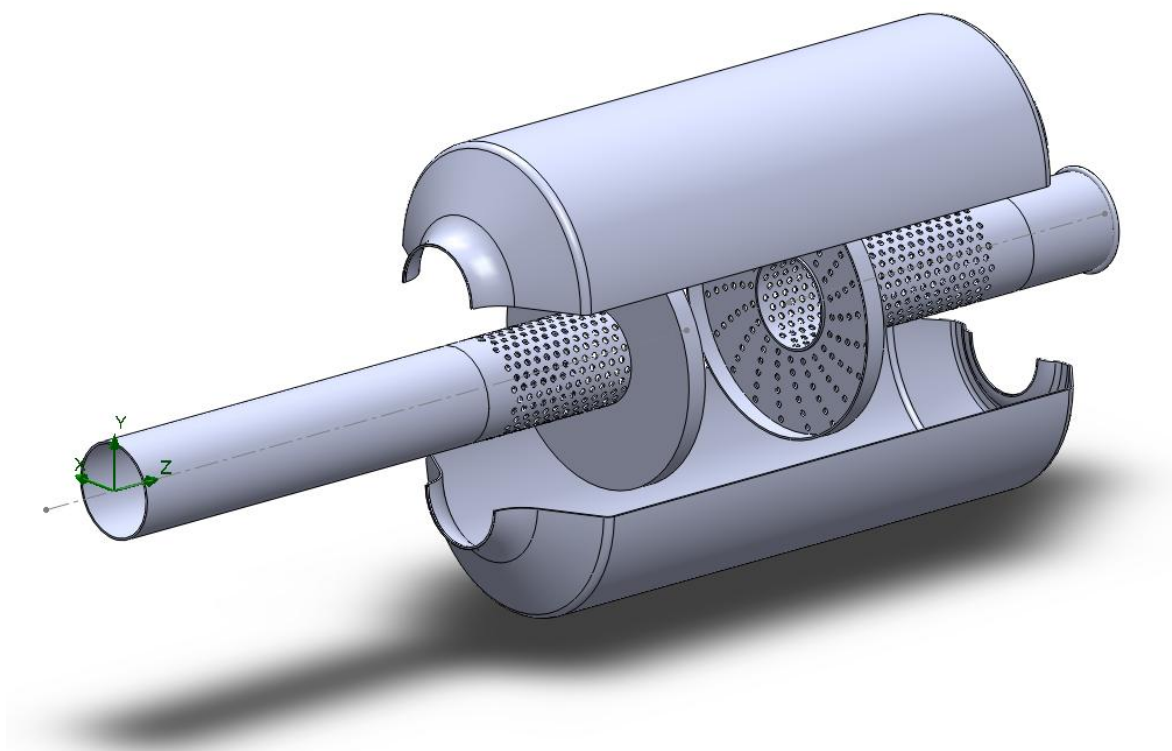


## 9 NASTAVENÍ ANALÝZY VE FLOW SIMULATION

Cílem praktické části bylo pomocí simulačního softwaru zjistit rozdíly mezi třemi druhy tlumičů výfuku primárně po termodynamické stránce. Pro spuštění analýzy bylo nutné nejdříve sestavit modely výfuků pomocí standartních nástrojů v programu Solid-Works 2012. Samotné nastavení analýzy je velmi důležité neboť při nesprávném zadání vstupních hodnot dochází k velkému zkreslení výsledků a simulace tak pozbývá smyslu. Dalším důležitým faktorem je přesnost sítě, která je limitována hardwarovým vybavením počítače. V dalších částech práce bude podrobně vysvětleno nastavení analýzy.

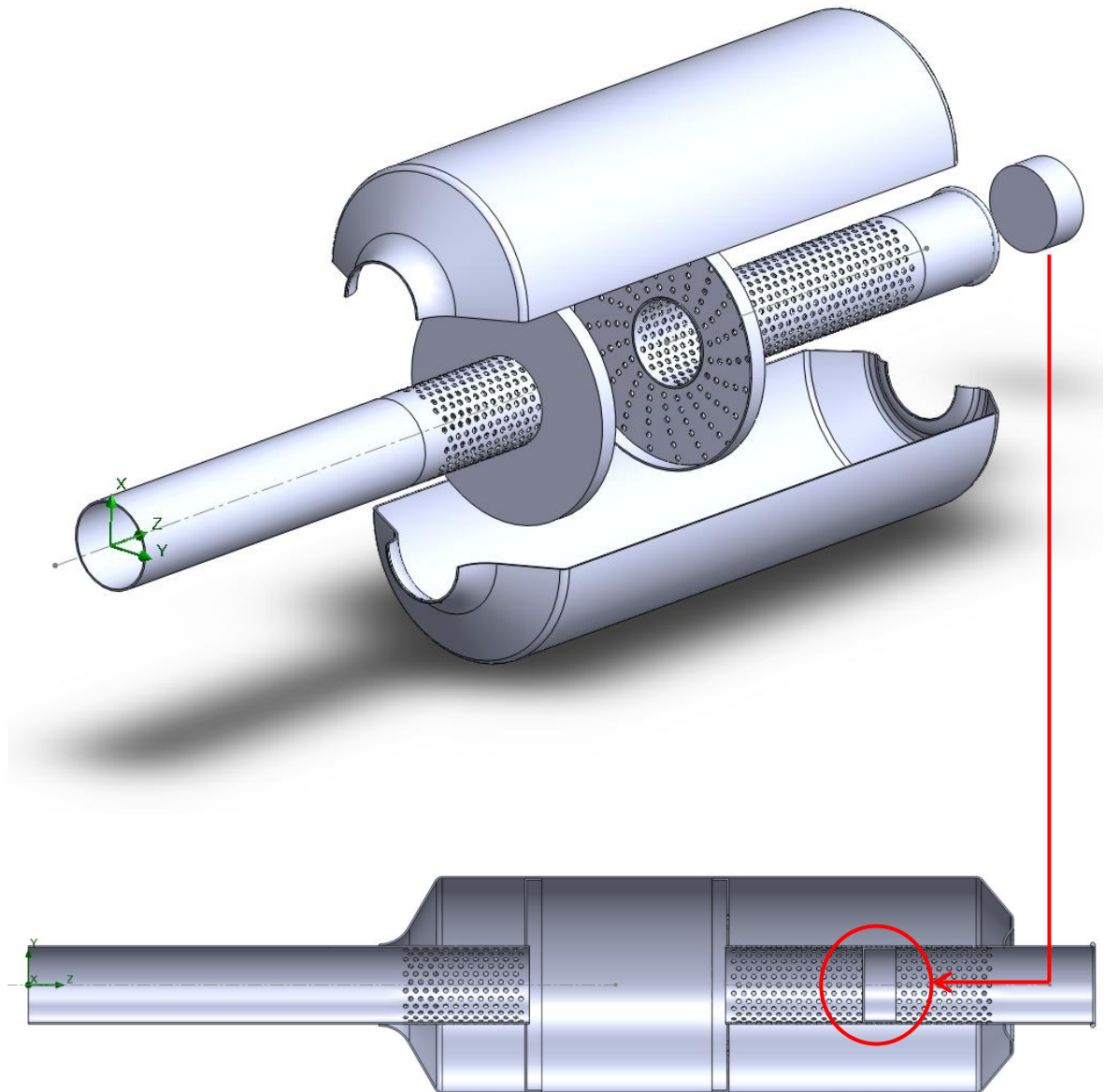
### 9.1 Vytvoření modelu

Podle zadání byly vymodelovány 3 typy výfuku. První typ byl standartní průchozí tlumič výfuku s dvěma přepážkami, z nichž na jedné byly vytvořeny díry o průměru 3 mm. Obě trubky byly provrtány taktéž dírami o průměru 3mm.



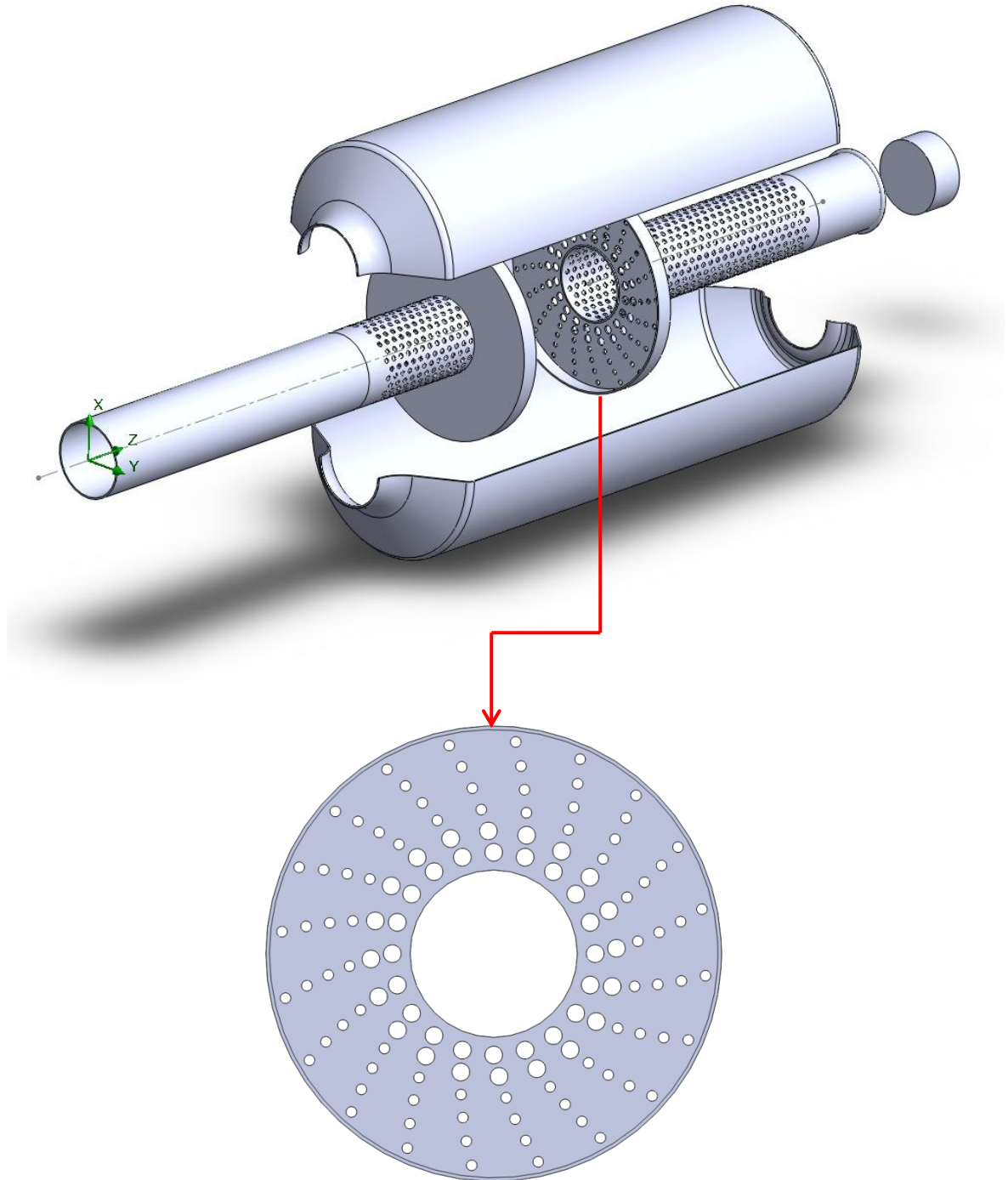
Obr. 34. Model průchozího výfuku

Druhý výfuk byl přibližně o 40 mm delší a hlavní změnou bylo přidání víčka do trubky, což mělo za následek snížení hluku ale současně i zhoršení tahu motorčky oproti prvnímu výfuku. Další konstrikční změnou je zvýšení počtu děr na těle odchozí trubky. Umístění ucpávky je zřetelně vidět na obr..



Obr. 35. Model výfuku s ucpávkou

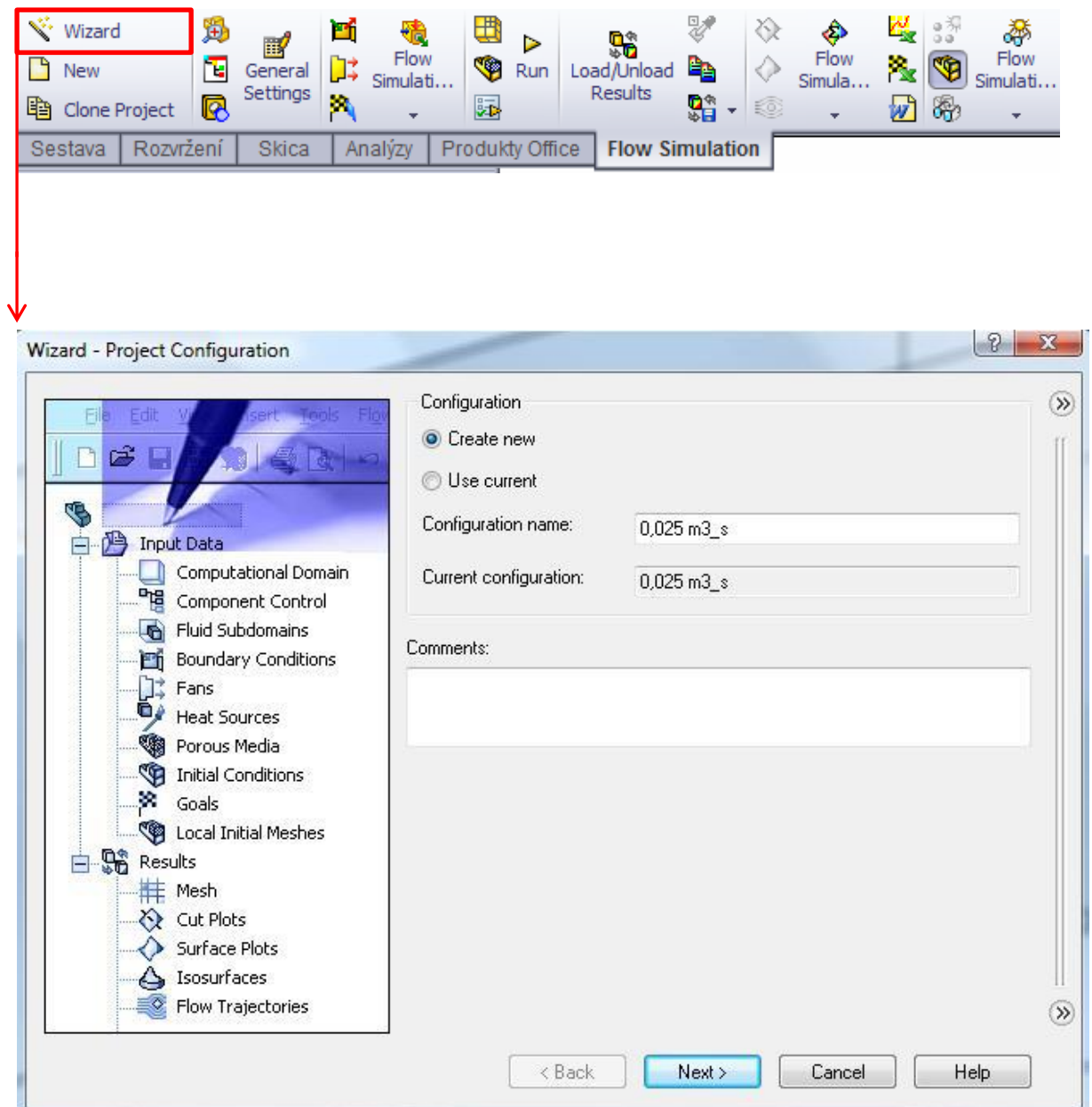
Třetí výfuk je totožný s druhým, má jen první 2 řady přepážky převrtané z rozměru 3 mm na 5 mm viz. obr... Tato relativně malá oprava měla podle samotných závodníků příznivý vliv na výkon stroje.



Obr. 36. Model výfuku s ucpávkou a převrtanými dírami

## 9.2 Vytvoření projektu

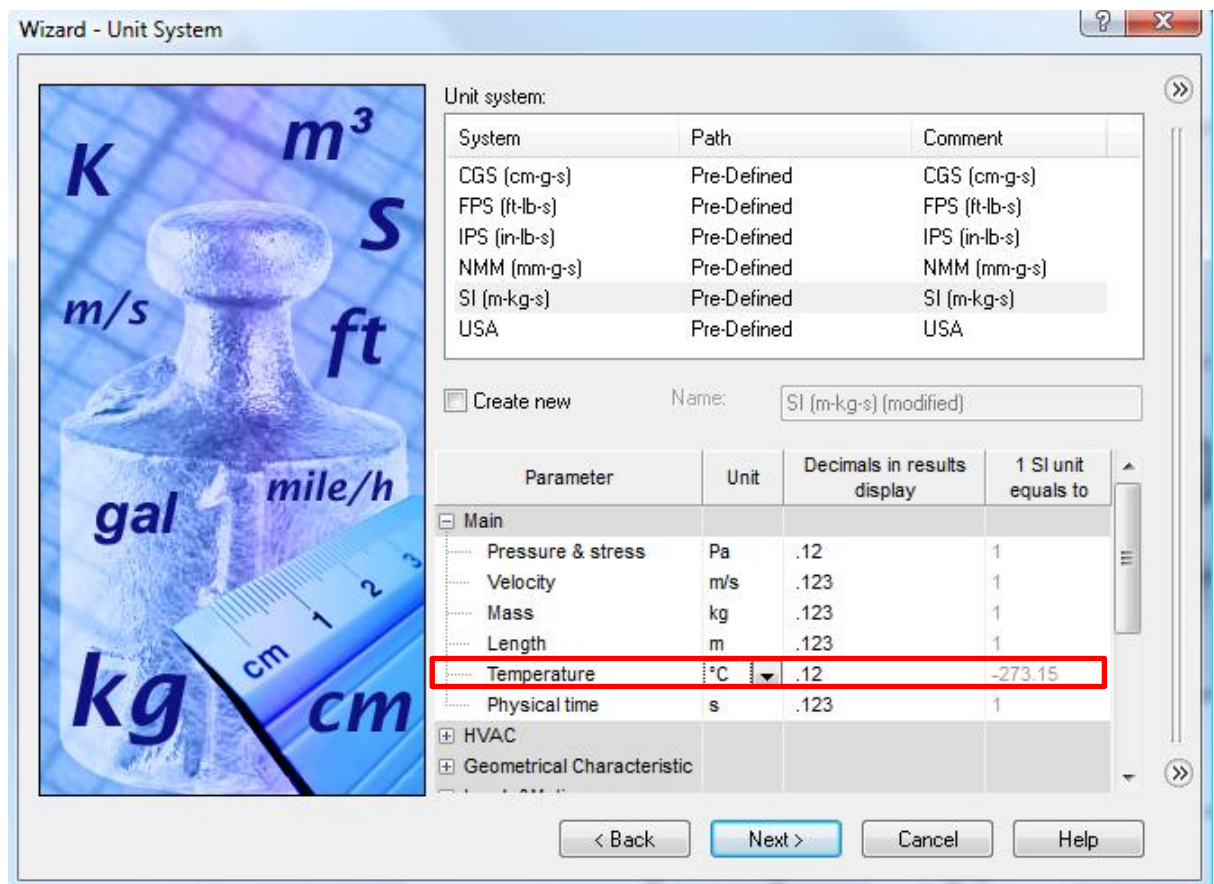
Prvním krokem k vytvoření projektu je kliknutí na funkci *Wizard*. Díky této funkci se dá relativně přehledně a jednoduše nastavit základní definiční hodnoty simulace. První bylo nutné projekt pojmenovat tak aby usnadnila orientace při vytvoření většího počtu projektů. V našem případě je určující hodnota objemový průtok plynů v tlumiči výfuku a to  $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. 37. Pojmenování projektu

### 9.3 Definice jednotek

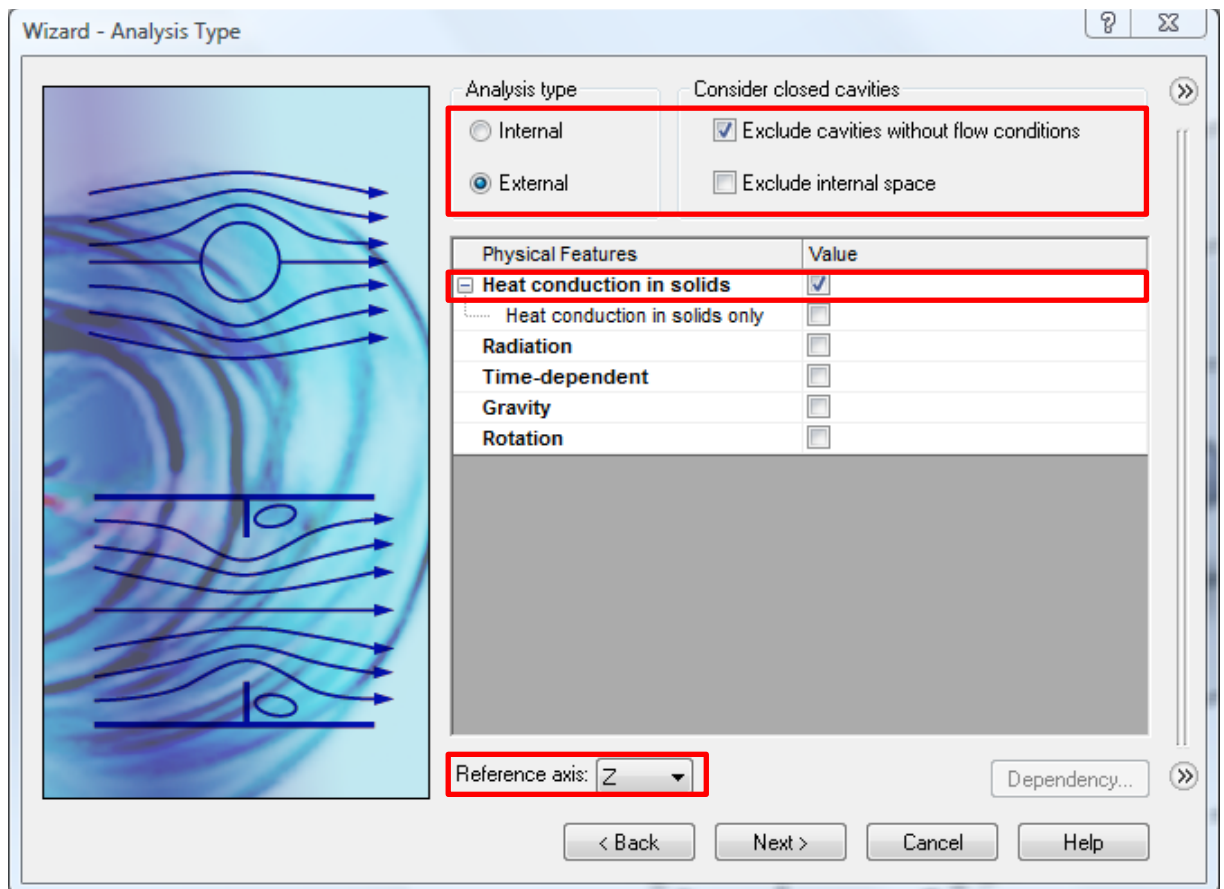
V této záložce je možné vidět nastavení jednotek v projektu. V našem případě byla zvolena defaultní hodnota normy SI. Bylo nutné změnit hodnotu teploty z K na stupně °C. Ostatní hodnoty byly ponechány beze změny.



Obr. 38. Definice jednotek

## 9.4 Definice typu analýzy

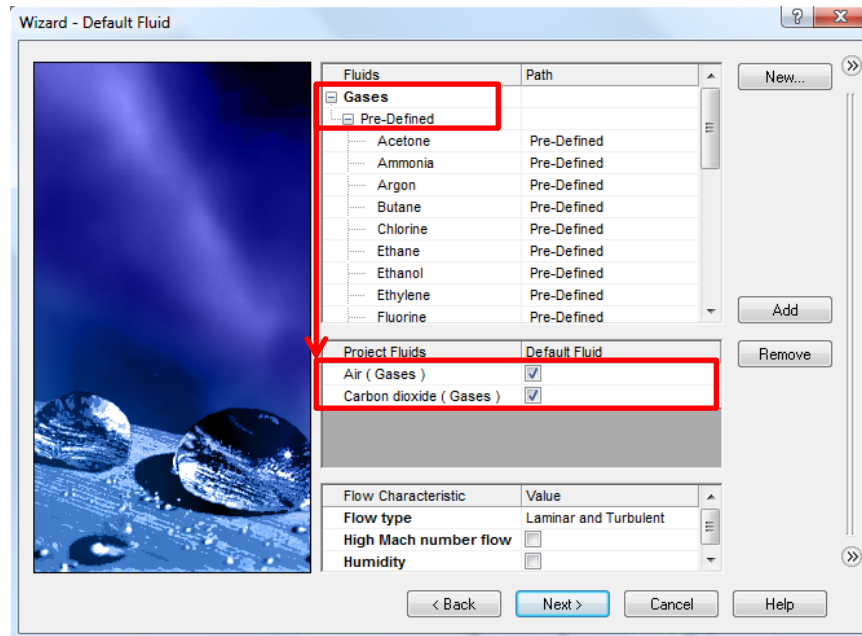
Jako typ analýzy zvolíme externí s kavitací, pokud by byl zvolen interní, tak bychom do analýzy zahrnuli pouze vnitřní proudění. Externí obsahuje jak vnější tak vnitřní proudění. Referenční osa zvolena jako Z. Dále byla zaškrtnuta možnost teplotního přestupu tepla v materiálu (*Heat conduction in solids*), neboť v tlumiči výfuku bude docházet k výměně tepla mezi výfukovými plyny a stěny z plechu. Ostatní hodnoty byly ponechány nezměněny.



Obr. 39. Definice typu analýzy

## 9.5 Definice proudícího média

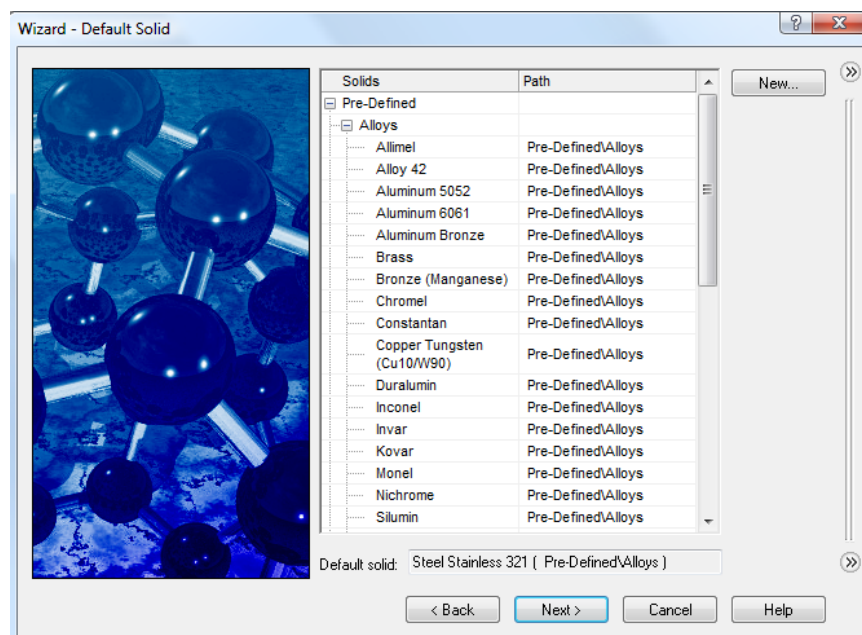
V této záložce bylo potřeba vybrat plynná média, která budou proudit výfukem a okolím. K tomuto účelu stačilo vybrat vzduch (*Air*) a Oxid uhličitý (*Carbon Dioxide*).



Obr. 40. Definice proudícího média

## 9.6 Definice materiálu tlumiče výfuku

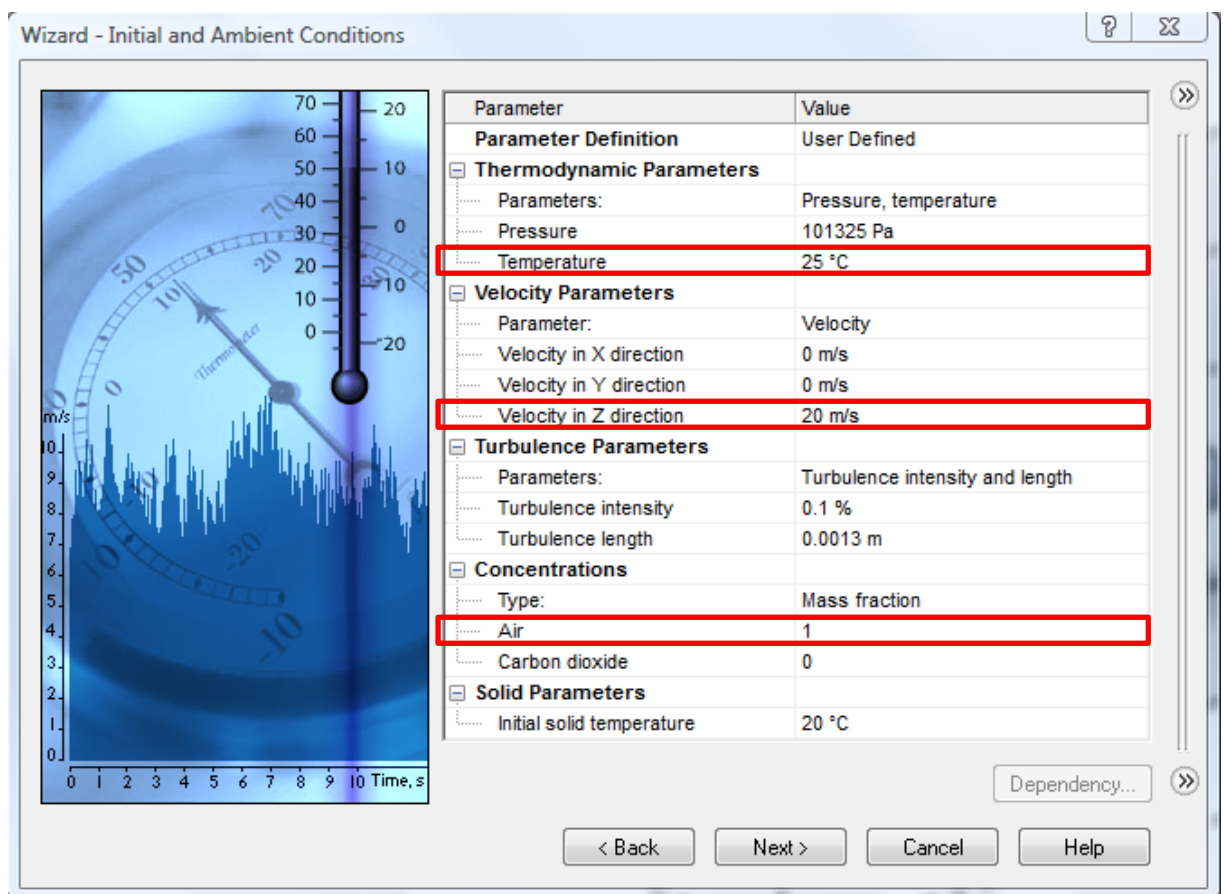
V této sekci se nastavil materiál výfuku. Byla vybrána standartní ocel Stainless 321.



Obr. 41. Definice materiálu tlumiče výfuku

## 9.7 Definice počátečních podmínek

V této tabulce se definovali počáteční podmínky analýzy. Teplota okolí byla změněna na 25°C aby více odpovídala letním podmínkám závodů ploché dráhy. Rychlost proudění okolního vzduchu byla změněna ve směru Z na 20m/s což odpovídá průměrné rychlosti motorky. Dále bylo nutné přepsat v tabulce poměr vzduchu na 1, čili že v okolí je 100% vzduch. Teplota materiálu výfuku byla jako zbytek hodnot ponechána na původních hodnotách.



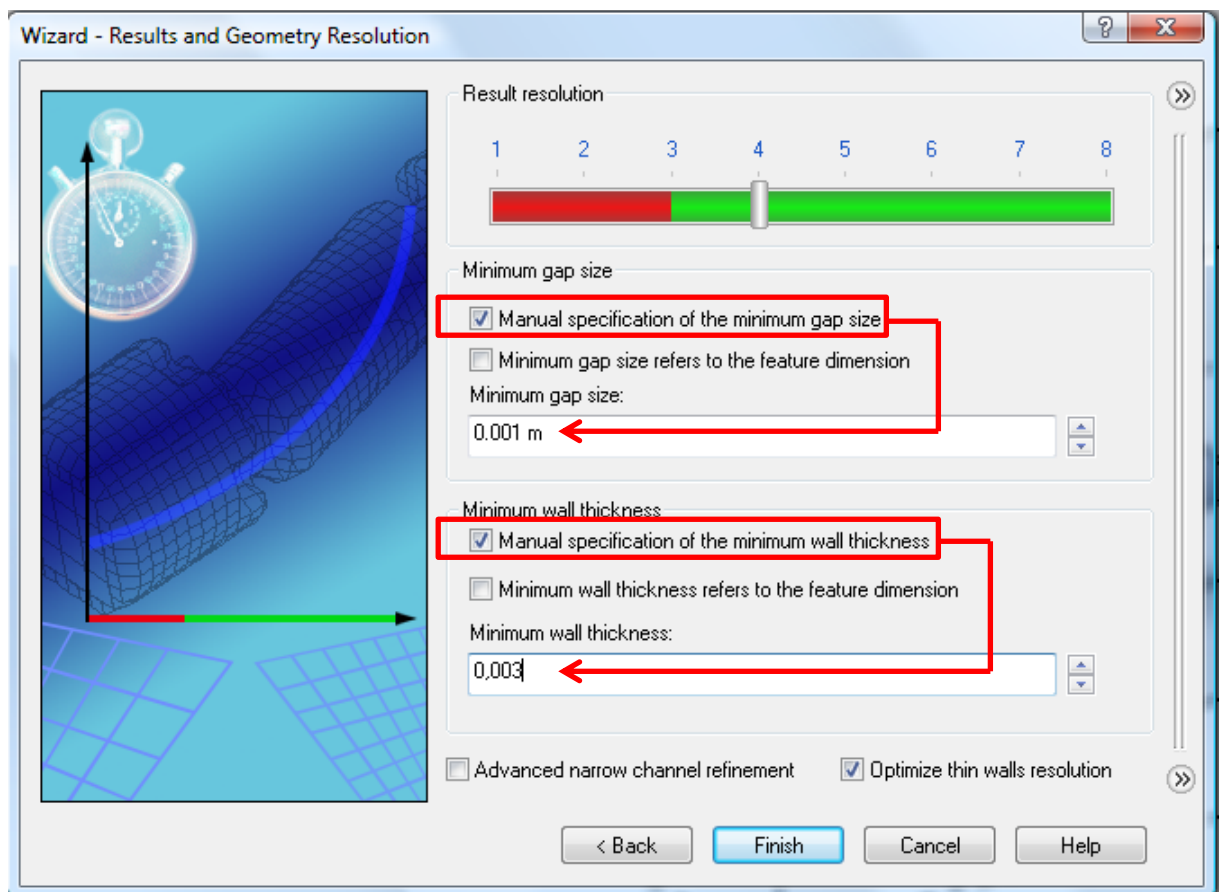
Parameter	Value
<b>Parameter Definition</b>	User Defined
<input type="checkbox"/> <b>Thermodynamic Parameters</b>	
Parameters:	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Temperature	25 °C
<input type="checkbox"/> <b>Velocity Parameters</b>	
Parameter:	Velocity
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	20 m/s
<input type="checkbox"/> <b>Turbulence Parameters</b>	
Parameters:	Turbulence intensity and length
Turbulence intensity	0.1 %
Turbulence length	0.0013 m
<input type="checkbox"/> <b>Concentrations</b>	
Type:	Mass fraction
Air	1
Carbon dioxide	0
<input type="checkbox"/> <b>Solid Parameters</b>	
Initial solid temperature	20 °C

Obr. 42. Definice počátečních podmínek



## 9.8 Definice sítě

Tato velmi důležitá část nastavení je poslední záložka v nastavení a věnuje se velikosti a přesnosti sítě. Barevná stupnice (*Result resolution*) nám přehledně říká jaká je nastavená přesnost výpočtu. Začíná na 1, kdy se nedají očekávat použitelné výsledky až po 8 kdy je jich výsledek velmi přesný. Nevýhodou vysoké přesnosti jsou obrovské nároky na výpočetní výkon počítače. V našem případě byla zvolena hodnota 4, která je určitým kompromisem. V dalších oknech byla manuálně nastavena hustota sítě na 0,001m a minimální tloušťka stěny na 0,003 m.

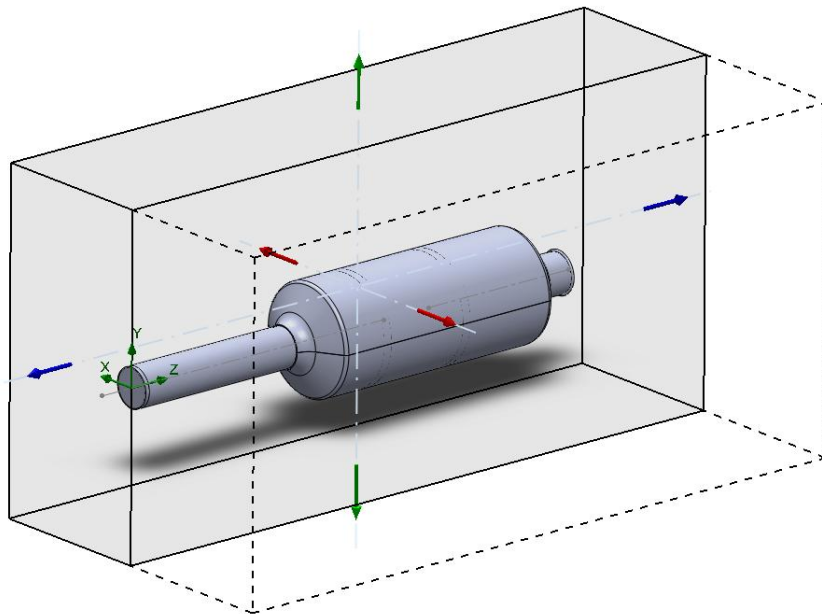


Obr. 43. Definice sítě

Tímto krokem se ukončilo základní nastavení analýzy. Po kliknutí na tlačítko *Finish* se vytvořila v postranním levém panelu záložka *Flow Simulation Tree*. Zde pokračovalo další nastavení analýzy.

## 9.9 Definice oblasti výpočtu

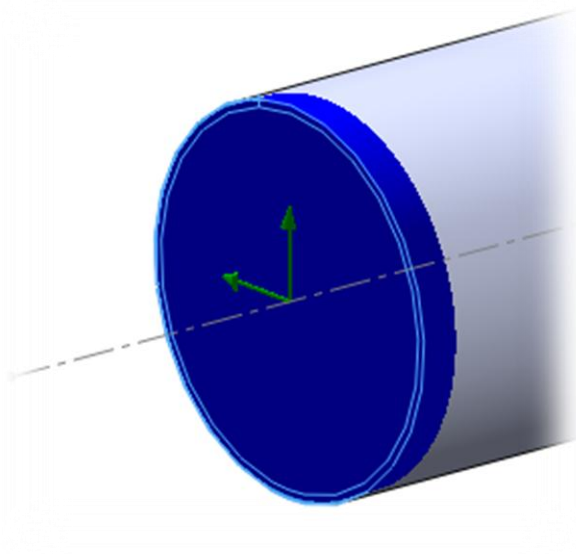
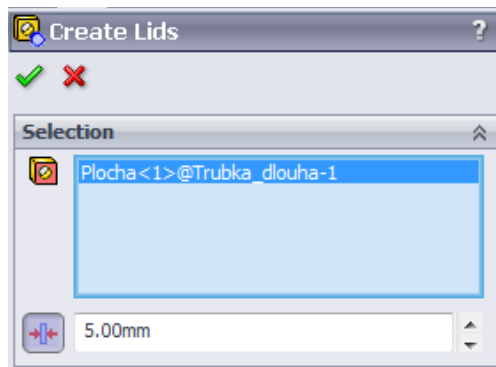
Prvním krokem v rozšířeném nastavení analýzy byla definice oblasti výpočtu neboli v jak velké oblasti bude proudit okolní vzduch kolem výfuku. Musel být volen kompromis, tak aby oblast nebyla příliš velká neboť by to prodloužilo dobu výpočtu. Příliš malá oblast by zase mohla opomenout zajímavé výsledky analýzy, jako například proudění za objektem atd. Dále zde byla využita souměrnost výfuku a to tak, že oblast výpočtu byla zmenšena na polovinu. Osa prochází středem výfuku a počátek byl umístěn přímo na hranu vstupní trubky, aby nedocházelo ke zkreslení proudění. Tento efektivní krok nám dobu výpočtu zkrátil cca o polovinu.



Obr. 44. Definice oblasti výpočtu

## 9.10 Definice vnitřního proudění ve výfuku

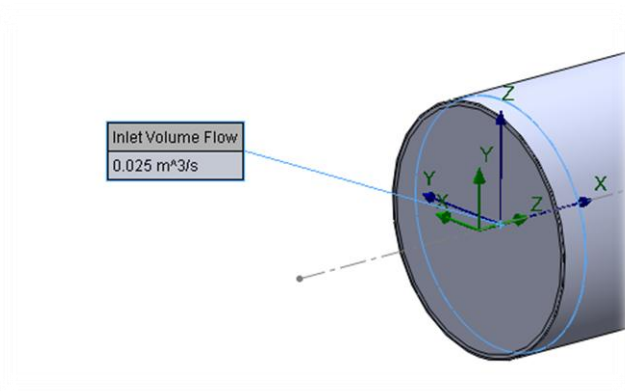
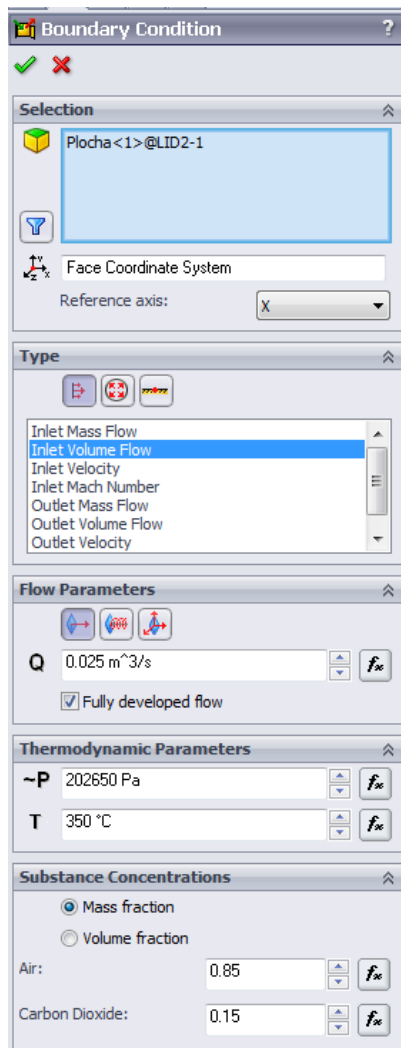
V analýze bylo zapotřebí nadefinovat dvě různá proudění. První bylo proudění vzduchu za jízdy kolem výfuku a další bylo proudění výfukových plynů z motoru přes tlumič ven do prostředí. Venkovní proudění bylo již nadefinováno v předchozích krocích. Pro vytvoření vnitřního proudění bylo nejdříve nutné vytvořit speciální plochu, ze které bude proudění vycházet. Toto víčko (*Lid*) bylo vytvořeno pomocí funkce *Create Lids*, kde stačilo vybrat plochu, kterou uzavře. V tomto případě to byla hrana, kde by bylo připojeno výfukové potrubí. Tloušťka víčka byla nastavena na 5mm.



Obr. 45. Definice víčka

Po vytvoření víčka již bylo možné přímo nastavit vnitřní proudění. To se provedlo ve stromu *Flow Simulation* funkcí *Boundary Condition*. Zde se již přímo daly nastavit jednotlivé hodnoty. Nejdříve bylo ovšem nutné vybrat plochu, ze které bude proudění vycházet. Tou plochou byla vnitřní plocha víčka. Osou proudění byla zvolena X. Z typů proudění byl vybrán vnitřní objemový průtok (*Inlet Volume Flow*), který byl nastaven na  $0,025\text{m}^3/\text{s}$ .

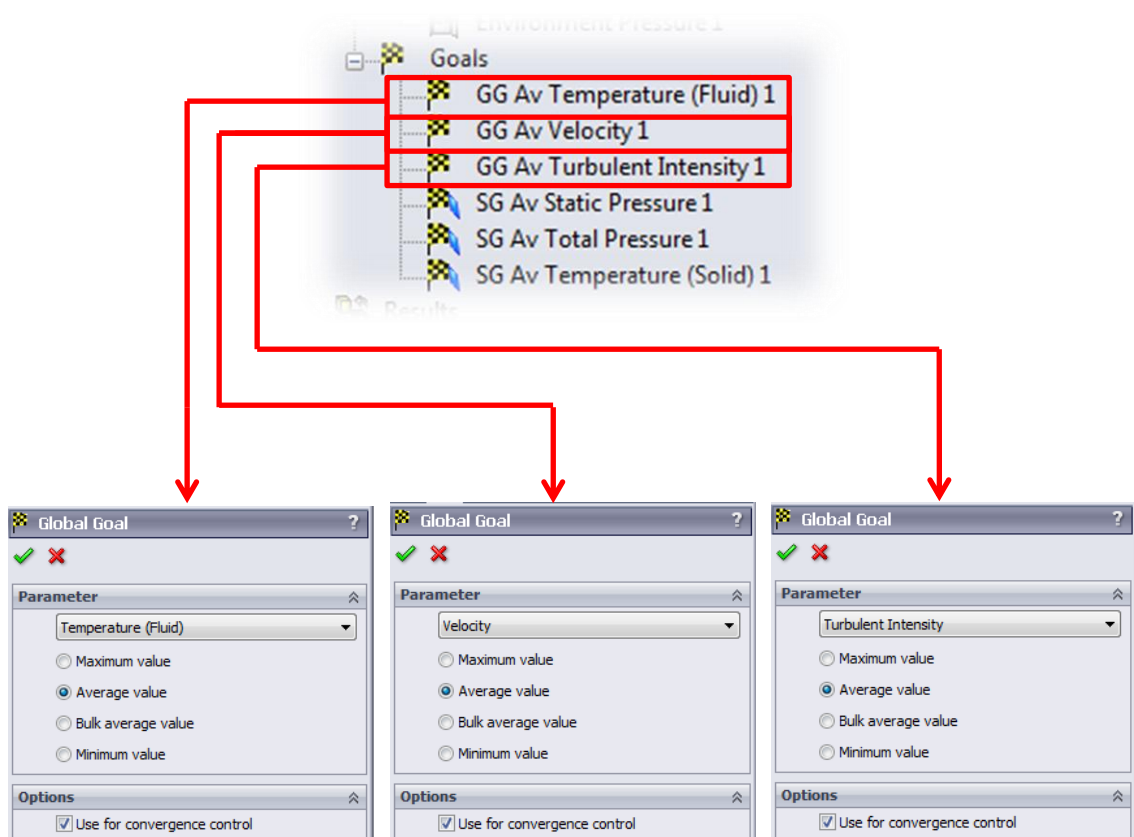
Dále byla možnost plně vyvinutého proudění (*Fully Developed Flow*), což znamená, že od počátku bude proudění na nastavených hodnotách a nebude se k nim přibližovat od 0. Tlak byl nastaven na dvojnásobek atmosférického (202650 Pa) a teplota na 350°C. Směs proudící výfukem obsahuje 15% oxidu uhličitého a 85% vzduchu.



Obr. 46. Definice vnitřního proudění ve výfuku

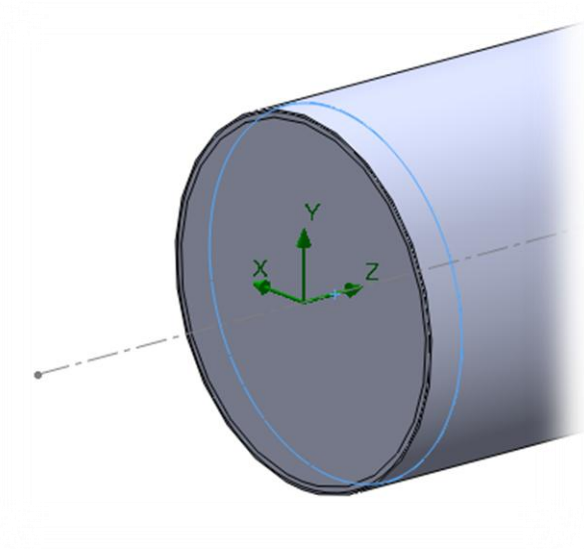
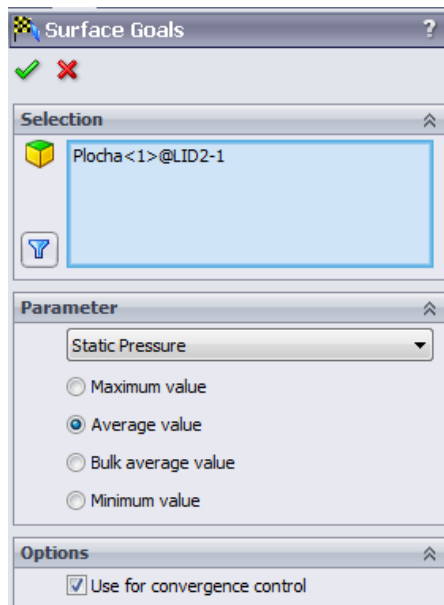
## 9.11 Definice cílů analýzy

Po nastavené analýzy bylo také nezbytné vybrat výsledky, které budou v daném případě nejvíce vypovídající o příznivých nebo negativních změnách konstrukce výfuků. S každým dalším cílem analýzy se prodlužuje doba výpočtu a tak bylo nutné vybrat adekvátní počet. Nakonec bylo zvoleno 6 cílů (*Goals*). První tři jdou globální cíle, které se používají pro zjištění hodnot v celém prostoru simulace a nejsou například vztaženy pouze na nějakou plochu. Prvním výsledkem byla teplota proudících plynů, dále rychlost proudění a nakonec intenzita turbulencí. U těchto tří výsledků byla pouze zaškrtnuta průměrná hodnota (*Average value*).



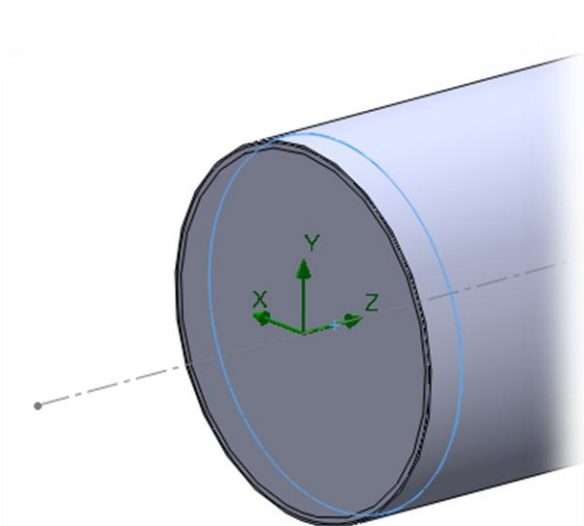
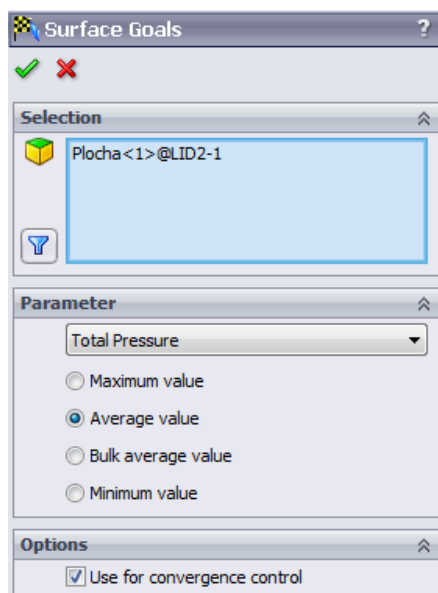
Obr. 47. Definice Global Goals

Další cíle měli zjistit hodnoty veličin vztahující se ke konkrétním plochám (*Surface Goals*). První takovou veličinou byl statický tlak ve výfuku. Jako plocha byla zvolena vnitřní strana víčka.



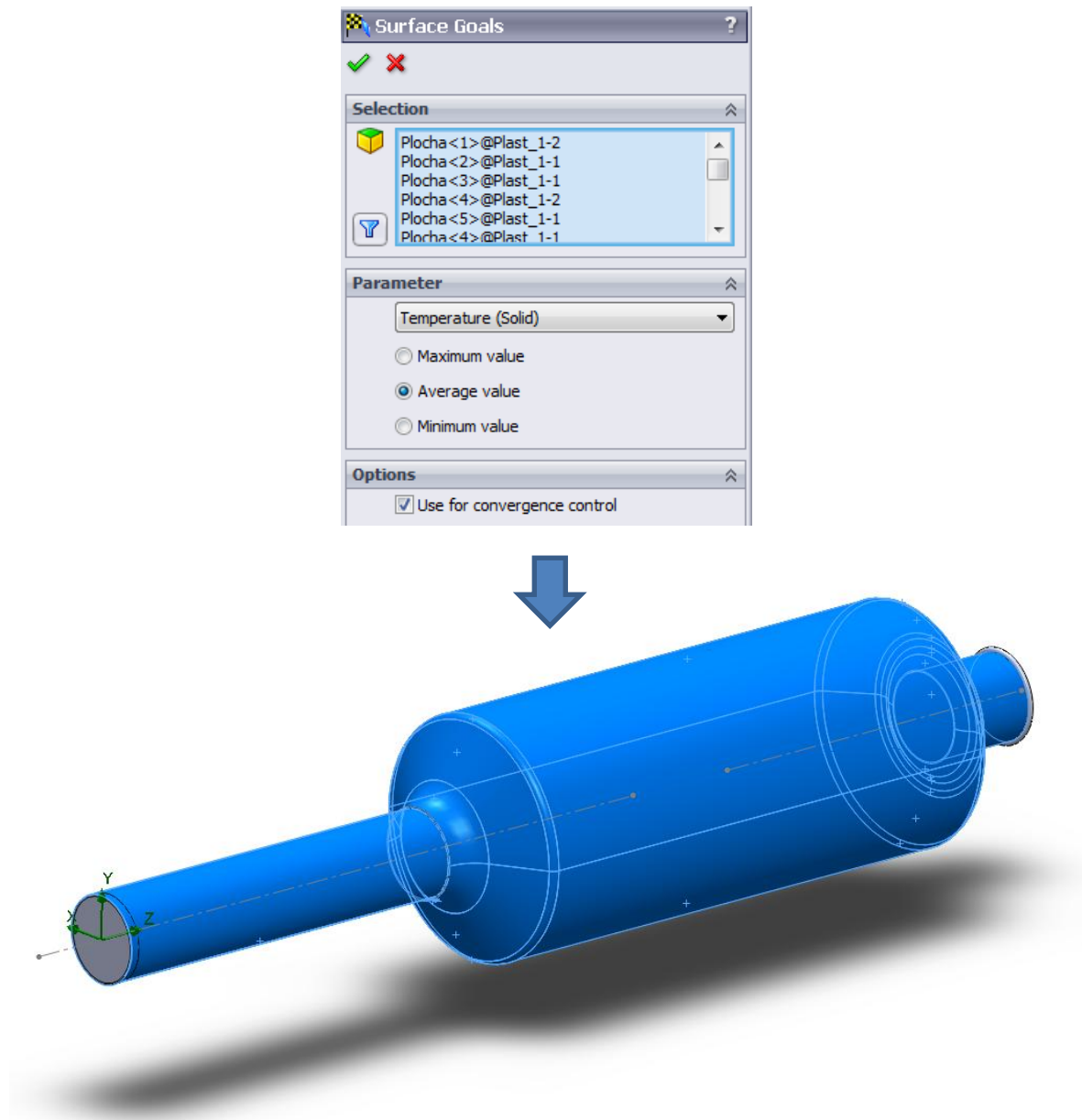
Obr. 48. Definice Surface Goals: Static Pressure

Stejně jako statický tlak tak i celkový tlak byl nastaven na vnitřní plochu víčka.



Obr. 49. Definice Surface Goals: Total Pressure

Posledním cílovým výsledkem byla teplota povrchu výfuku, kde lze sledovat zajímavé výsledky ohřívání povrchu výfuku horkými výfukovými plyny. Byly vybrány všechny vnější plochy výfuku



Obr. 50. Define Surface Goals: Temperature (Solid)

## 10 VÝPOČET

Jak už bylo řečeno v předchozích kapitolách, tak doba výpočtu se značně liší model od modelu díky různé složitosti konstrukce. V těchto případech, kdy byla zvolena přesnost výpočtu 4, je zřetelně vidět, že nejmenší dobu výpočtu má průchozí výfuk. To může být způsobeno relativní jednoduchostí průchodu vzduchu, jelikož proudící vzduch nenaráží na žádnou překážku. Doba výpočtu tohoto modelu je 1,72 h. Další dva téměř konstrukčně shodné modely mají délku výpočtu cca. 2x delší. Model s ucpávkou má dobu výpočtu 3,34 h a navrtný model má 4,14h. V následující tabulce jsou vypsány časy analýz pro jednotlivé modely spolu s počty buněk. Je zřejmé, že časová náročnost simulace je přímo úměrná počtu buněk. Pro zjištění časové náročnosti výpočtu na přesnost 7 byla spuštěna simulace pouze pro vytvoření sítě. Po porovnání údajů z tabulek je vidět, že se zvýšením přesnosti vzrostl počet buněk na 344 183 z 194715. Tento nárůst buněk o přibližně 70% by znamenal prodloužení doby výpočtu přibližně o 50-60%, neboť délka výpočtu záleží na mnoha dalších parametrech.

Tab. 6: Tabulka shrnující informace o počtech buněk a celkový čas výpočtu pro přesnost výpočtu 4

	<b>Průchozí</b>	<b>S ucpávkou</b>	<b>S ucpávkou - navrtný</b>
<b>CPU time</b>	<b>1,72</b>	<b>3,34</b>	<b>4,14</b>
<b>Iteration</b>	242	208	252
<b>Cells</b>	194715	457808	460958
<b>Fluid Cells</b>	109945	227781	229871
<b>Solid Cells</b>	7653	35098	34964
<b>Partial Cells</b>	77117	194929	196123

Tab. 7: Tabulka shrnující informace o počtech buněk a celkový čas výpočtu pro přesnost výpočtu 7

	<b>Průchozí</b>
<b>Cells</b>	344183
<b>Fluid Cells</b>	216721
<b>Solid Cells</b>	10580
<b>Partial Cells</b>	116882

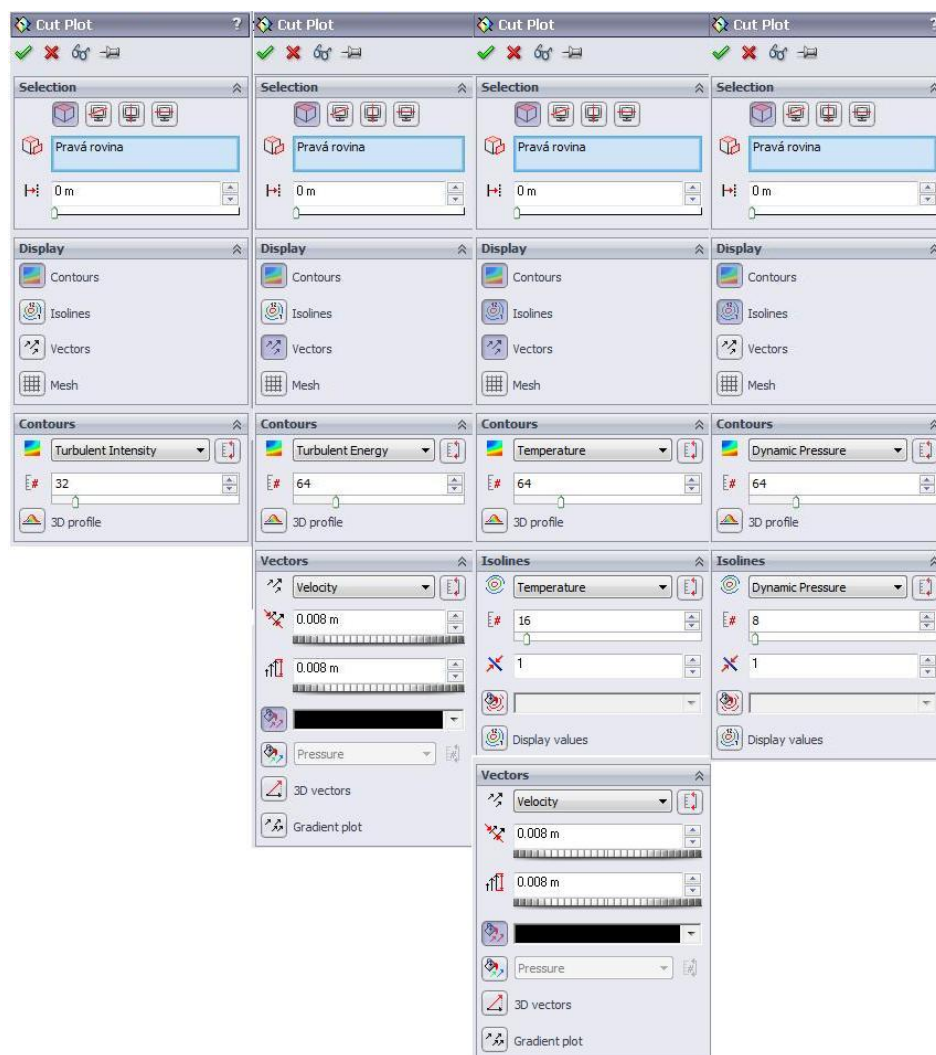


## 11 VÝSLEDKY PRO 1. TYP VÝFUKU: BEZ UCPÁVKY

Pro zobrazení výsledků má program SolidWorks 2012 mnoho užitečných nástrojů a je pouze na uživateli, který si pro daný výsledek vybere. V tomto případě bylo využito celé řady nástrojů. Některé výsledky byly zobrazeny pomocí *Cut Plot*, jelikož bylo potřeba znát rozložení hodnot v celém objemu výfuku. Dále byl využit *Surface Plot*, který ukazoval hodnoty na některé z ploch. Nakonec pro přehledné zobrazení rychlosti proudění bylo využito *Flow Trajectories*.

### 11.1 Cut Plots

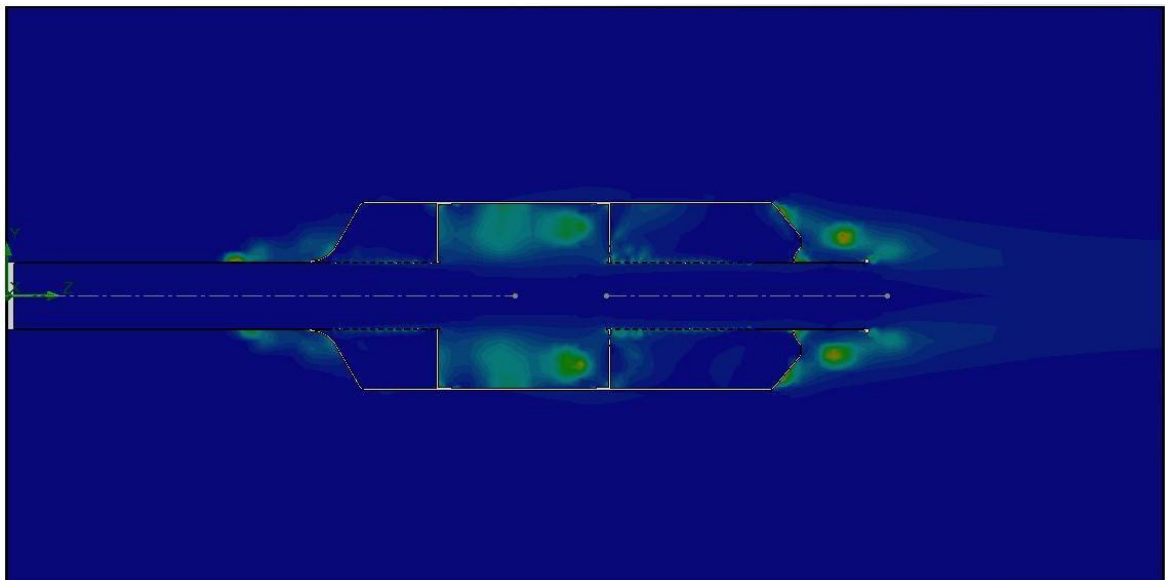
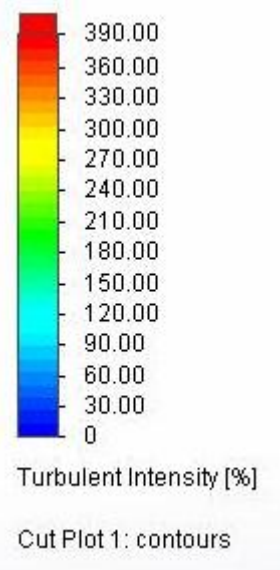
Jak už se řeklo v předchozí kapitole, tak tato funkce byla využita primárně pro zobrazení hodnot v celém objemu prostoru simulace. Pro přehledné a použitelné zobrazení bylo taktéž nutné správně nastavit parametry zobrazení výsledku viz. obrázek č..



Obr. 51. Cut Plots: Nastavení zobrazení

### 11.1.1 Cut plot: Turbulent Intensity

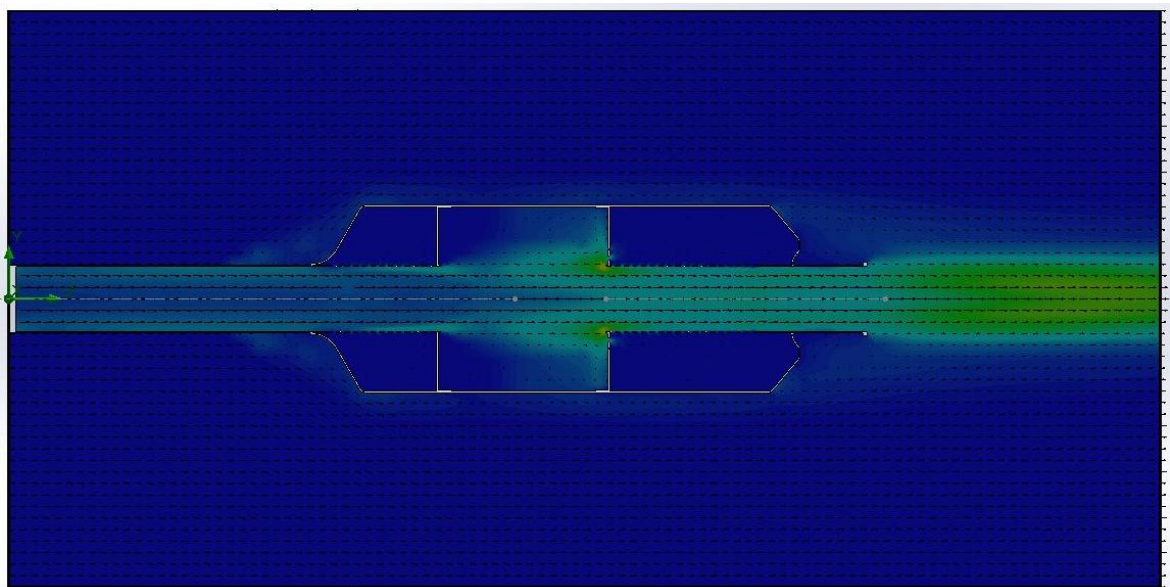
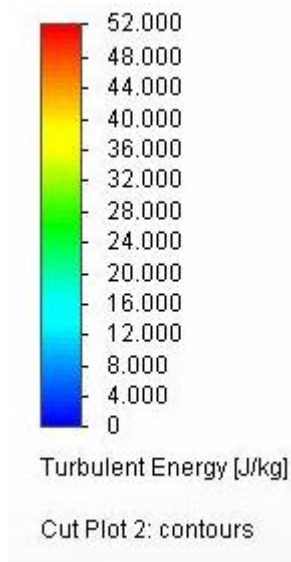
Tento výsledek ukazuje intenzitu turbulencí v tlumiči výfuku a také v prostředí kolem něj při zadaných parametrech v %. Je možno vidět, že největší turbulence vznikají za výfukem a i mezi přepážkami uvnitř výfuku a dosahuje maximálních hodnot 390 %. Naopak první a třetí komora jsou téměř bez turbulencí. Je to částečně způsobeno průchozí konstrukcí výfuku, která nedovoluje využití těchto komor proudícím vzduchem.



Obr. 52. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Turbulent Intensity

### 11.1.2 Cut plot: Turbulent Energy

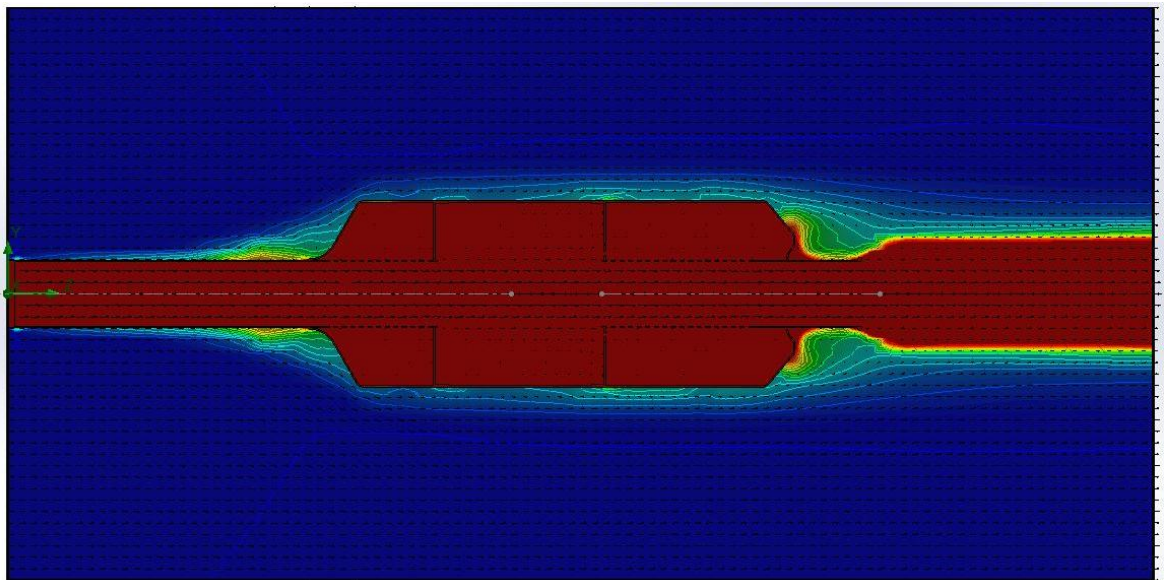
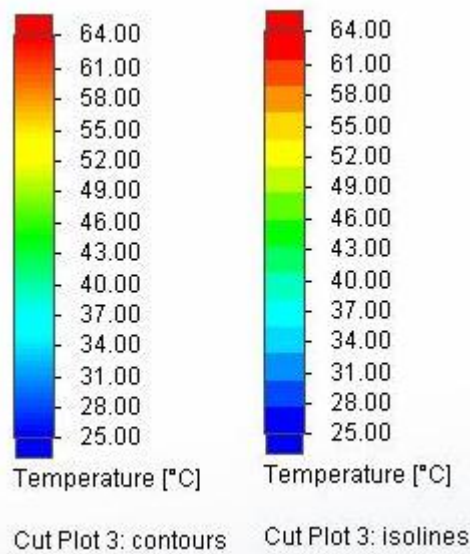
Energie turbulencí ukazuje kolik energie má proudění v daném místě. Z obrázku je zřetelně vidět, že největší energii je za ústím výfuku, kde dosahuje hodnot až 52 J/Kg. Dále má zvýšenou hodnotu u druhé přepážky.



Obr. 53. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Turbulent Energy

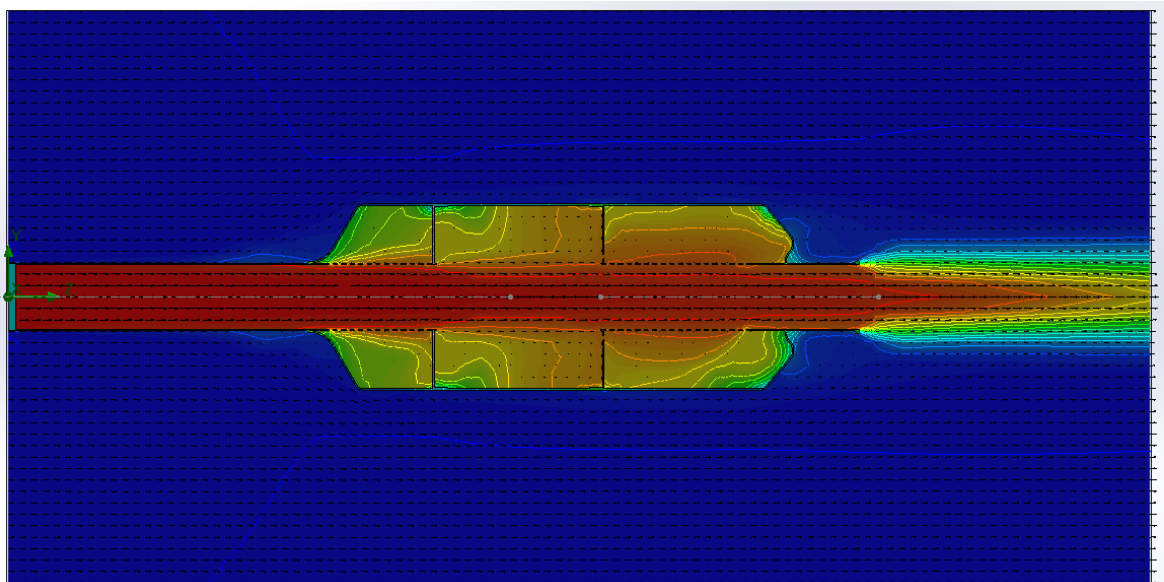
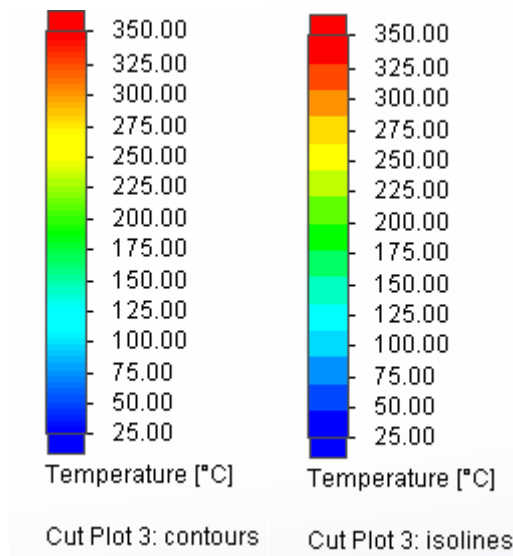
### 11.1.3 Cut plot: Temperature

Teplota proudícího plynu je jedním z klíčových sledovaných parametrů. Neméně zajímavé ale bylo i o kolik se ohřival vzduch kolem tlumiče výfuku. Z následujícího obrázku je zřetelně patrné, že vzduch se ohřival nejvýce u ústí trubky do tlumiče a taktéž u výstupu z tlumiče. Teplota zde dosahovala hodnot cca 50-60 °C. Aby bylo jasné vidět ohřívání okolního vzduchu tak muselo být upraveno příslušné měřítko.



Obr. 54. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku

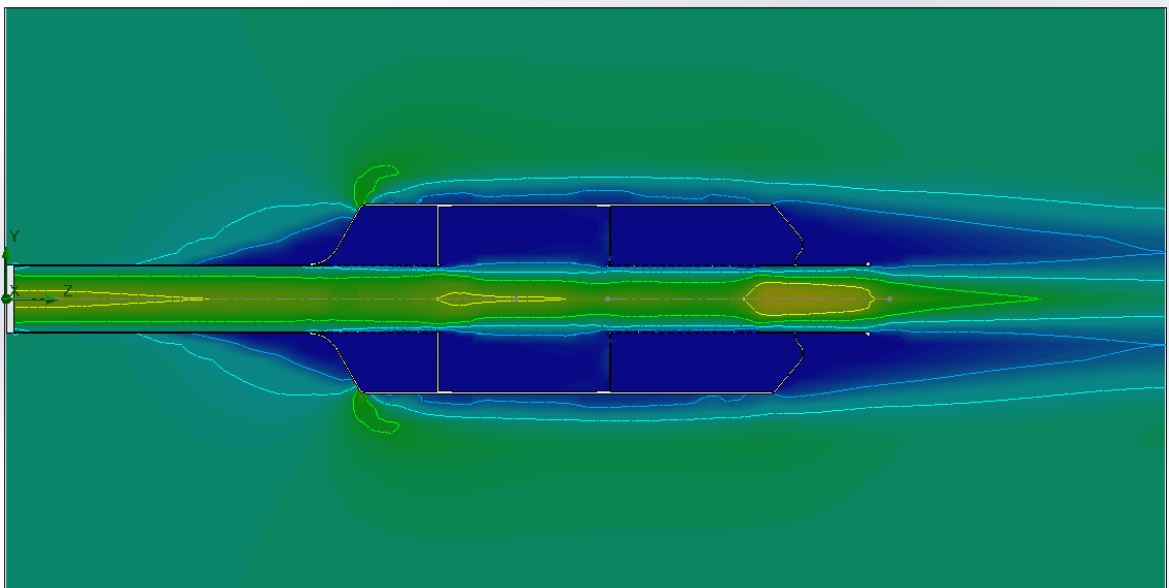
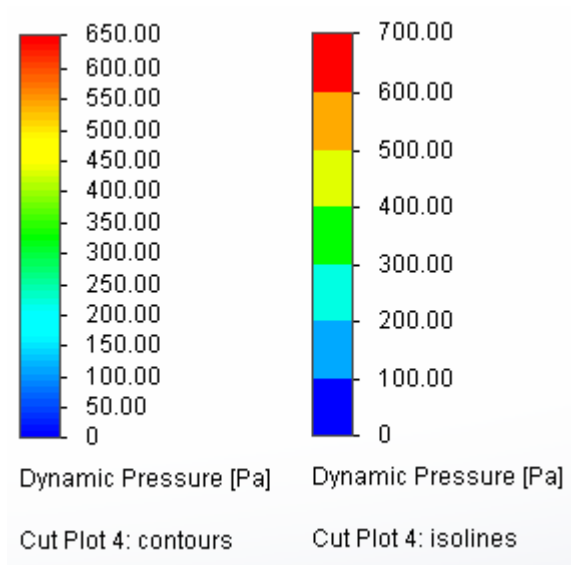
Po analýze předchozího výsledků bylo upraveno měřítko tak, aby bylo patrné ochlazování výfukových plynů uvnitř výfuku. Z obrázku je vidět, že plyny se ochlazovaly velmi omezeně a to z 350°C pouze o nějakých 20 °C. Přepážky v tlumiči jsou k ochlazování téměř nevyužité a tak k rapidnímu ochlazení docházelo až po výstupu z výfuku.



Obr. 55. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů

### 11.1.4 Cut plot: Dynamic Pressure

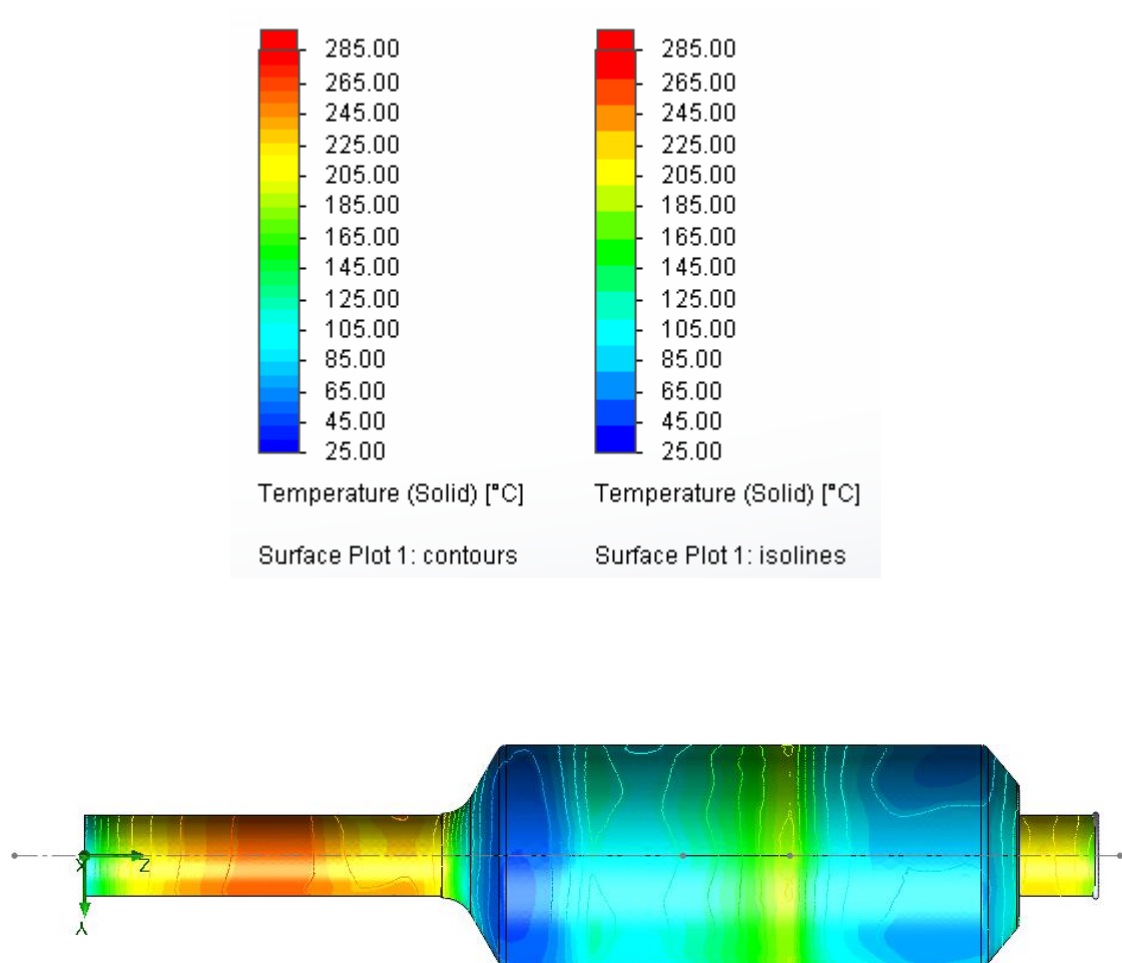
Jedním z klíčových sledovaných parametrů je i tlak ve výfuku. V tomto případě byl zvolen dynamický. Z obrázku je názorně vidět rozložení tlaku. Ten dosahuje maximálních hodnot primárně u ústí výfuku a dále vysokých hodnot v potrubí. Naopak téměř žádný tlak není v přepážkách a také podle předpokladu těsně za výfukem, kde se tvoří turbulence. Maximum mělo hodnotu cca 546 Pa.



Obr. 56. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Dynamic Pressure

### 11.1.5 Surface plot: Temperature (Solid)

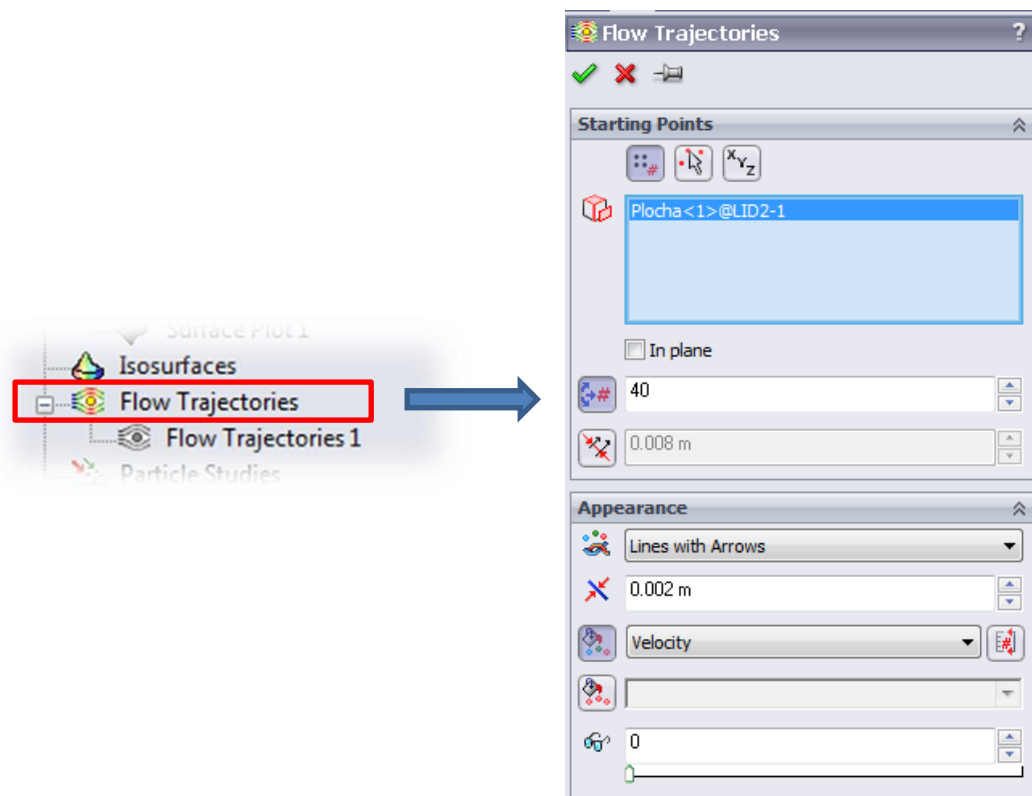
Tento další zajímavý parametr ukazuje rozložení teplot na povrchu výfuku při proudění výfukových plynů výfukem. Teplota povrchu výfuku dosahovala v maximech teploty 285 °C a byla dislokována hlavně v potrubí, kde proudil ohřátý plyn z motoru. Důkazem o relevantnosti výsledků SolidWorks Flow Simulation může být zjištění, že podle obrázku je zvýšená teplota povrchu také v místě druhé přepážky, kde ohřátý plyn naráží na plech. Stejně zjištění (začerněné místo) bylo zjištěno u skutečného výfuku v praxi.



Obr. 57. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature (Solid)

## 11.2 Flow Trajectories

Nastavení zobrazení proudění pomocí čar vyžadovalo přesnější definici okrajových podmínek, protože při nevhodném zadání by byly výsledky nepřehledné a dále nepoužitelné. První byla vybrána plocha, ze které budou vystupovat čáry symbolizující proudění. Dalším krokem bylo definování počtu těchto čar. V tomto případě stačilo pro zachování přehlednosti 40. Vzdálenost mezi čarami 8 mm byla ponechána. Na konec byl vybrán parametr, který byl sledován, a v tomto případě to byla rychlost. Typ čar byl změněn na čáry s šipkami (*Lines with Arrows*) a jejich tloušťka činila 2 mm.

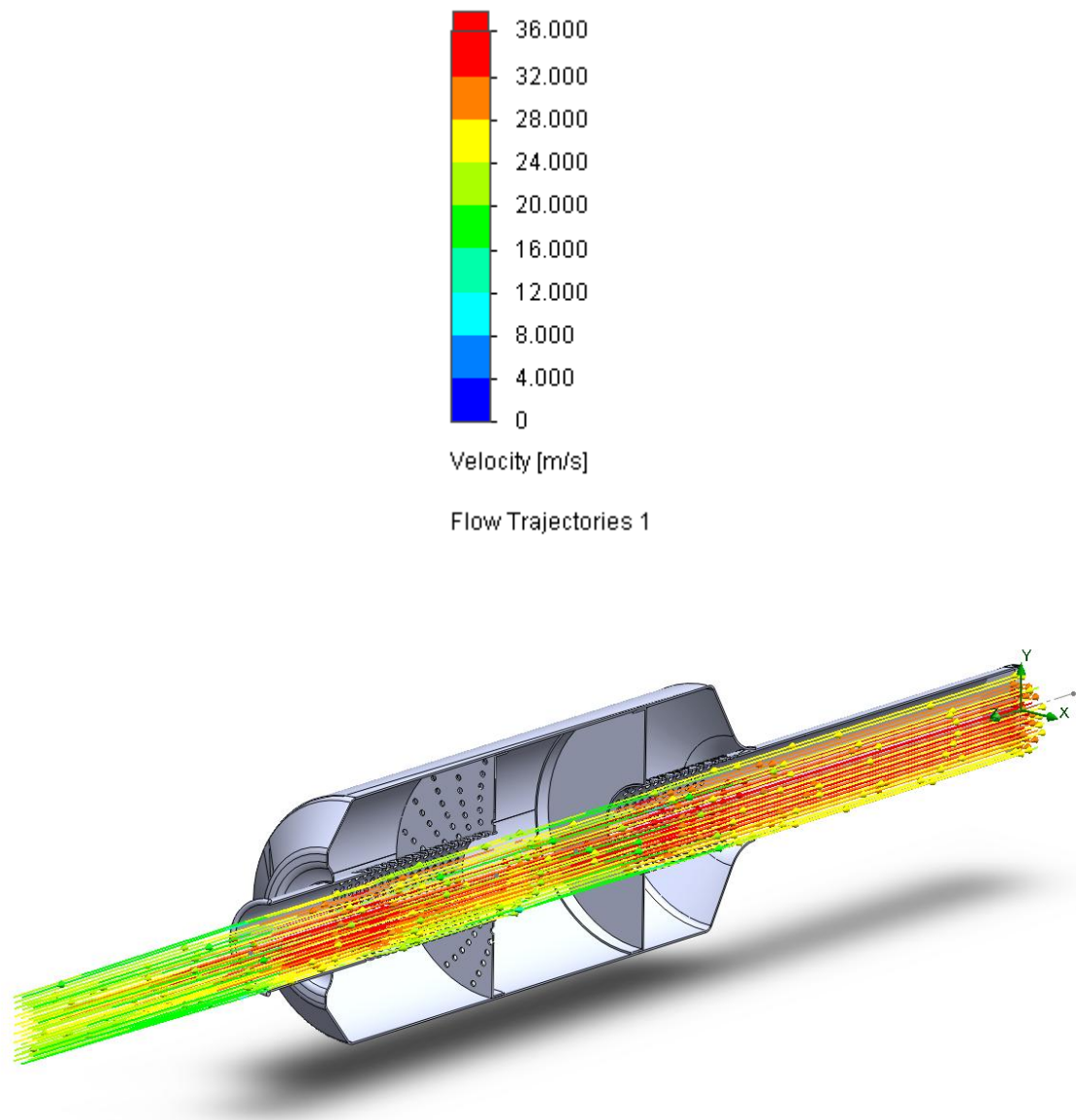


Obr. 58. Nastavení Flow Trajectories



### 11.2.1 Flow Trajectories: Velocity

Posledním sledovaným parametrem v simulaci byla rychlost proudění plynů. Dle zadání dosahovala maximální rychlost plynů hodnoty 36 m/s a nacházela se ve středu trubky, neboť po krajích s v důsledku tření výrazně zmenšovala.



Obr. 59. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Velocity

## 12 VÝSLEDKY PRO 2. TYP VÝFUKU: S UCPÁVKOU

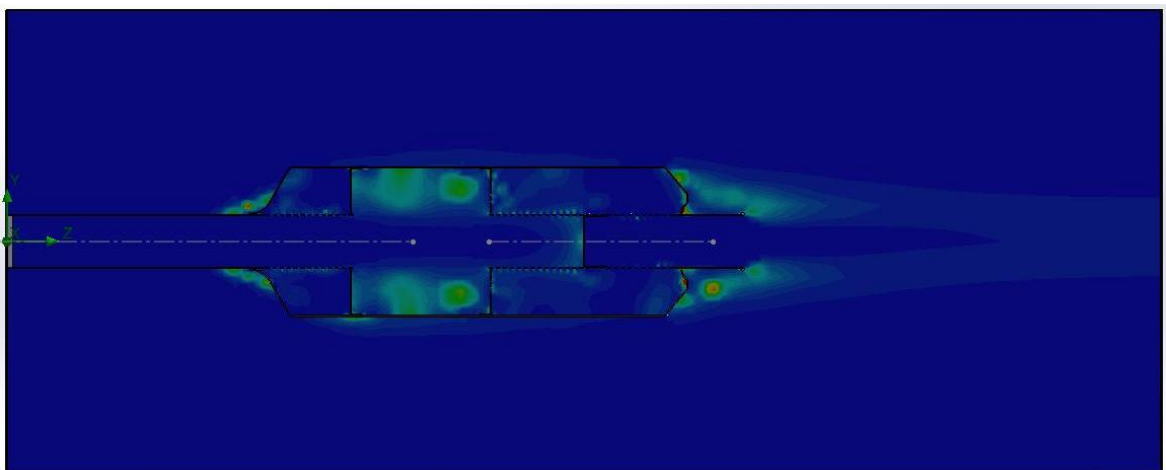
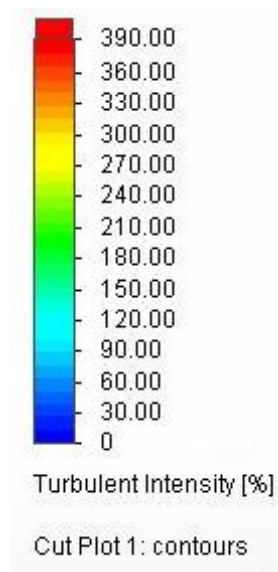
Druhým modelem, který byl podroben testování v simulačním programu Solid-Works Flow Simulation, byl výfuk s ucpávkou, která byla umístěna do výstupní trubky a měla za cíl utlumit přílišný hluk vycházející z prvního modelu výfuku. Výfuk byl současně prodloužen o 40mm. Tato konstriční úprava měla podle závodníků negativní vliv na výkon stroje. To a mnohé další parametry byly podrobeny analýze.

### 12.1 Cut Plots

Nastavení řezů (*Cut Plots*) bylo naprosto identické s předchozím modelem výfuku a je blíže vysvětleno v předchozí kapitole.

### 12.1.1 Cut plot: Turbulent Intensity

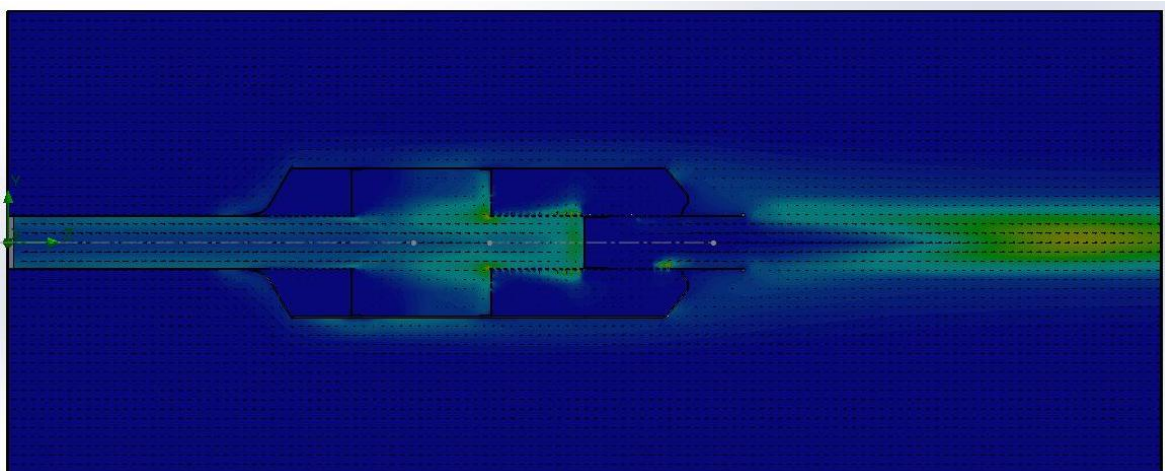
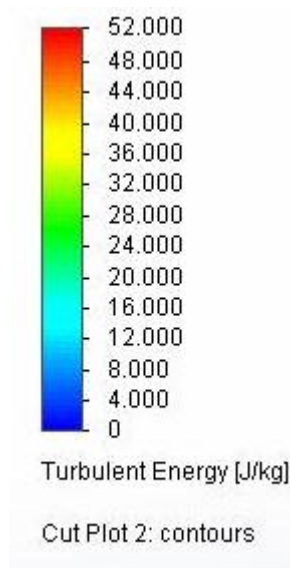
Tento výsledek ukazuje intenzitu turbulencí v tlumiči výfuku a také v prostředí kolem něj při daných parametrech v %. Obrázek vypadá na první pohled téměř shodně s výsledkem u prvního výfuku. Opět zde dochází k velkým turbulencím za výfukem a v komoře mezi přepážkami. Dále už také vznikají menší turbulence v prostoru kolem víčka a v místě napojení trubky na tělo výfuku.



Obr. 60. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Turbulent Intensity

### 12.1.2 Cut plot: Turbulent Energy

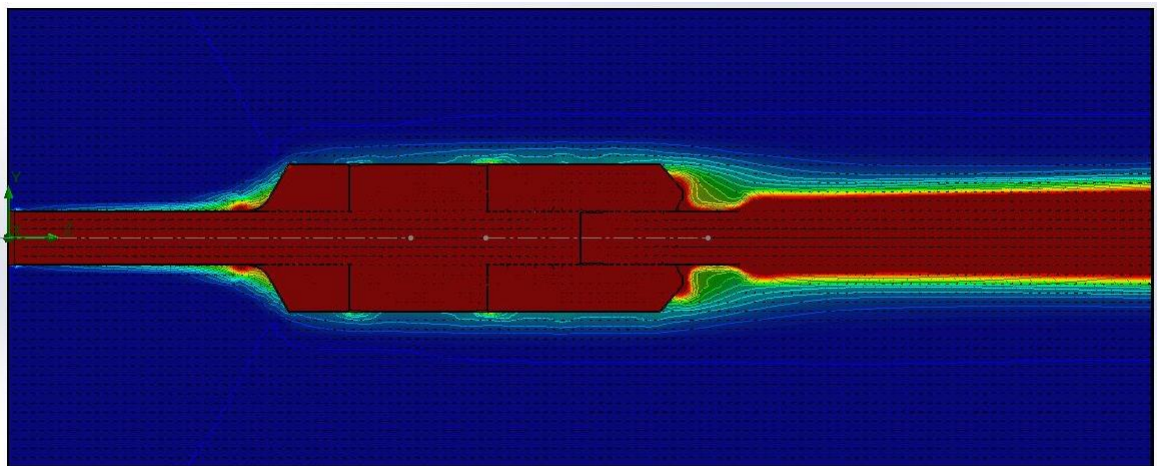
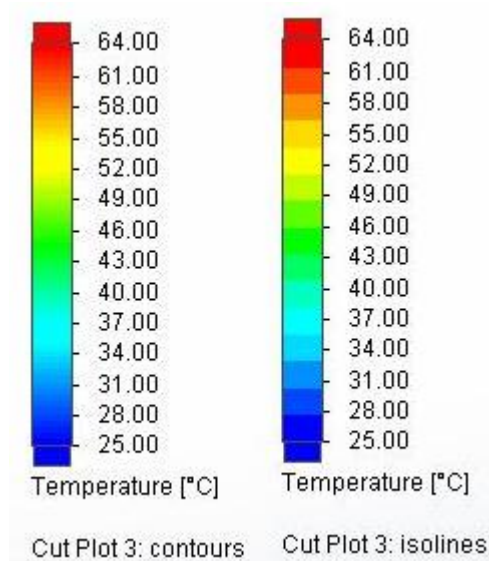
Energie turbulencí ukazuje kolik energie má proudění v daném místě. Z obrázku je zřetelně vidět, že největší energii je za ústím výfuku, kde dosahuje hodnot až 132 J/Kg ale pro lepší názornost bylo rozlišení zmenšeno do maxima 52 J/Kg. V tomto případě narůstala turbulentní energie opět při nárazu plynů do druhé přepážky. Dále je možné pozorovat velkého snížení turbulentní energie ve výstupní trubce v důsledku přidání ucpávky. Energie narůstá opět až po výstupu plynů z výfuku.



Obr. 61. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Turbulent Energy

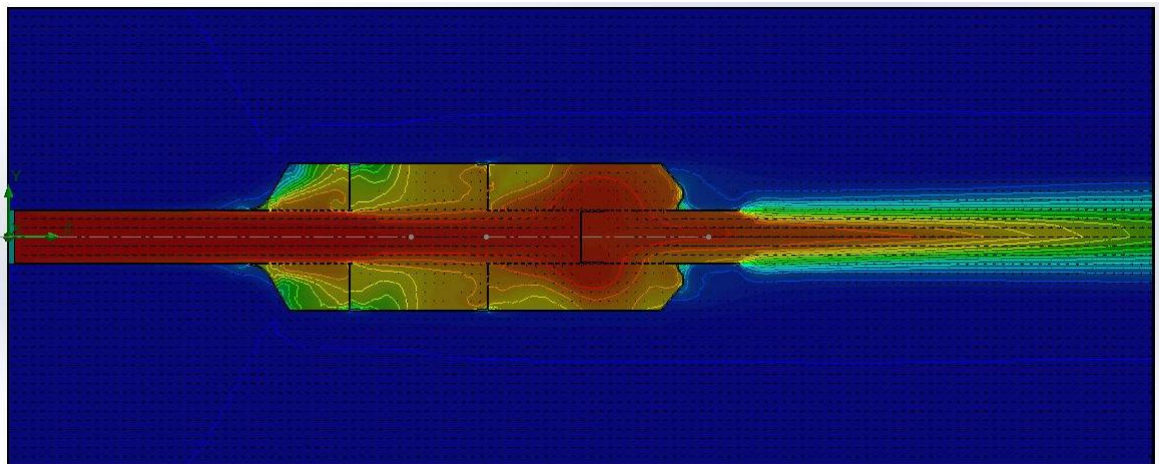
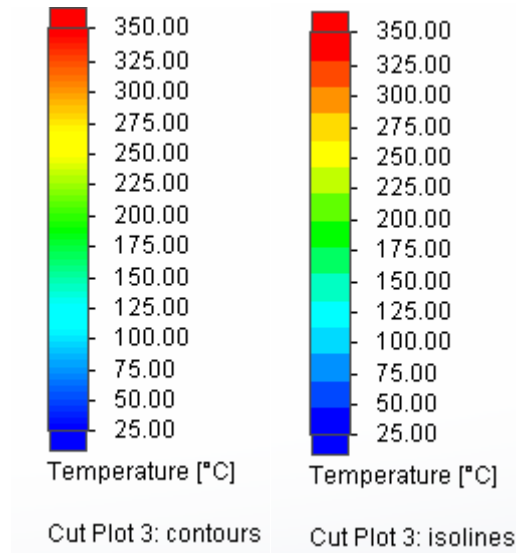
### 12.1.3 Cut plot: Temperature

Z následujícího obrázku je zřetelně patrné, že vzduch se ohřívá velmi podobně jako u předchozího modelu výfuku. Nejvýce u ústí trubky do tlumiče a také u výstupu z tlumiče. Teplota zde opět dosahovala hodnot cca 50-60 °C. Aby bylo jasné vidět ohřívání okolního vzduchu tak muselo být upraveno příslušné měřítko.



Obr. 62. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku

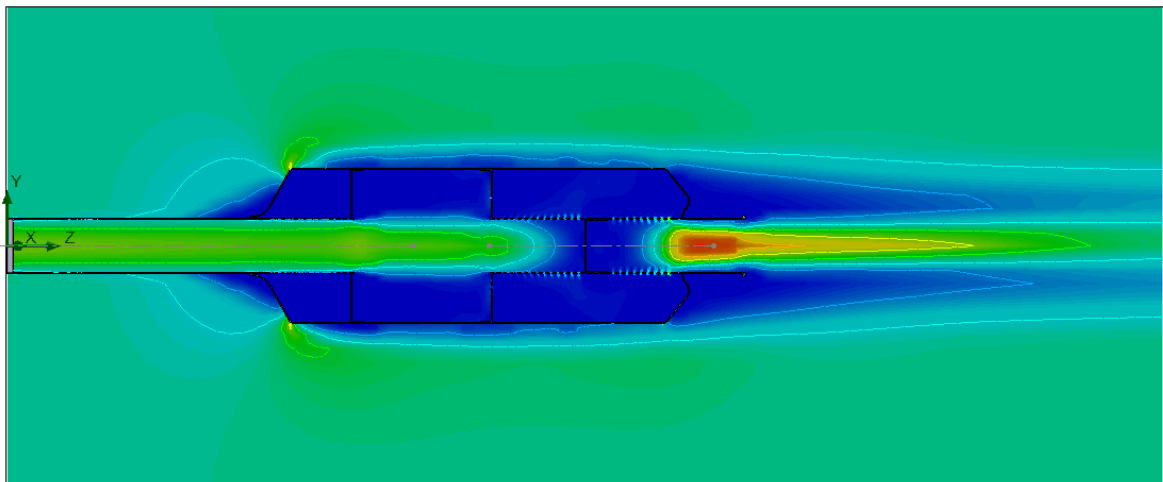
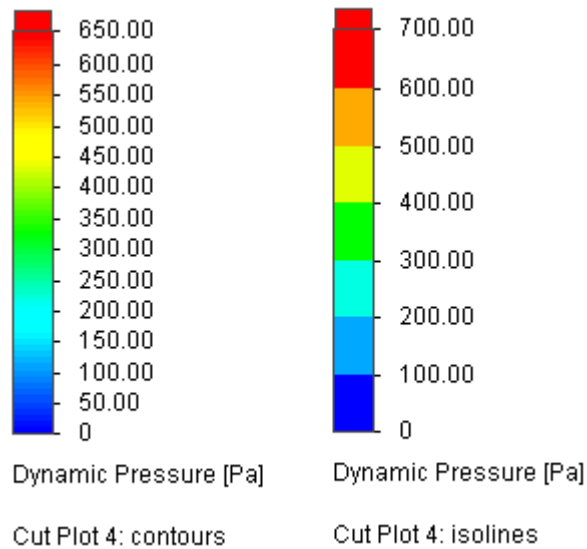
Teplota proudících plynů se snižovala o něco lépe než u předchozího modelu hlavně díky přidané ucpávce, která nutila plyny téct podél stěn, kde mohlo docházet k lepší výměně tepla.



Obr. 63. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů

### 12.1.4 Cut plot: Dynamic Pressure

U tohoto typu výfuku je již na první pohled zřejmé, že hlavní změnou bylo přidání víčka do výfuku a tak je tlakové maximum dislokováno ve výstupní trubce, v místě kde se sbíhají plyny za víčkem. Maximum dosahuje až 900 Pa. Měřítko byla ale stejně jako v předchozím případě upraveno na 650 Pa pro přehlednější zobrazení.

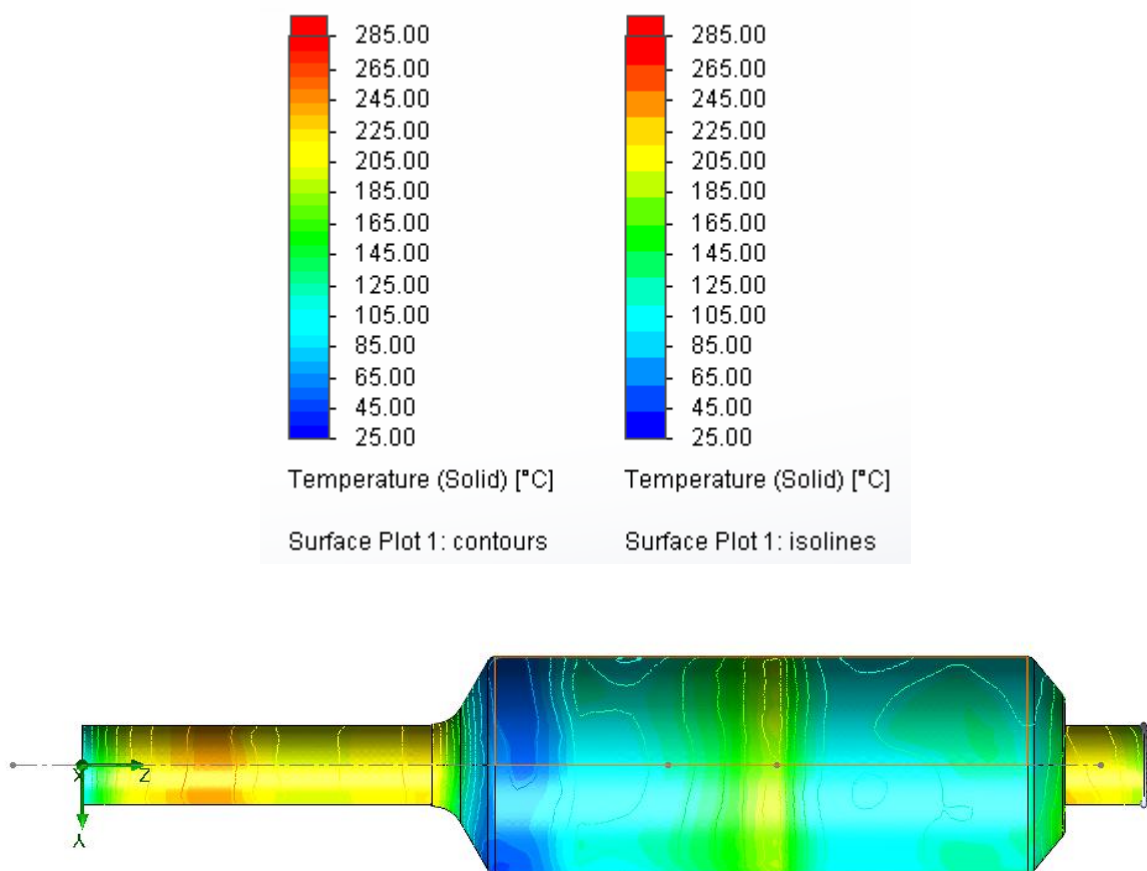


Obr. 64. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Dynamic Pressure

## 12.2 Surface plot

### 12.2.1 Surface plot: Temperature (Solid)

Teplota povrchu výfuku dosahovala podobně jako u předchozího modelu v maximech teploty 335 °C a byla dislokována hlavně v potrubí, kde proudil ohřátý plyn z motoru. Povrch je také více ohříván v koncové části výfuku díky ucpávce, které tlačí horké plyny na stěny výfuku.



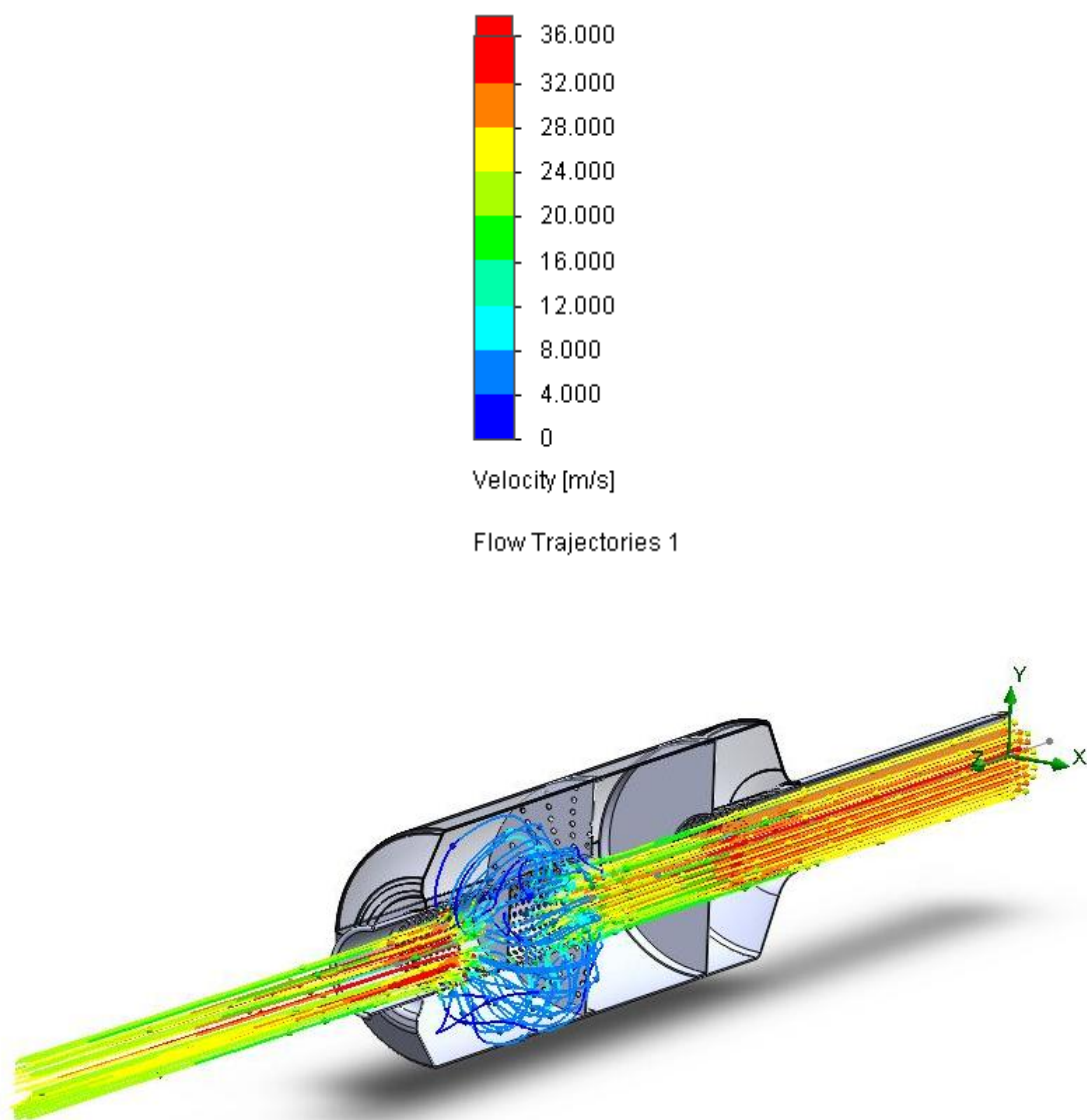
Obr. 65. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature (Solid)



## 12.3 Flow Trajectories

### 12.3.1 Flow Trajectories: Velocity

V tomto případě již dochází k velkým změnám proudění. Je to způsobeno jako v předešlých případech měření přidanou ucpávkou. Dle zadání dosahovala maximální rychlost plynů hodnoty 56 m/s a nacházela se ve středu trubky, neboť po krajích se v důsledku tření výrazně zmenšovala. Dalšího zpomalení toku došlo podle předpokladu kolem ucpávky, kde musel plyn tuto překážku obtékat.



Obr. 66. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Velocity

## **13 VÝSLEDKY PRO 3. TYP VÝFUKU: S UCPÁVKOU, DÍRY 5 MM**

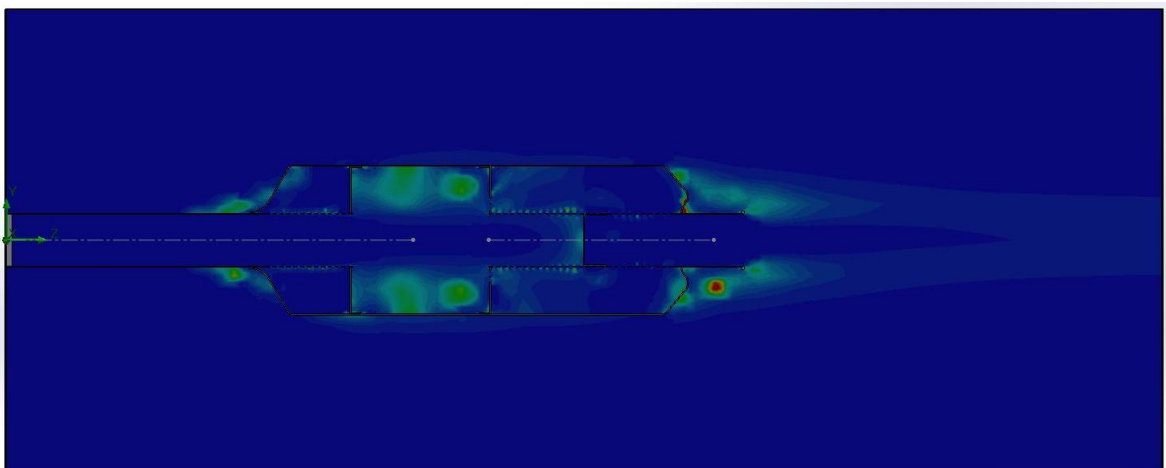
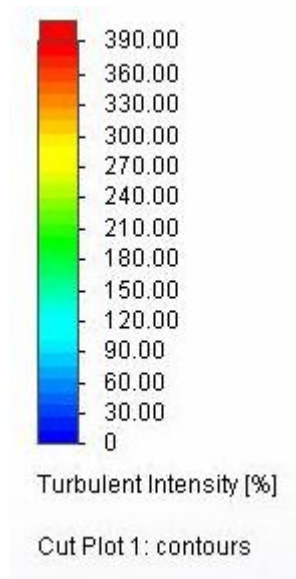
Tento výfuk byl v podstatě kopií druhého výfuku s ucpávkou jen s tím rozdílem, že první 2 řady děr na druhé přepážce byly převrtány z 3 mm na 5 mm. Byly sledován vliv této změny na výsledky analýzy, neboť podle zkušeností jezdců měla příznivý vliv na výkon stroje.

### **13.1 Cut Plots**

V nastavení řezů nedošlo k žádným změnám oproti předchozímu případu.

### 13.1.1 Cut plot: Turbulent Intensity

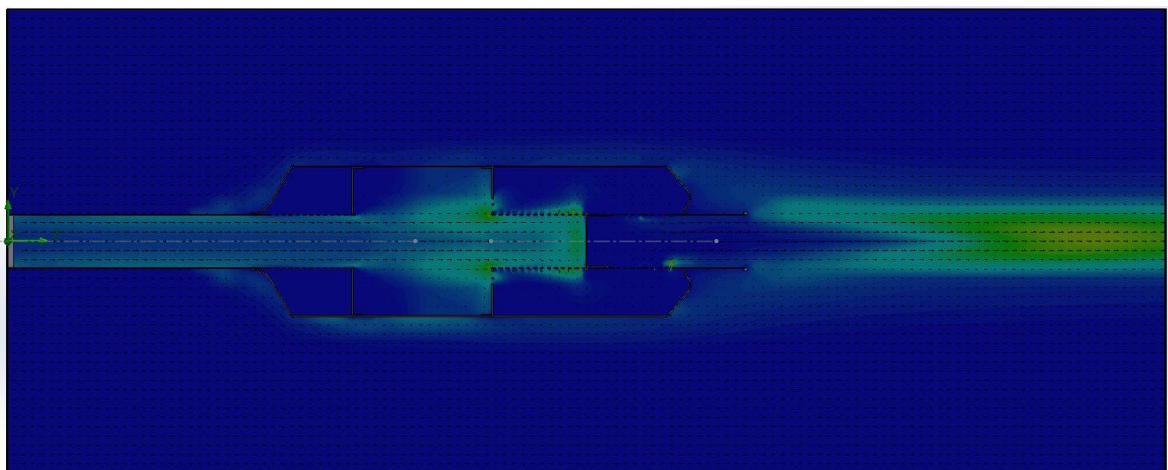
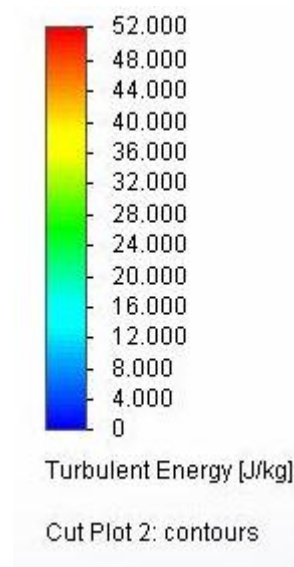
Tento výsledek ukazuje intenzitu turbulencí v tlumiči výfuku a také v prostředí kolem něj při daných parametrech v %. Obrázek je téměř shodný s předchozím případem, neboť navrtné díry na zanedbatelný vliv na vzniklé turbulence. Opět zde dochází k velkým turbulencím za výfukem a v komoře mezi přepážkami. Dále už také vznikají menší turbulence v prostoru kolem víčka a v místě napojení trubky na tělo výfuku.



Obr. 67. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Turbulent Intensity

### 13.1.2 Cut plot: Turbulent Energy

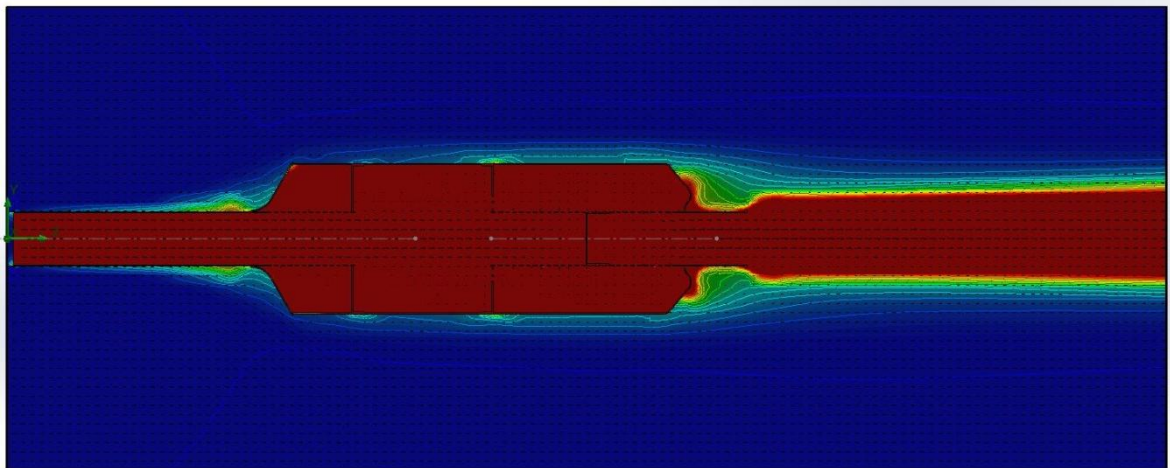
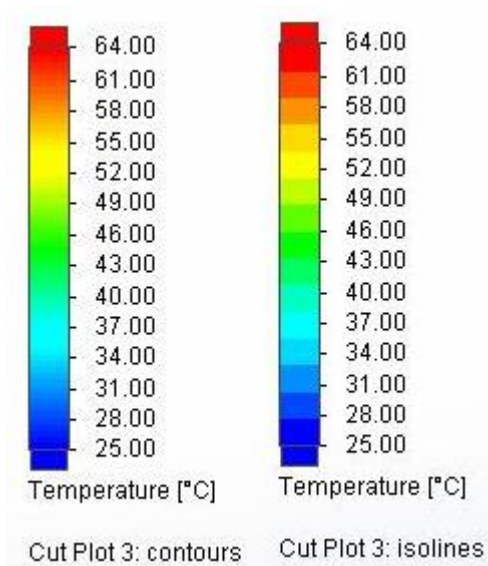
V tomto případě dosahuje turbulentní energie maximální hodnoty 115 J/Kg co znamená pokles přibližně o 10% oproti předchozímu modelu. Je také na obrázku dobře vidět jak se zvýšila turbulentní energie v převrtaných dírách. Žádné větší rozdíly nejsou patrné.



Obr. 68. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Turbulent Energy

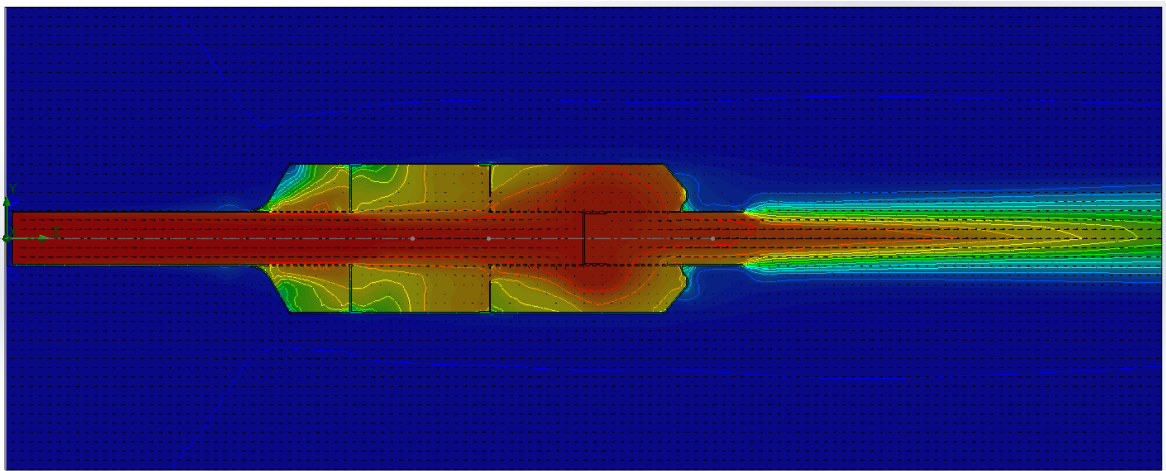
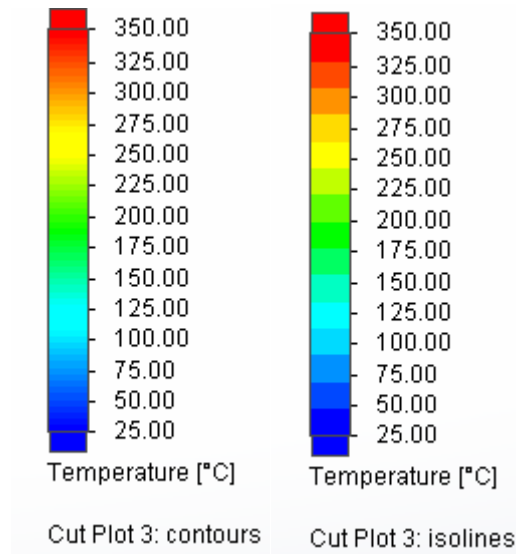
### 13.1.3 Cut plot: Temperature

U tohoto modelu nedošlo k žádné významější změně co se teploty okolí výfuku týče.



Obr. 69. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku

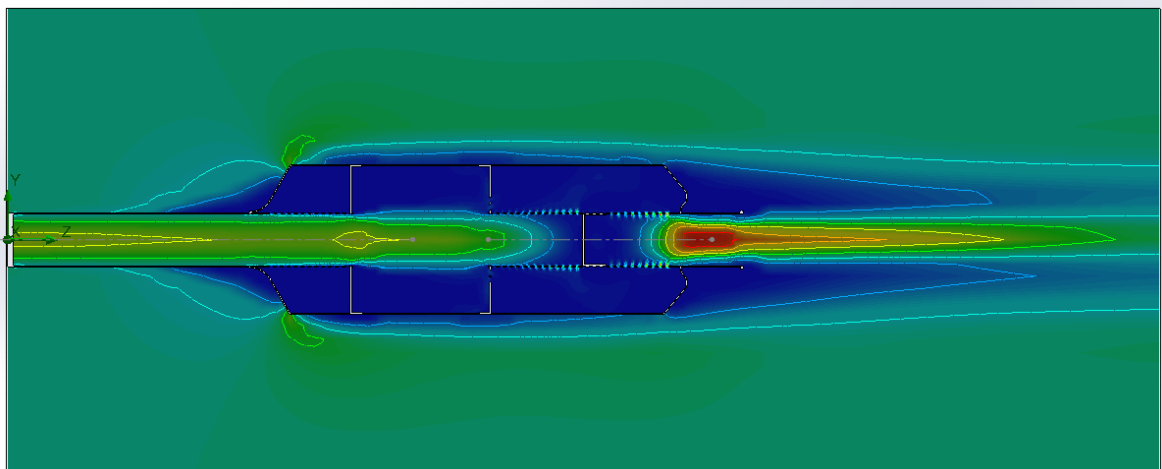
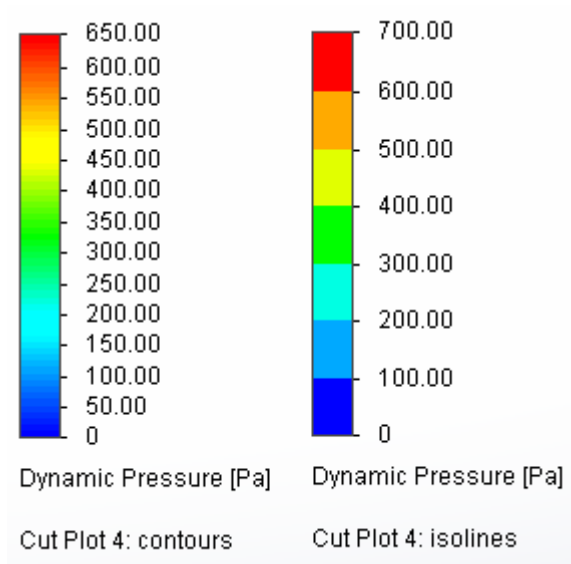
V tomto teplotním poli je patrná změna oproti předchozímu modelu v oblasti převrtaných děr, kde je možno vidět, že plyn již začal proudit těmito zvětšenými dírami.



Obr. 70. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů

### 13.1.4 Cut plot: Dynamic Pressure

V tomto případě upraveného druhého typu výfuku bylo maximum dynamického tlaku rovno hodnotě přibližně 960 Pa. Maximální tlak se opět nacházel na výstupu z výfuku.

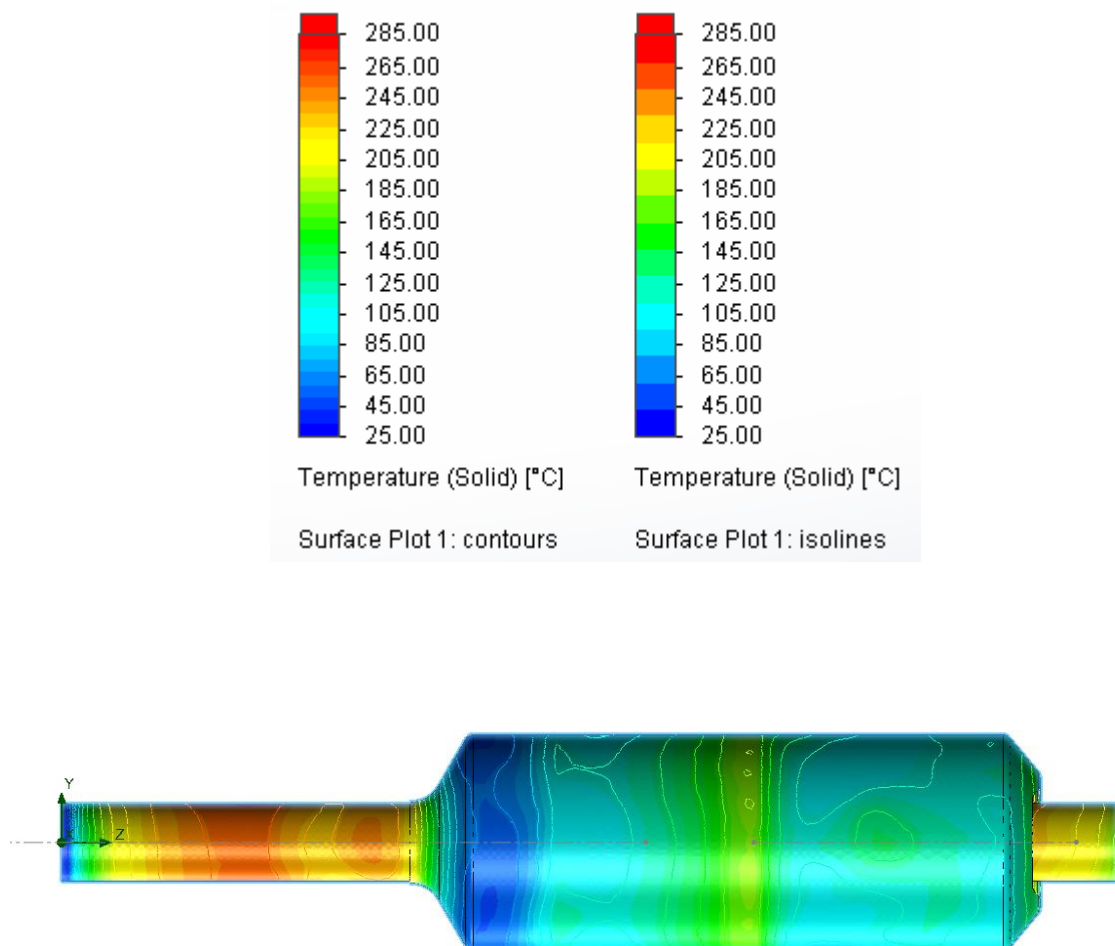


Obr. 71. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Dynamic Pressure

## 13.2 Surface plot

### 13.2.1 Surface plot: Temperature (Solid)

V tomto případě jsou výsledky téměř totožné s předchozím případem výfuku s ucpávkou, neboť převrtání děr má zanedbatelný vliv na teplotu povrchu výfuku.



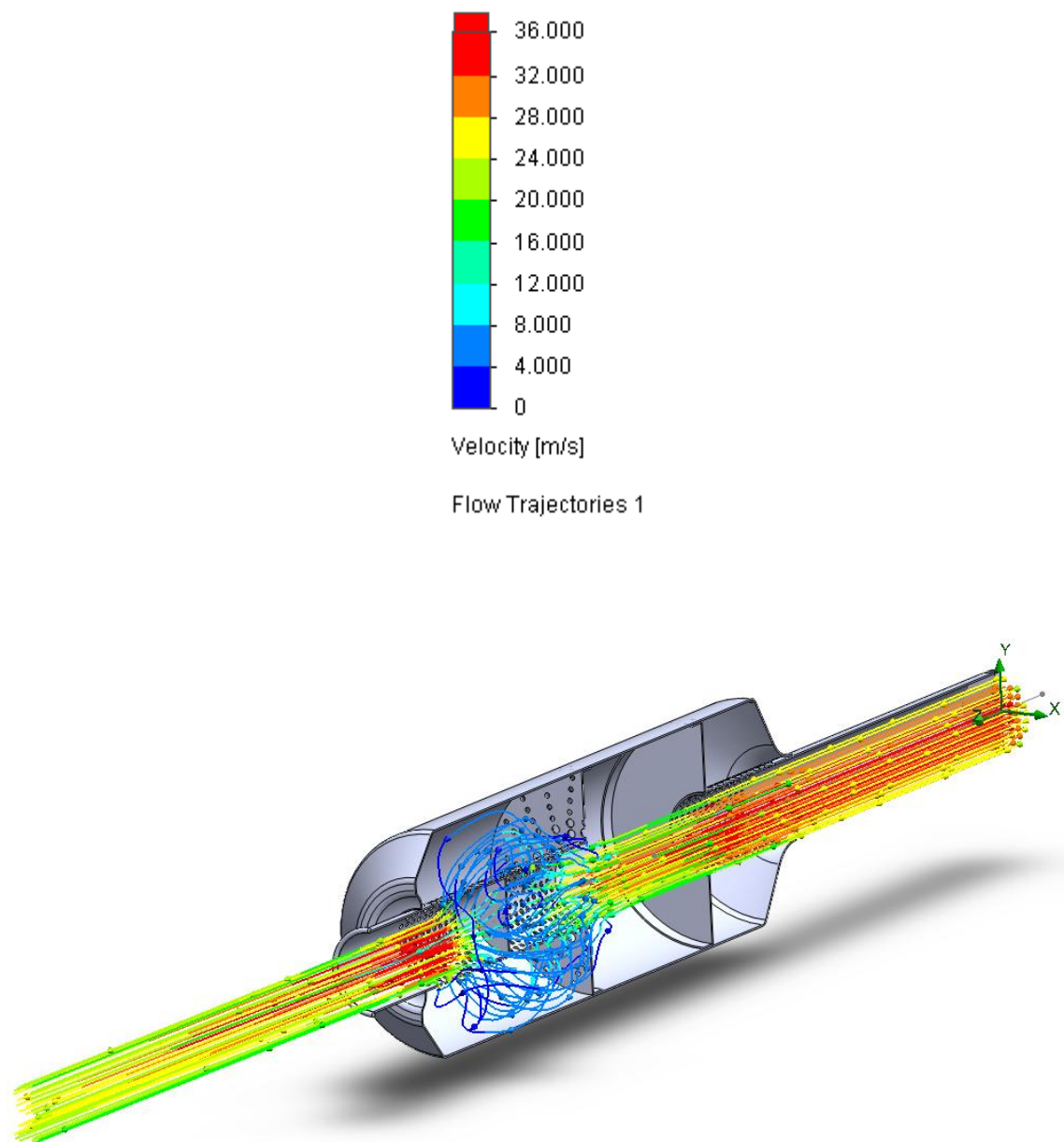
Obr. 72. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature (Solid)



## 13.3 Flow Trajectories

### 13.3.1 Cut plot: Velocity

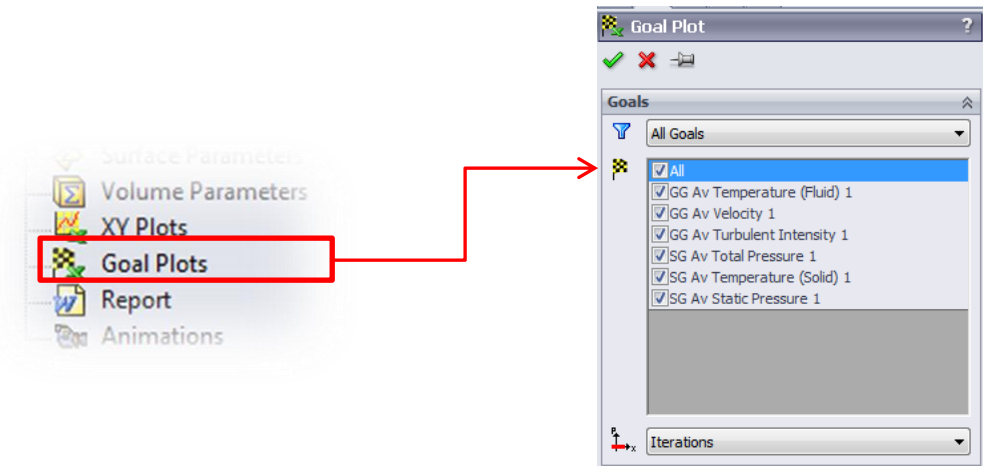
Posledním sledovaným parametrem v simulaci byla rychlost proudění plynů. Rychlost dosahovala maxima hlavně ve středu trubice, kde nedochází ke tření se stěnou trubky. Hodnota maximální rychlosti byla cca 55m/s.



Obr. 73. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Velocity

## 14 POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH HODNOT POMOCÍ GOALS PLOT

Jako další možnost dopadu konstrukce výfuku na měřené parametry bylo získání tabulkových hodnot. Tyto data se jednoduše vygenerovaly pomocí kliku na funkci *Goal plot* v záložce *Flow Simulation*. Zde se vybrala všechna dostupná data.



Obr. 74. Definice Goal plot

V následující tabulce je možné vidět hodnoty všech počítaných parametrů pro první výfuk. Jsou zde uvedeny průměrné hodnoty, maxima a minima. Tyto hodnoty sloužili jako výchozí pro porovnání s ostatními modely.

Tab. 8: Hodnoty Goal plot pro výfuk bez ucpávky

Goal Name	Jednotka	Hodnota	Aritmetický průměr	Min	Max
Temperature (Fluid)	[°C]	34,53	34,55	34,53	34,56
Velocity	[m/s]	19,47	19,47	19,47	19,47
Turbulent Intensity	[%]	2,24	2,26	2,23	2,28
Static Pressure	[Pa]	101519,24	101518,98	101518,75	101519,24
Total Pressure	[Pa]	101820,76	101820,51	101820,28	101820,76
Temperature (Solid)	[°C]	126,60	126,75	125,94	128,06

U druhého typu výfuku se hodnoty teploty a rychlosti lišili jen zanedbatelně od prvního typu. U intenzity turbulencí došlo k nárůstu z 2,26% na 3,93% což bylo způsobeno převážně umístěním ucpávky do výfuku. Dynamický i celkový tlak se mírně zvýšili o přibližně 500 Pa. Nakonec průměrná teplota pláště výfuku se podle předpokladu zvýšila o 7°C na 133°C. Tento nárůst teploty byl způsoben tokem ohřátých plynů podél pláště díky ucpávce.

Tab. 9: Hodnoty Goal plot pro výfuk s ucpávkou

Goal Name	Jednotka	Hodnota	Aritmetický průměr	Min	Max
Temperature (Fluid)	[°C]	34,55	34,52	34,45	34,55
Velocity	[m/s]	19,47	19,47	19,47	19,47
Turbulent Intensity	[%]	3,92	3,93	3,92	3,97
Static Pressure	[Pa]	102176,11	102173,72	102168,97	102176,11
Total Pressure	[Pa]	102464,01	102461,61	102456,84	102464,01
Temperature (Solid)	[°C]	132,93	133,72	132,24	134,93

U třetího typu výfuku se průměrné teploty proudících plynů a jejich rychlosti podle předpokladu téměř nezměnili oproti druhému typu výfuku. Naproti tomu se intenzita turbulencí snížila z 3,92 % na 2,26% což je pokles asi o třetinu. Jedním z důvodů bylo právě zvýšení průměru děr u druhé přepážky, což mělo za následek plynulejší proudění těmito dírami. Tlak se oproti předpokladu mírně zvýšil a to asi o 130 Pa. Pravděpodobný důvod tohoto relativně překvapivého výsledku mohla být nedostatečná přesnost simulace, která byla nastavena na stupeň 4 z 8 stupňové škály. Průměrná teplota pláště se zvýšila o cca 2°C z 132,93 °C na 134,67 °C.

Tab. 10: Hodnoty Goal plot pro výfuk s ucpávkou (převrtaný)

Goal Name	Jednotka	Hodnota	Aritmetický průměr	Min	Max
Temperature (Fluid)	[°C]	34,60	34,60	34,58	34,61
Velocity	[m/s]	19,49	19,49	19,49	19,49
Turbulent Intensity	[%]	2,26	2,27	2,26	2,29
Static Pressure	[Pa]	102190,78	102191,09	102190,44	102191,61
Total Pressure	[Pa]	102494,30	102494,61	102493,96	102495,13
Temperature (Solid)	[°C]	134,67	134,94	133,67	136,78

## ZÁVĚR

Praktická část práce měla za cíl analyzovat proudění ve třech typech výfuku a pokusit se ohodnotit vliv konstrukce na různé termodynamické veličiny. Na začátku bylo nutné vymodelovat v programu Solid Works 2012 co nejpřesnější modely třech typů výfuku. Dalším nezbytným krokem bylo správné nastavení parametrů simulace, které také bylo v práci co nejpodrobněji popsáno. Vzhledem k dostupnému vybavení byla zvolena přesnost výpočtů na 4 z celkových 8. Po velmi dlouhém výpočtu, kdy byl používaný počítač velmi zatížen výpočtem, byla využita symetrie výfuku. Tímto krokem se počítaná síť modelu zmenšila o polovinu, což velmi urychlilo výpočet. Z nepřeberného množství výsledků, které by bylo možné nějak ohodnotit bylo vybráno několik zajímavých jako například teplota plynů ve výfuku, ohřívání vzduchu kolem výfuku a vnitřní tlak. Jako výchozí model byl vybrán průchozí výfuk, který byl využíván dříve v praxi při závodech ploché dráhy, ale byl později zakázán kvůli zvýšené hladině hluku. Byl průchozí konstrukce, což mělo sice příznivý vliv na výkon stroje, ale přepážky uvnitř výfuku zůstaly téměř bez využití. To vedlo k právě více zmíněné vysoké hladině hluku. Druhý typ konstrukce byl té první značně podobný. Byl pouze prodloužen o 40mm přičemž vzdálenost mezi přepážkami byla zachována. Hlavním rozdílem bylo přidání ucpávky, která měla za cíl utlumení hluku výfuku. Její přidání mělo ale podle závodníků ploché dráhy za následek zhoršení výkonu stroje a tak přikročili k úpravě. Ta spočívala v převrtání prvních dvou řad děr na druhé přepážce. Tato úprava měla podle zkoušek v praxi vliv na zlepšení výkonu stroje. Podle výsledků analýz došlo opravdu přidáním ucpávky ke zvýšení tlaku ve výfuku. Z hlediska chlazení výfukových plynů nedošlo k výraznější změně. Překvapením bylo, že oproti původnímu předpokladu nedošlo ke snížení tlaku ani po navrtání děr. Toto mohlo být způsobeno pravděpodobně nedostatečnou přesností výpočtu. Tlakové změny byla i tak maximálně v řádu stovek Pa. Pro lepší řešení tlumiče výfuku by bylo vhodné zkonstruovat další různé varianty vnitřního uspořádání. Dalším krokem ke zlepšení výstupů z analýz by bylo taktéž použití výkonnějšího hardwarového vybavení, které by dovolilo zvýšit přesnost výpočtu na vyšší hodnoty.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Vzduchovody, Větrání [online].c2006, [cit.2013-18-01]. **Dostupné z WWW:**  
[http://users.fs.cvut.cz/~schwajan/schwarzer\\_soubory/Soubory/Vzduchovody/](http://users.fs.cvut.cz/~schwajan/schwarzer_soubory/Soubory/Vzduchovody/)
- [2] Fyzika [online].c2012, [cit.2012-15-11]. **Dostupné z WWW:**  
[fyzika.webovka.eu\\_zazehovy-motor.html](http://fyzika.webovka.eu_zazehovy-motor.html)
- [3] Auto znalosti [online].c2012, [cit.2012-15-11]. **Dostupné z WWW:**  
<http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/5-dvoudoby-spalovaci-motor.html>
- [4] Auto znalosti [online].c2012, [cit.2012-15-11]. **Dostupné z WWW:**  
<http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/1-ctyrdoby-spalovaci-motor.html>
- [5] Motobanda [online].c2005, [cit.2012-12-12]. **Dostupné z WWW:**  
<http://motobanda.ic.cz/view.php?cislocclanku=2005071201>
- [6] Hokcar [online].c2010, [cit.2012-15-11]. **Dostupné z WWW:**  
<http://www.hokcar.cz/sortiment/vyfukove-systemy/>
- [7] Mjauto [online].c2012, [cit.2012-15-11]. **Dostupné z WWW:**  
<http://www.mjauto.cz/vyfuky.htm>
- [8] KOCÁB J., ADAMEC J.: *Letadlové motory*. Knihkupectví a nakladatelství odborné literatury KANT cz, s.r.o. Praha, 2001, s. 25, ISBN 80-902914-0-6
- [9] HALLIDAY D., RESNICK D., WALKER J.: *Fyzika*. VUT v Brně – nakladatelství VUTIUM, nakladatelství PROMETHEUS, 2007, s. 558, ISBN 8021418680
- [10] Česká motocyklová federace AČR: *Technické řády*. Federace motocyklového sportu AČR, 110 00 Praha, Opletalova 29, 2012
- [11] Anatomie varhan [online].c2012, [cit.2012-18-12]. **Dostupné z WWW:**  
[http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)
- [12] Solid Works 2011 - Help [online].c2012, [cit.2013-21-01]. **Dostupné z WWW:**  
[http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Conduction\\_Topics/IDH\\_Analysis\\_Background\\_Conduction.html?id=8623acaed4a34c37a189040b269fcb8c#Pg0](http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Conduction_Topics/IDH_Analysis_Background_Conduction.html?id=8623acaed4a34c37a189040b269fcb8c#Pg0)
- [12] SolidVision [online].c2012, [cit.2013-21-02]. **Dostupné z WWW:**  
<http://www.solidvision.cz/solidworks-flow-simulation/>

[14] Flow Simulation 2010 Technical reference, součást SolidWorks 2010

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

v	[m/s]	Rychlost proudění média
P	[W]	Výkon
d	[m]	Průměr
h	[m]	Výška
U	[V]	Napětí
S	[m <sup>2</sup> ]	Objem
w	[m/s]	Rychlost větru
T	[K]	Teplota
n	[-]	Exponent závisující na drsnosti povrchu (interval od 0 – 1)
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu $\rho = 1.28$
n	[ot/s]	Otáčky za sekundu
$\lambda$	[-]	Součinitel tření
P	[atm]	Tlak 1 atmosféra = tlak při hladině moře
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
t	[°C]	Teplota (0°C = 273,15K)
k	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti
L	[m]	Délka
$\rho U^2/2$	[-]	Vstupní dynamický proud
F	[N]	Síla
H	[W]	Tepelný tok
$\alpha$	[°]	Úhel natočení
Q	[J]	Teplo
h	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel konvence převodu tepla
$\sigma_0$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> ]	Stefanova Boltzmannova konst. má hodnotu $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
$\rho$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota

---

V	[m <sup>3</sup> ]	Objem
M	[Kg/s]	Hmotnostní průtok
E	[W]	Energie
V	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematická viskozita
ξ	[-]	Součinitel tlakové ztráty
ε	[-]	Charakteristická drsnost stěn
ε/d	[-]	Poměrná drsnost
R	[J/Kg.K]	Plynová konstanta
E	[W.m <sup>-2</sup> ]	Intenzita vyzařování
HÚ	[-]	Horní úvrat'
DÚ	[-]	Dolní úvrat'
LPG	[-]	Liquefied Petroleum Gas - zkapalněný ropný plyn
CNG	[-]	Compressed Natural Gas - stlačený zemní plyn
CFD	[-]	Computation fluid dynamics
f	[Hz]	Frekvence
C <sub>o</sub>	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]	Emisní konstanta černého tělesa
E <sub>o</sub>	[W/m <sup>2</sup> ]	Zářivost černého tělesa



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Přenos tepla z nádrže o vyšší teplotě k lázni o nižší teplotě</i> .....	12
<i>Obr. 2. Princip sdílení tepla prouděním</i> .....	14
<i>Obr. 3. Princip sdílení tepla vlnou konvencí</i> .....	15
<i>Obr. 4. Princip sdílení tepla nucenou konvencí</i> .....	15
<i>Obr. 5. Princip proudění kapaliny nad plochou deskou</i> .....	16
<i>Obr. 6. Princip přechodu z teploty povrchu na teplotu okolí</i> .....	16
<i>Obr. 7. Rozsah vlnových délek tepelného záření</i> .....	17
<i>Obr. 8. Příklad černého tělesa</i> .....	18
<i>Obr. 9. Schéma působení záření na povrch tělesa</i> .....	19
<i>Obr. 10. Transformace energie ve spalovacím motoru</i> .....	21
<i>Obr. 11. Schéma tepelného motoru</i> .....	22
<i>Obr. 12. p-V diagram cyklu Carnotova motoru</i> .....	23
<i>Obr. 13. T-S diagram cyklu Carnotova motoru</i> .....	24
<i>Obr. 14. Náčrt principu výpočtu Bernoulliho rovnice</i> .....	26
<i>Obr. 15. Závislost součinitele tření <math>\lambda</math> na <math>Re</math> a poměrné drsnosti <math>\epsilon/d</math></i> .....	27
<i>Obr. 16. Tlakové poměry v potrubní síti</i> .....	29
<i>Obr. 17. Princip dvoudobého spalovacího motoru [2]</i> .....	32
<i>Obr. 18. Princip čtyřdobého spalovacího motoru [2]</i> .....	33
<i>Obr. 19. Průběh tlaku ve válci pro jednotlivé zdvihy pístu</i> .....	33
<i>Obr. 20. Schéma výfukového systému automobilu [7]</i> .....	35
<i>Obr. 21. Schéma rezonančního tlumiče</i> .....	38
<i>Obr. 22. Schéma interferenčního tlumiče</i> .....	38
<i>Obr. 23. Schéma tlumiče s rozvětvenými rezonátory</i> .....	39
<i>Obr. 24. Schéma absorpčního tlumiče</i> .....	39
<i>Obr. 25. Schéma umístění výfukového potrubí na motocyklu [10]</i> .....	43
<i>Obr. 26. Schéma výfukového systému včetně rozměru mezery mezi tlumičem a pneu. [10]</i> .....	44
<i>Obr. 27. Sluchové pole</i> .....	46
<i>Obr. 28. Schéma umístění hlukoměru při kontrole [10]</i> .....	48
<i>Obr. 29. Proudění kolem válce při nízkých hodnotách <math>Re</math> (<math>4 &lt; Re &lt; 60</math>) [14]</i> .....	52
<i>Obr. 30. Proudění kolem válce při vyšších hodnotách <math>Re</math> (<math>60 \dots 100 &lt; Re</math>) [14]</i> .....	52

Obr. 31. Porovnání přesnosti výpočtu v programu Flow Simulation s fotografií pořízené v aerodynamickém tunelu. [14] .....	53
Obr. 32. Závislost součinitele odporu $C_D$ a Reynoldsova čísla $Re$ [14] .....	54
Obr. 33. Porovnání průtoku vzduch pomocí kouře a pomocí Flow Simulation [14] .....	55
Obr. 34. Model průchozího výfuku .....	56
Obr. 35. Model výfuku s ucpávkou .....	57
Obr. 36. Model výfuku s ucpávkou a převrtanými dírami .....	58
Obr. 37. Pojmenování projektu .....	59
Obr. 38. Definice jednotek .....	60
Obr. 39. Definice typu analýzy .....	61
Obr. 40. Definice proudícího média .....	62
Obr. 41. Definice materiálu tlumiče výfuku .....	62
Obr. 42. Definice počátečních podmínek .....	63
Obr. 43. Definice sítě .....	64
Obr. 44. Definice oblasti výpočtu .....	65
Obr. 45. Definice víčka .....	66
Obr. 46. Definice vnitřního proudění ve výfuku .....	67
Obr. 47. Definice Global Goals .....	68
Obr. 48. Definice Surface Goals: Static Pressure .....	69
Obr. 49. Definice Surface Goals: Total Pressure .....	69
Obr. 50. Definice Surface Goals: Temperature (Solid) .....	70
Obr. 51. Cut Plots: Nastavení zobrazení .....	72
Obr. 52. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Turbulent Intensity .....	73
Obr. 53. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Turbulent Energy .....	74
Obr. 54. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku .....	75
Obr. 55. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů .....	76
Obr. 56. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Dynamic Pressure .....	77
Obr. 57. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Temperature (Solid) .....	78
Obr. 58. Nastavení Flow Trajectories .....	79
Obr. 59. Výfuk bez ucpávky - Cut Plot: Velocity .....	80
Obr. 60. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Turbulent Intensity .....	82
Obr. 61. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Turbulent Energy .....	83
Obr. 62. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku .....	84
Obr. 63. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů .....	85

<i>Obr. 64. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Dynamic Pressure</i> .....	86
<i>Obr. 65. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Temperature (Solid)</i> .....	87
<i>Obr. 66. Výfuk s ucpávkou - Cut Plot: Velocity</i> .....	88
<i>Obr. 67. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Turbulent Intensity</i> .....	90
<i>Obr. 68. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Turbulent Energy</i> .....	91
<i>Obr. 69. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature – ohřev okolí výfuku</i> .....	92
<i>Obr. 70. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature – chlazení výfukových plynů</i> .....	93
<i>Obr. 71. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Dynamic Pressure</i> .....	94
<i>Obr. 72. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Temperature (Solid)</i> .....	95
<i>Obr. 73. Výfuk s ucpávkou (převrtaný) - Cut Plot: Velocity</i> .....	96
<i>Obr. 74. Definice Goal plot</i> .....	97

**SEZNAM TABULEK**

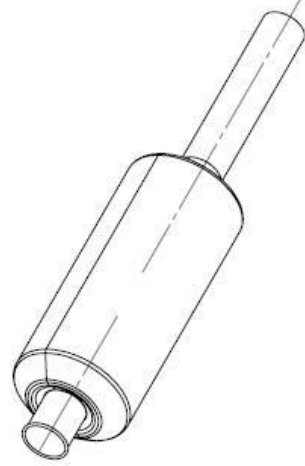
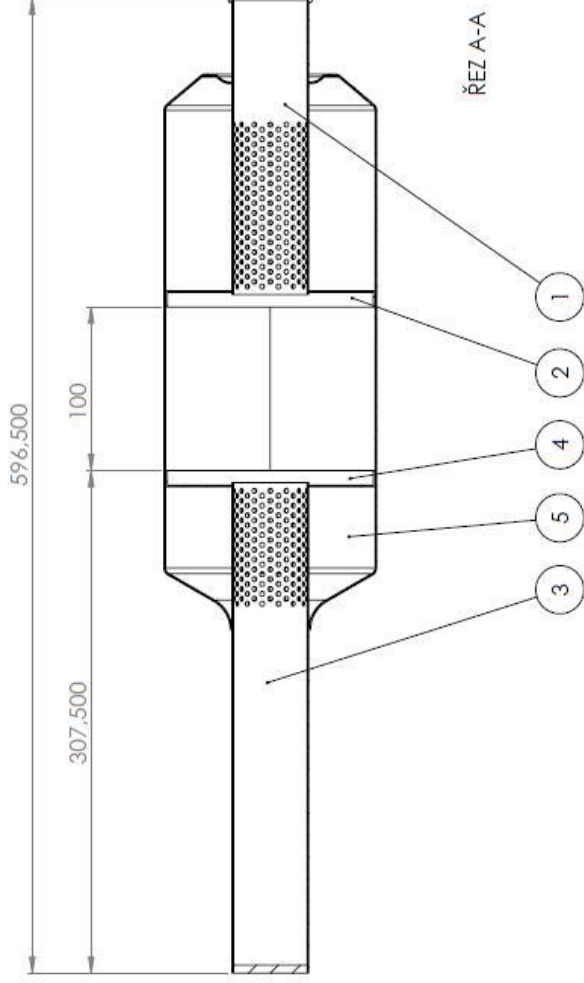
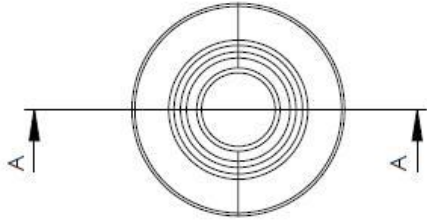
Tab. 1: Závislost tepelné vodivosti (W/m.K) při teplotě (K) pro vybrané materiály [12] .....	13
Tab. 2: Hodnoty součinitele konvekce převodu tepla pro některé materiály .....	17
Tab. 3: Drsnost různých materiálů používaných pro rozvod vzduchu [1].....	28
Tab. 4: Rozdělení motocyklů.....	41
Tab. 5: Hlukový limit pro plochou dráhu [10].....	48
Tab. 6: Tabulka shrnující informace o počtech buněk a celkový čas výpočtu pro přesnost výpočtu 4.....	71
Tab. 7: Tabulka shrnující informace o.....	71
Tab. 8: Hodnoty Goal plot pro výfuk bez ucpávky .....	97
Tab. 9: Hodnoty Goal plot pro výfuk s ucpávkou .....	98
Tab. 10: Hodnoty Goal plot pro výfuk s ucpávkou (převrtaný) .....	98

## SEZNAM PŘÍLOH

**PI:** Technická dokumentace průchozího výfuku (bez ucpávky) a výfuku s ucpávkou

**PII:** K práci je přiloženo DVD, které obsahuje:

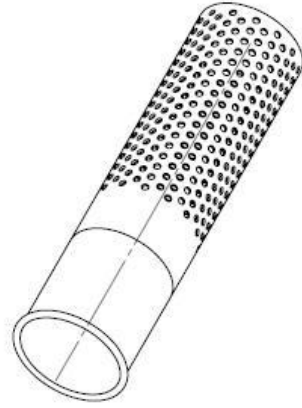
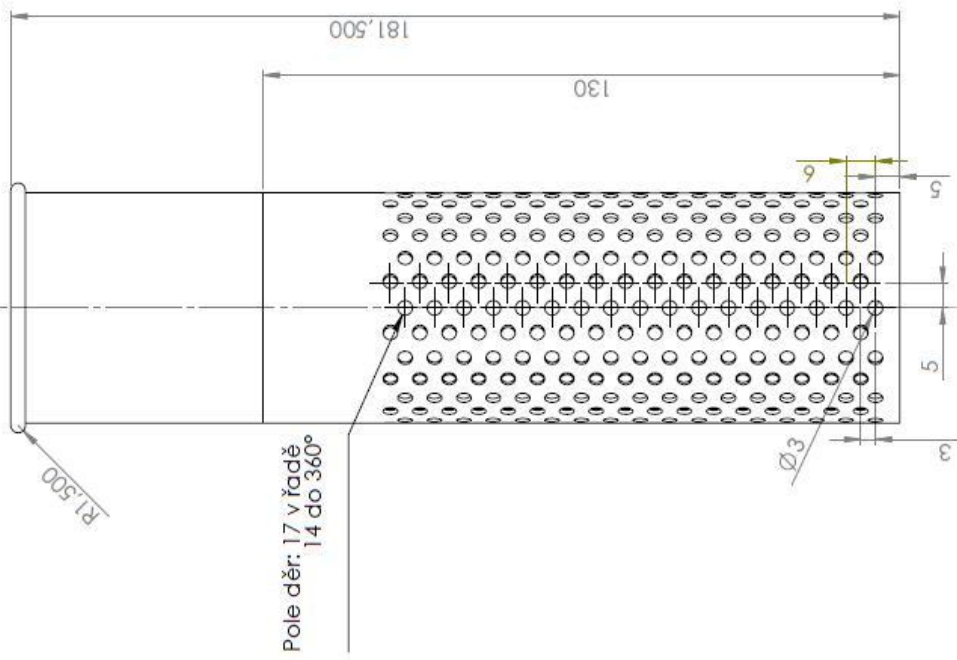
- Tabulky vygenerované pomocí Goal Plot ve Flow Simulation (.xls)
- Videá zobrazující proudění výfukových plynů tlumičem výfuku (.avi)
- Diplomovou práci v přenosném formátu (.pdf)
- Kompletní modely a výsledky pro všechny výfuky (.SLDPRT)



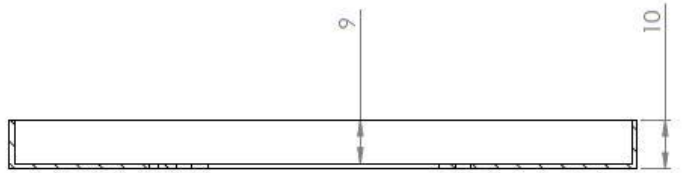
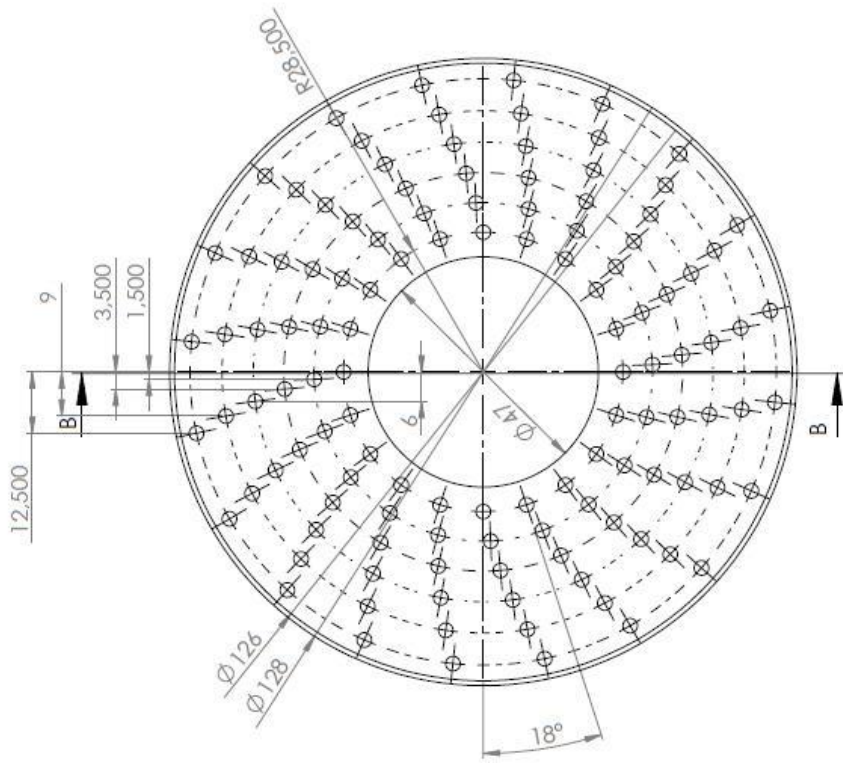
Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	0,025 m3_s/MNOŽ.
1	Trubka_kratka		1
2	Prepazka_s_dírami		1
3	Trubka_dlouha		1
4	Prepazka_plna		1
5	Plast_1		2

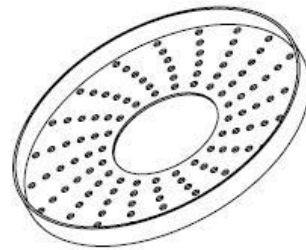
SOUDNĚNÍ/VEDENÍ JINAK:		OBRACOVÁNÍ		CESTOVÁNÍ		NEPRAVĚVAT MĚŘITĚ VÝREZU		ZMĚNA	
DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ	DRÁHOVĚ
TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:	TOLEKANCE:
LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:	LINEARNE:
BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:	BRUOVANĚ:
NAVRHL:	IMENNO	POPS:	DATUM:	NAZEV:					
REKONSTRUČNÍ:				Výfuk bez ucpávky - sestava					
SCHWALL:				C. VÝREZU					
VÝROBA:				MĚŘITĚ: A3					
Z. JAKOSTI:				MĚŘITĚ: 1:1					
				MĚŘITĚ: 1:1					



FOKID NENÍ UVEDENO JINAK JEDNOTY JSOU V MILIMETRECH ZKROUŽENÍ TOLEŘANCE: LINEÁRNÍ ÚHLOVÁ:		DOPRAČOVÁNÉ		ODSTRANĚNÉ ČISLO ŘÁDKY		NEPRAČOVAT MĚŘITEL VÝŘESU		JMÉNA	
JMÉNO	POPS	DATUM							
NAVŘEL									
PROJEKTOVATEL									
SCHVÁLIL									
VYKRESILA									
Z. JAKOSTI									
				MATERIÁL:					
				HMOTNOST:					
				MĚŘITELNO. L110				L08 21 11010	
				NÁZEV:		1_Trubka krátká			
				Č. VÝŘESU				A3	



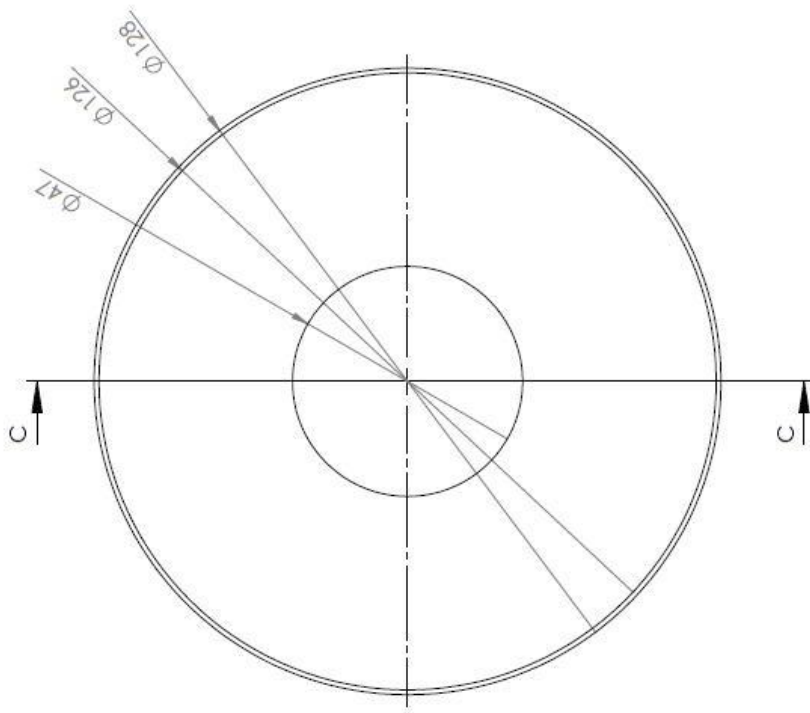
ŘEZ B-B



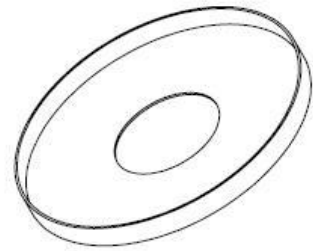
FOKID NENILUWEDENO JINAK DIMENZY JEDU V MILIMETRECH DENICE		OPRACOVANE		ODSTRANE ODSTREHANY		NEPRAVOVAT MERENO VYREZU		JMENA	
TOLERANCE: LINEARNE UHLOVA.		JMENO	PODEP	DATUM					
NAVEH									
PREVODJEL									
SCHVALL									
VYROBA									
Z. JAKOSTI									
				MATERIAL:					
				HMOTNOST:					
				MERTKO: I:				ISS 3.1.1.670	
NAZEV: <b>2-Přepážka s dírami</b>									
Č. VYREZU								A3	





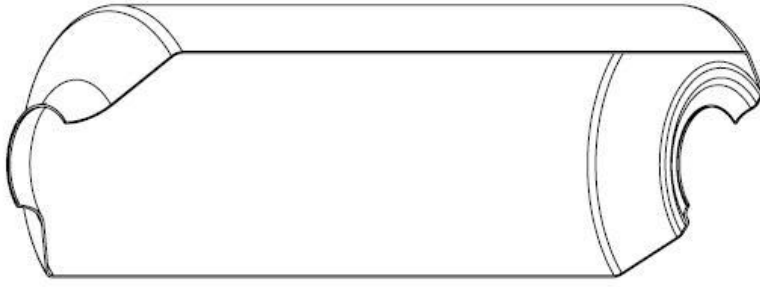
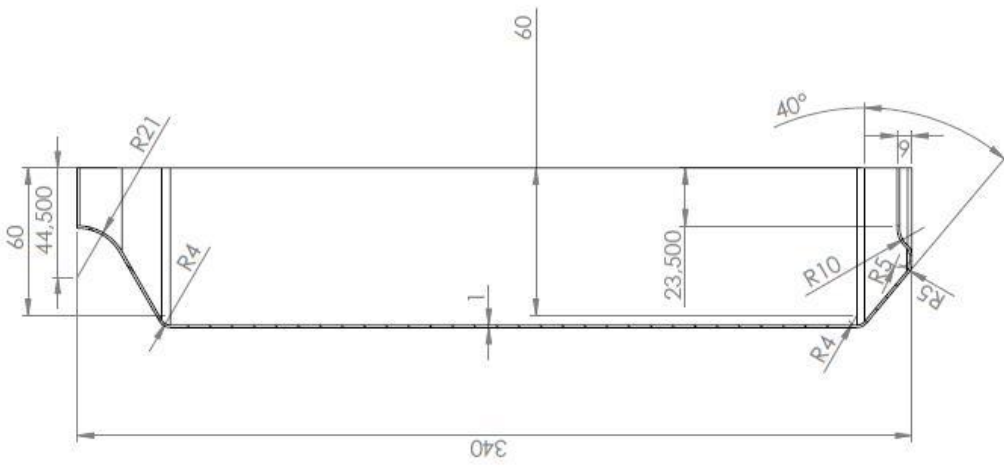
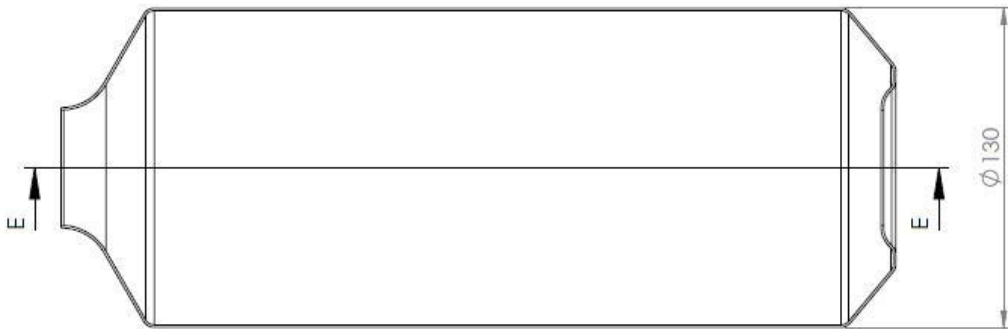


ŘEZ C-C

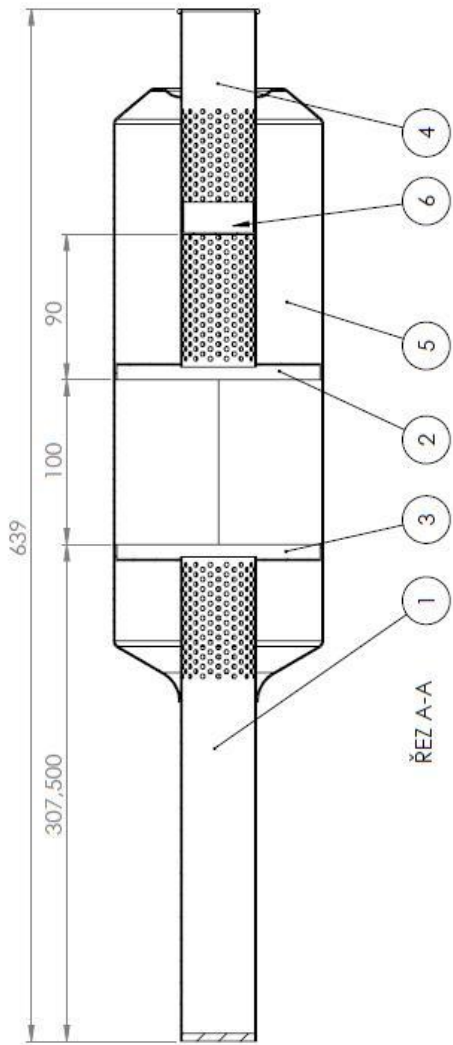
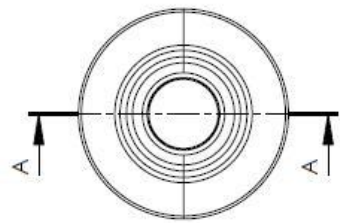


FUNKČNÍ NÁZEV KÓD MĚŘITELNÝ JIŘÍ MĚŘITELNÝ JIŘÍ MĚŘITELNÝ JIŘÍ		OPRACOVÁNÍ		OČISTNÉ OPERACE		MĚŘITELNÝ VÝKRES		JMÉNO	
TOLERANCE LINEÁRNÍ ÚHLŮVÁ		POČAS DATUM							
NAVŘEL									
PROJEKTOVATEL									
SKYŠEL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
				MATERIÁL:					
						C. VÝKRESU		A3	
						MĚŘITELNÝ		MĚŘITELNÝ	
						MĚŘITELNÝ		MĚŘITELNÝ	

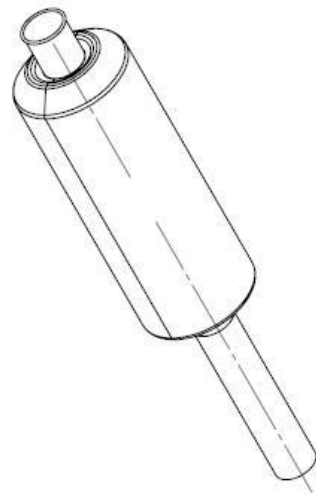
4\_Přepážka plná



POKLID NENÍ UVEDENO JINAK JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OBRÁČOVANÉ		ODSTRANĚNÉ OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘENÍ VÝŘESU	JMĚNA
TOLERANCE: LINEÁRNĚ: ÚHLOVĚ:		JMĚNO	PODPS	DATUM			
MAVŘIL					NÁZEV: <b>5_Plášt</b>		
PRŮKŮŽEL							
SKVÁLIL							
VÝROBA					MĚŘENÍ: A3		
Z. JMĚNOSTI					MĚŘENÍ: 1:1		
					HMOTNOST: 0,21100		



ŘEZ A-A



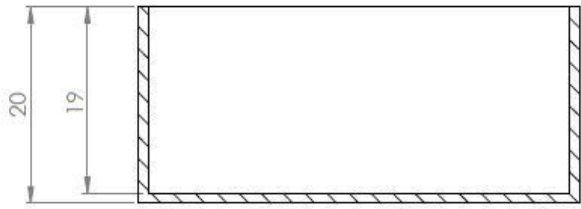
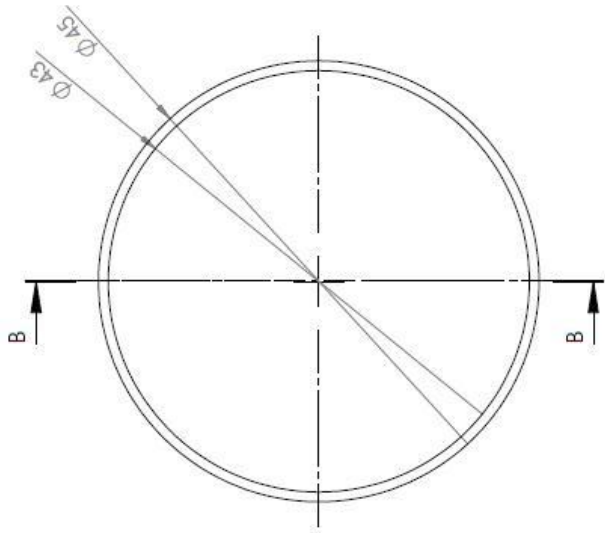
Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	0,025 m <sup>3</sup> /MNOŽ.
1	Trubka dlouhá		1
2	Prepazka s dírami		1
3	Prepazka plná		1
4	Trubka krátká		1
5	Plast 1		2
6	Ucpavka		1

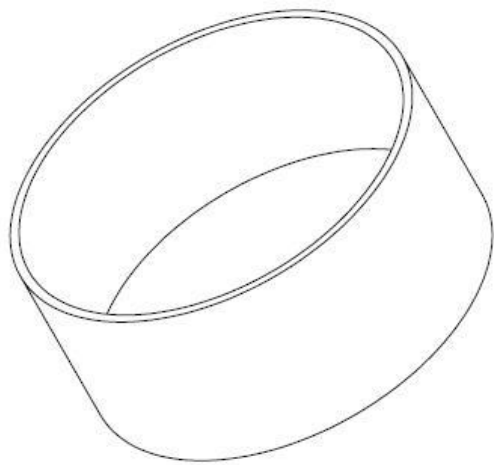
POKUSNÍ ÚSTROJÍ JINÉ: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH TOLERANCE: HODNOTY VE ZÁKROVĚ ÚBROVŇ	OBRAČOVÁNĚ	OSTŘENÍ OSTŘENÍ HRANY	NEPRAVOVAT MĚŘITVO VÝŘESU	ZMĚNA

JMÉNO	POPIS	DATA	NÁZEV:	
NAVRHL			Výfuk s ucpávkou - sestava	
PŘETVOŘENÍ				
SCHVÁLIL				
VYKROJIL				
Z. JAKOSTI				
			MATERIÁL:	
			Č. VÝŘESU	A3
			MĚŘITVO: 1:10	
			HMOŽNOST:	LIST 1 Z 1 LISTŮ



ŘEZ B-B



PODLUŽNÍ VĚROVNĚ JINAK VĚROVNĚ V MĚŘÍTECH DEKOD.		OPRACOVÁNĚ ODBRÁNÍ OBRUBNÍ		NEPRAVOVATĚŘSKÝ VÝTĚSU ZMĚNA	
TOLERANCE: LINEÁRNÍ ÚHLOVÁ		Jméno POUŠ DATUM		NÁZEV: <b>6_Ucpávka</b>	
NÁVRH PŘEKUŠE SCHVÁL VÝROBA Z. JACOSI		MATERIÁL:		Č. VÝTĚSU <b>A3</b>	
		MĚŘNICE:		MĚŘNICE:	
		MĚŘNICE:		MĚŘNICE:	