VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODELOVÁNÍ VÝFUKOVÉHO SBĚRNÉHO POTRUBÍ PŘEPLŇOVANÉHO MOTORU

MODELING OF EXHAUST MANIFOLD FOR TURBOCHARGED ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE **TOMÁŠ FANTA**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Ing. DAVID SVÍDA, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Fanta

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modelování výfukového sběrného potrubí přeplňovaného motoru

v anglickém jazyce:

Modeling of Exhaust Manifold for Turbocharged Engine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvořte parametrický model výfukového sběrného potrubí přeplňovaného motoru v prostředí programu Creo.

Cíle bakalářské práce:

1) Popiště konstrukční řešení výfukových sběrných potrubí používaných v součastnosti u zážehových motorů
2) Vytvořte parametrický model
3) Zhodnoťte možnosti Vašeho modelu a vhodnost jeho použití pro další analýzy

Seznam odborné literatury:

[1] PÍŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991
[2] STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.
[3] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Svída, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 27.10.2014

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce popisuje různá konstrukční řešení sběrného výfukového potrubí a tvorbu parametrického modelu výfukových svodů přeplňovaného motoru 1,4 TSI. Dále studie zkoumá konstrukční materiály svodů a základní termodynamické a hydrodynamické děje v nich probíhající. Následně v programu Solidworks byly vytvořeny dva parametrické modely. První byl vymodelován podle již existujícího sběrného výfukového potrubí motoru 1,4 TSI a jednalo se o symetrický model (kolektor v ose). Pro druhý model byl kolektor posunut v horizontální ose, a proto se jedná o asymetrický model. Modely byly vyhodnoceny z hlediska jejich složitosti konstrukčního řešení a nároků na výrobu. Nakonec byly zkoumány i možné CFD analýzy pro další vyhodnocování modelů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výfukové svody, parametrický model, motor 1,4 TSI, optimalizace modelu, normalizovaná kolena, délky střednic, výfukový systém, SolidWorks, Creo 2.0, CFD analýzy

ABSTRACT

This work describes different structural designs of the exhaust manifold and creation of parametric models of exhaust downpipes of supercharged engine 1,4 TSI. Next, the study deals with exhaust manifold's materials and with present basic principles of thermodynamic and hydrodynamic. Then two parametric models were modelled in Solidworks software. First model was made according to existing exhaust manifold of engine 1,4 TSI. It was symmetrical model (collector in the axis). For second parametric model the collector was moved in horizontal direction, so this model is asymmetrical. Both models were evaluated considering their complexity of structural design and their manufacturing claims. Finally the possibility of CFD analysis for evaluation of parametric models was studied.

KEYWORDS

Exhaust manifolds, parametric model, the 1.4 TSI engine, optimization of exhaust manifolds' model, normalized knee of exhaust manifolds, length medians, exhaust system, SolidWorks, Creo 2.0, CFD analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FANTA, T. *Modelování výfukového sběrného potrubí přeplňovaného motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Svída, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. května 2015 ……..……..

Tomáš Fanta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné připomínky při zpracování bakalářské práce. Dále přítelkyni za pomoc při překladu cizojazyčných textů a především své rodině za trpělivost a podporu po dobu celého mého studia.

OBSAH

Úvod 9
1 Konstrukční řešení výfukových sběrných potrubí zážehových motorů 10
1.1 Výfukový systém 10
1.1.1 Sběrné potrubí výfukového systému 11
1.1.2 Druhy konstrukčních řešení sběrných potrubí 14
1.1.3 Druhy materiálů sběrných potrubí 16
1.2 Proudění tekutin ve sběrném potrubí 17
1.2.1 Základní fyzikální zákony a vlastnosti proudění tekutin 18
1.2.2 Základní zákony proudění 18
1.2.3 Tlakové vlny ve výfukovém potrubí 21
1.3 Mechanismy přenosu tepla ve sběrném potrubí 22
1.3.1 Vedení - Kondukce 22
1.3.2 Proudění - Konvekce 23
1.3.3 Záření 24
2 Tvorba parametrického modelu 26
2.1 Postup vytváření parametrického modelu 27
2.2 Vytvoření původního symetrického modelu 28
2.3 Vytvoření asymetrického modelu 29
2.4 Porovnání konstrukcí a složitosti výroby 29
3 Vyhodnocení parametrického modelu 31
3.1 Vyhodnocení původního symetrického modelu 31
3.2 Vyhodnocení asymetrického modelu s posunutým kolektorem 32
3.3 Vhodnost použití parametrického modelu pro další analýzy 32
Závěr 35
Seznam použitých zkratek a symbolů 38

ÚVOD

Výfukový systém byla po celou řadu let opomíjená problematika. Je však důležité si uvědomit, že se jedná o jednu z nejvíce namáhaných částí automobilu. Slouží k odvodu výfukových plynů vznikajících při práci motoru hořením paliva a rovněž k výraznému snížení hlučnosti, kterou motor při práci produkuje.

Cílem této bakalářské práce je zkoumat a popsat různá konstrukční řešení výfukových sběrných potrubí u zážehových čtyřdobých motorů. Spolu s tím porozumět základům hydrodynamiky, termodynamiky a mechanismům přenosu tepla uvnitř výfukového systému spalovacího motoru. Dalším cílem práce bylo vytvoření parametrického modelu sběrného výfukového potrubí za pomoci konstrukčních programů Solidworks a Creo 2.0. Posledním cílem bylo vyhodnotit možnosti modelu a jeho vhodnost k použití pro další analýzy.

1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VÝFUKOVÝCH SBĚRNÝCH POTRUBÍ ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

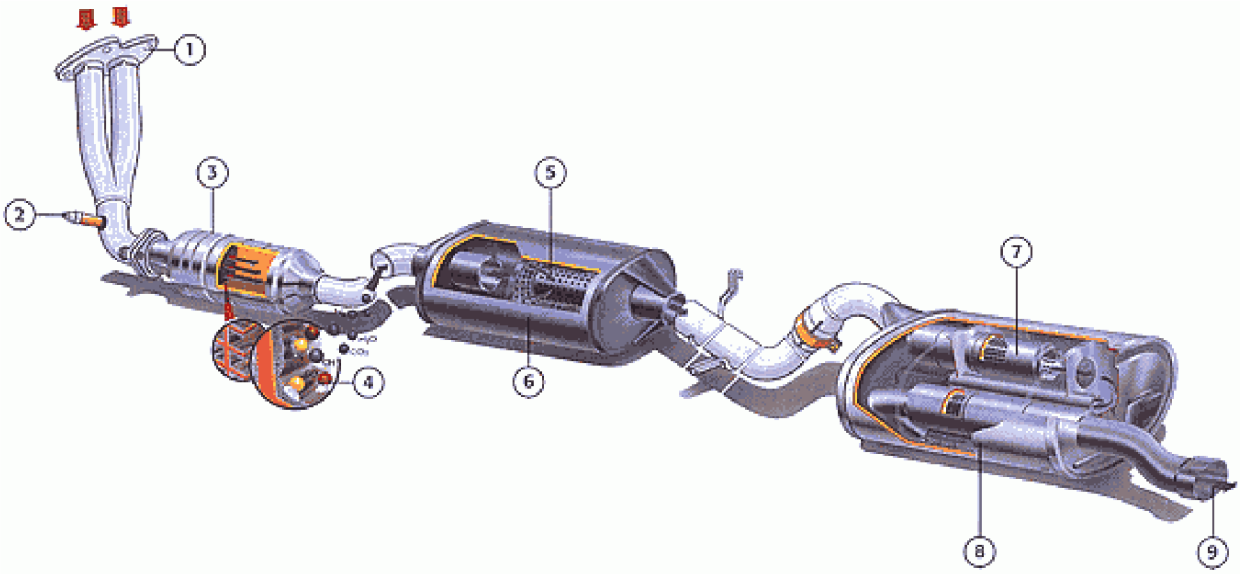
1.1 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Výfukový systém slouží k odvodu výfukových plynů vznikajících při práci motoru hořením paliva a k výraznému snížení hlučnosti, kterou motor při práci produkuje. Výfukové systémy vybavené katalyzátorem přispívají aktivně ke snižovaní hladiny škodlivých emisí uvolňovaných do ovzduší. Další důležitou funkcí výfukových systémů je odvod spalin mimo karoserii vozidla, aby se nedostaly do kabiny vozu. Poškozený výfuk anebo jeho nesprávná funkce, či některé jeho součásti, má vždy negativní vliv na produkovaný hluk nebo zvýšení hladiny škodlivých plynů. V některých případech se poškození nepříznivě projeví i na spotřebu paliva a výkon motoru vozidla.

Celý výfukový systém motoru je jedním z nejvíce namáhaných součástí automobilu. Jeho životnost je ovlivněna řadou faktorů. Zaprvé uvnitř systému probíhají výrazné změny teplot a působení kyselé vody vzniklé kondenzací výfukových plynů, čímž celé potrubí podléhá extrémní vnitřní korozi. Dále z vnější strany na výfukový systém také působí voda a nečistoty, které zapříčiňují vnější korozi. V neposlední řadě je životnost výfukového potrubí negativně ovlivněna vibracemi, které primárně namáhají spoje [18].

Ve výfukovém potrubí se také vytváří potřebný přetlak, který redukuje rychlost odvodu spalin z válce. Příliš vysoká rychlost plynů může rozkmitat náplň ve válci, tím se ovlivní pohyb pístu. Důsledkem je negativní vliv na výkon motoru [18].

Výfukový systém se skládá z následujících částí (viz Obr. 1):



Obr. 1 Přehled součástí výfukového systému [1]

1) Příruba se sběrným potrubím,
2) Lambda sonda,
3) Třícestný katalyzátor,
4) Chemické činnosti katalyzátoru,
5) Expanzní komora prvního tlumiče,
6) Dvojitý plášť s izolační vrstvou,
7) Tlumicí prvky druhého tlumiče,
8) Dvojitý plášť s izolační vrstvou,
9) Vyústění výfuku.

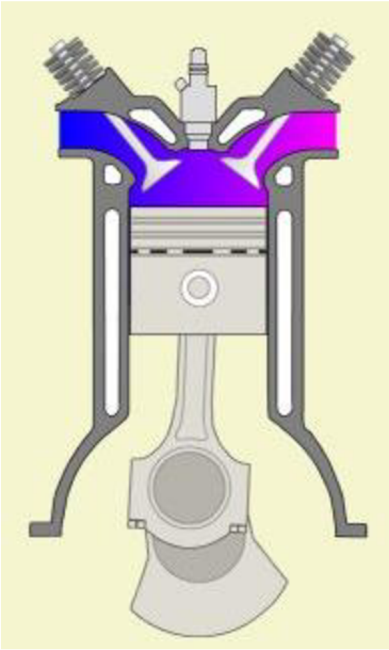
Tato práce se bude zabývat především řešením počáteční části výfukového systému, a to **sběrným potrubím**, neboť významně ovlivňuje funkci a účinnost motoru.

Při návrhu výfukového systému pro turbomotor se bude postupovat dle stanovených pravidel pro atmosférický motor. Jediný rozdíl mezi těmito systémy je, že u přeplňovaného systému není potřeba takového tlumení jako u atmosférického motoru, neboť samotné turbodmychadlo díky přeměně energie plynů tlumí výfukové plyny.

1.1.1 SBĚRNÉ POTRUBÍ VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Sběrné potrubí neboli výfukové svody odvádějí výfukové plyny od hlav válců motoru přímo z výfukového kanálu do dalších dílů výfukového potrubí. Jsou pevně uchyceny přímo na hlavu motoru. Z důvodu vysokých teplot odváděných plynů (více než 900°C) jsou vyrobeny z litiny, žáruvzdorné oceli nebo titanu [1,6,12]. U nejběžnějších čtyřválcových motorů dochází obvykle k postupnému spojení čtyř trubek do dvou a později do jedné trubky, přičemž se vždy zvýší průměr trubky pro zabezpečení odvodu zvětšeného objemu plynů. Podle spalování se spojují většinou nejvíce vzdálené válce, nejčastěji 1+4 a 2+3. Vždy se spojují válce, ve kterých probíhají opačné fáze. U čtyřdobého čtyřválce s pořadím zážehů 1-3-4-2 jsou svody provedeny tak, že jsou spojeny dva krajní a dva prostřední a až následně se slučují dohromady. V ideálním případě by měly být trubky stejně dlouhé, ale vzhledem k omezenému motorovému prostoru toho není vždy možné docílit. Svody vyúsťují v přední výfukové potrubí nebo přímo v katalyzátor.

Cílem návrhu výfukového sběrného potrubí je maximálně využít hybné síly a setrvačnosti pohybujících se výfukových plynů a jimi vytvořeného podtlaku po uzavření výfukového ventilu k co nejdokonalejšímu odsátí spálené směsi z válce. Zároveň lépe umožnit čerstvé směsi naplnit válec při střihu neboli překrytí ventilů (viz Obr. 2). Tento podtlak je důležité využívat zejména ve vysokých otáčkách, kdy na vypláchnutí a znovunaplnění válce je málo času. Správně umístěným a konstrukčně správně řešeným sběrnicím jednotlivých trubek je pak možné vzájemně pozitivně či negativně ovlivňovat vyplachování jednotlivých válců, kdy podtlak v potrubí jednoho válce napomáhá výplachu válce jiného.



Obr 2. Střih ventilů (oba jsou otevřené) [4]

Pro řešení svodu čtyřválce, kterým se tato práce zabývá, existují dvě základní konstrukce výfukových trubek. První je konstrukce typu 4-1, což znamená, že čtyři primární trubky přecházející do jedné koncové (viz Obr. 3) a druhá konstrukce typu 4-2-1 představuje přechod čtyř primárních trubek do dvou sekundárních a poté do jedné koncové (viz Obr. 4). Konfigurace 4-1 maximálně využívá hybné síly právě k posílení špičky výkonu a naopak systém 4-2-1 posiluje výkon ve středním spektru obrátek s mírným poklesem maxima výkonu.

Obr. 3 Příklad konfigurace 4-1 [4]

Obr. 4 Příklad konfigurace 4-2-1 [4]

Co se týče průměrů a délek primárních a sekundárních koncových trubek, tak se jedná o problematiku tzv. **pulzního ladění** [4]. To využívá pozitivních, ale i negativních tlakových vln šířících se potrubím rychlostmi dosahujícími téměř rychlosti zvuku. Pozitivní tlakovou vlnu vytváří příchod počáteční náplně spálených plynů do systému. Jakmile tato tlaková vlna dorazí na konec potrubí, vytváří v potrubí podtlakovou (negativní) vlnu, jež se vrací potrubím zpět k výfukovému ventilu. Cílem pulzního ladění je, aby tato vlna dorazila do válce právě ve chvíli překrytí ventilů v požadovaných otáčkách. S využitím následujících vzorců (1.1) až (1.4) [4] je možné díky správné délce systému přizpůsobovat charakteristiku motoru pro konkrétní využití a konkrétní využitelné spektrum otáček.

- Vzorec pro délku výfukového potrubí: **potrubí ventil/kolektor**

$$L_e = \frac{500 \cdot a_e \cdot \theta_{er}}{6N} \tag{1.1}$$

$$a_e = \sqrt{\gamma * R * T} \tag{1.2}$$

kde L_e …délka výfukového potrubí pro část potrubí ventil/kolektor [mm],
a_e…rychlost zvuku ve vzduchu [$m \cdot s^{-1}$],
N…otáčky motoru [min^{-1}],
γ…adiabatický koeficient [-],
T…teplota [K],
θ_r…perioda [°],
R…plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$].

- Vzorec pro délku výfukového potrubí: **potrubí kolektor/konec systému**

$$L_{tp} = \frac{500 \cdot a_e \cdot \theta_{tr}}{6N} \tag{1.3}$$

kde L_{tp} …délka výfukového potrubí pro část potrubí kolektor/konec systému [mm],
θ_{tr}…perioda [°].

- Vzorec pro **poměr ploch kolektoru a vúsťujícího potrubí**

$$C_{kol} = \frac{A_{výstup}}{A_{vstup}} = \frac{(n-1) \cdot d_{ep}^2 + d_{tp}^2}{d_{ep}^2} \tag{1.4}$$

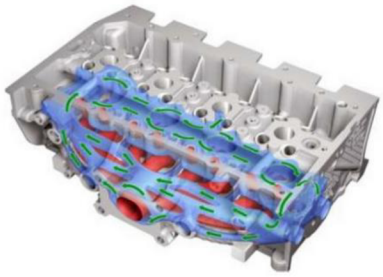
kde C_{kol} … poměr ploch kolektoru a vúsťujícího potrubí,
$A_{výstup}$ … plocha kolektoru [mm^2],
A_{vstup} …plocha vstupního potrubí [mm^2],
d_{ep} … průměr vstupního potrubí [mm],
d_{tp} …průměr kolektorového potrubí [mm],
n … počet vstupních potrubí.

Přesný vnitřní průměr v kolektoru bohužel nelze nikdy exaktně spočítat, a to především kvůli různorodosti výfukového systému (přesahy, ohyby, konstrukce tlumiče, teplotní rozdíly plynů) a dalším faktorům, které výrazně ovlivňují konstrukci celého systému. Pro jeho přibližné určení se většinou vychází z empirických hodnot získaných dlouhodobým zkoušením různých variant.

K řešení odvodů výfukových plynů o vysoké teplotě je důležitá znalost mechanismů proudění tekutin v potrubí a mechanismů přenosu tepla, což bude řešeno v kapitole: Proudění tekutin ve sběrném potrubí.

1.1.2 DRUHY KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ SBĚRNÝCH POTRUBÍ

Obecně se typy sběrných potrubí liší konstrukčním řešením, a to způsobem, kterým se jednotlivé svody spojují v jeden. Zajímavým a nejmodernějším řešením je **sběrné potrubí integrované přímo do hlavy válců** (viz Obr. 5).



Obr. 5 Integrované svody v hlavě válců [10]

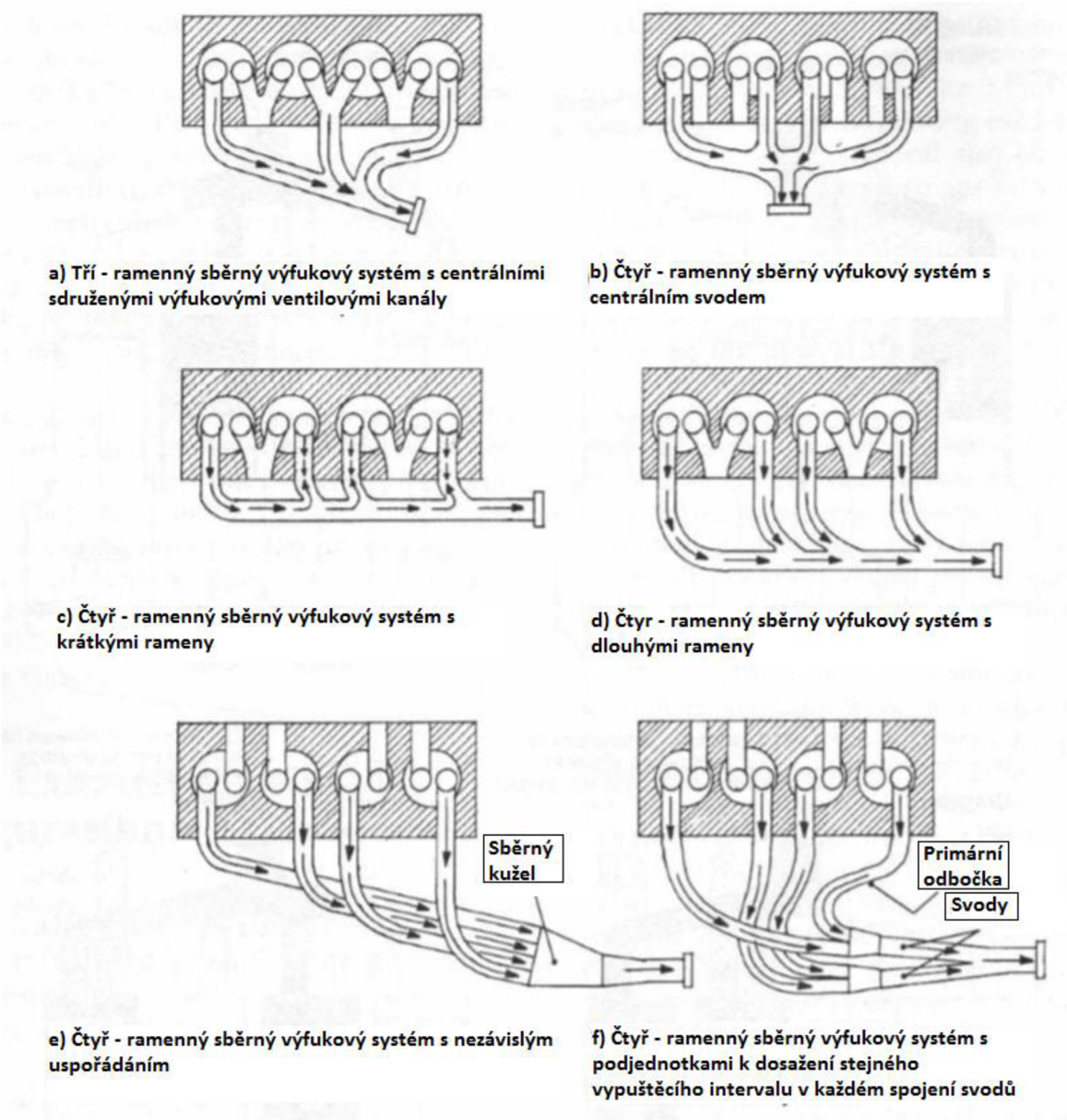
Naopak nejstarším a nejjednodušším řešením je **jednotlivý odvod spalin z každého válce zvlášť** (Obr. 6). Tohoto se využívalo především u historických vozů Formule 1. V dnešní době se s tímto řešením lze setkat pouze u letadel anebo u tzv. dragsterů, kde je kladen velký důraz na rychlost odvodu přehřátých spalin.

Obr. 6 Individuální odvod z každého válce [11]

Třetím konstrukčním řešením je v dnešní době nejrozšířenější způsob odvodu spalin, a to **jednotlivými trubkami vúsťujícími do sebe** (Obr. 7). Toto řešení je využíváno ve všech odvětvích od sériově vyráběných automobilů přes motocykly až po motosport.

Obr. 7 Klasické vyústění svodů motor Hayabusa 1.3

Další možná konstrukční řešení sběrných výfukových systémů je na Obr. 8.



Obr. 8 Různá konstrukční řešení sběrných výfukových systémů [3]

1.1.3 DRUHY MATERIÁLŮ SBĚRNÝCH POTRUBÍ

Šedá litina

Šedá litina neboli litina s lupínkovým grafitem je slitina železa a uhlíku o obsahu uhlíku větším než 2,14 %.

Sběrné potrubí ze šedé litiny se objevuje především u starších motorů (Obr. 9). Jeho předními výhodami jsou odolnost proti oxidaci, dostatečná pevnost a kapacita pohlcovat hluk a vibrace. Mezi nevýhody patří vysoká hmotnost a velké množství odvodu tepla (vysoká tepelná vodivost šedé litiny [6]), což prodlužuje dobu náběhu katalyzátoru [1].

V porovnání s ostatními litinami je výroba šedé litiny jednodušší a z hlediska technologických postupů méně náročná, což se dále projevuje v nižší ceně odlitků [6].

Obr. 9 Sběrné potrubí ze šedé litiny [1]

Žáruvzdorná ocel

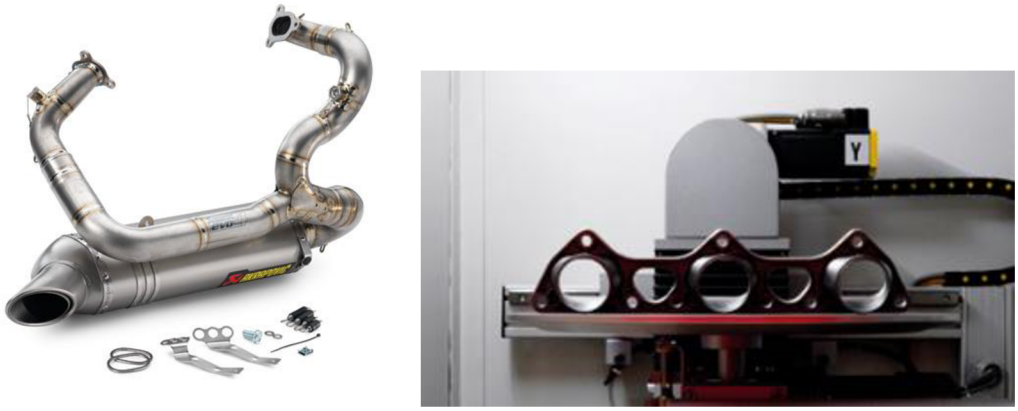
Žáruvzdorné oceli se vyznačují především vyšším množstvím chrómu (Cr) ve své struktuře, což zvyšuje odolnost vůči korozi za normálních i vyšších teplot (600°C – 1200°C) [7].

Dříve se žáruvzdorné sběrné potrubí (Obr. 10) díky své nízké hmotnosti a malému odvodu tepla používalo hlavně u závodních a sportovních motorů. Dnes se těchto výhod plně využívá i u standardních vozidel. Potrubí je délkově laděné, což znamená, že využívá tlakových pulzací, které vedou k lepšímu odvodu spalin a tím se zvyšuje výkon motoru (~ 5-10 %). Hlavním problémem je, že se žáruvzdorné potrubí nedá tvářet, to znamená, že jediným způsobem vytvoření složitých tvarů sběrného potrubí je svařit velké množství přesně nařezaných normalizovaných trubek a kolen [1].

Obr. 10 Sběrné potrubí ze žáruvzdorné oceli [1]

Titan

Největší novinkou v materiálech pro výfukové potrubí je titan. Nepodléhá korozi a má vynikající tepelné vlastnosti. Ze všech tří materiálů dosahuje nejnižší hmotnosti, ale nejvyšší ceny. Nachází využití zejména u závodních vozů a poslední dobou i u sériově vyráběných super-sportovních motocyklů (Obr. 11) [12].



Obr. 11 Sběrné potrubí z titanu [12]

Porovnání vlastností šedé litiny, žáruvzdorné oceli a titanu jsou shrnuty v Tab. 1.

Tab. 1 Porovnání vlastností materiálů [8]

Materiál	Hustota materiálu [kg/m^3]	Tepelná vodivost [W/m.K]	Tepelná kapacita [kJ/kg]
Šedá litina	7200 -7300	42 - 63	0,545
Žáruvzdorná ocel	7840	46	0,460
Titan	4506	21,9	0,523

1.2 PROUDĚNÍ TEKUTIN VE SBĚRNÉM POTRUBÍ

Proudění tekutin, konkrétně plynů, v pracovních částech spalovacích motorů neboli výfukových systémech je jedním z nejsložitějších systémů pohybu tekutin, se kterým se lze v problematice proudění setkat.

Pro návrh motoru a s ním spojených soustav (včetně výfukové) je důležité rozdělení tekutin na **dokonalou** a **skutečnou**, kde se dokonalá tekutina od skutečné liší tím, že je opomíjeno vnitřní tření, a na **stlačitelnou** ($\boldsymbol{\rho_1 \neq \rho_2}$) a **nestlačitelnou** ($\boldsymbol{\rho_1 = \rho_2}$)tekutinu ($\rho$…hustota tekutiny) [2].

Při návrhu motorů a s ním spojených soustav se zjišťuje, že dříve používané metody řešení dvoudimenzionálního (2D) proudění vazké stlačitelné tekutiny jsou nedostatečně přesné. K dosažení spolehlivějších parametrů je třeba řešit třídimenzionální (3D) proudění vazké stlačitelné tekutiny. Toto numerické řešení je však v současné době velmi náročnou záležitostí, neboť programové systémy jsou řádově několikanásobně dražší než systémy pro řešení mechaniky těles (2D) [2].

Pro řešení 3D proudění je důležité definovat základní matematické modely proudění a tekutin.

1.2.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ ZÁKONY A VLASTNOSTI PROUDĚNÍ TEKUTIN

Definice tekutiny

Tekutiny jsou takové látky, které neodolávají působení smykového napětí a začínají téct. Rozlišujeme látky kapalné a plynné. Pro náš případ se omezíme pouze na proudění plynů, a to výfukových plynů [13].

Plyn

Jedná se o médium, ve kterém jsou velké vzdálenosti mezi molekulami. Jsou tak velké, že přitažlivé síly mezi jednotlivými molekulami nedokáží udržet jeho stálý tvar a objem. Mají tedy tvar a objem nádoby [13].

1.2.2 ZÁKLADNÍ ZÁKONY PROUDĚNÍ

Proudění vzduchu potrubím může být buď laminární, turbulentní nebo transitní. Hranici mezi jednotlivými druhy určuje Reynoldsovo číslo, které je dáno vztahem (1.5) [5]:

$$Re = \frac{V \cdot d}{v} \tag{1.5}$$

kde V … rychlost proudění [m.s^{-1}],

v … kinematická viskozita [m^2.s],

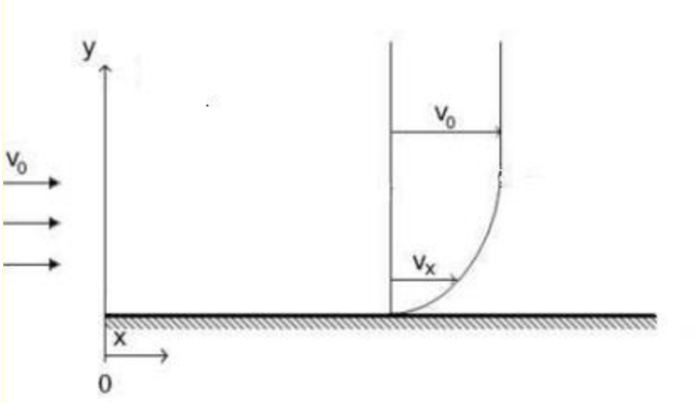
d … charakteristický rozměr [mm].

Do Re ≤ 2320 je proudění stále laminární a od Re ≥ 3000 se mění na turbulentní [5]. Mezi nimi je proudění tranzitní (přechodové). Vlivem vazkosti je rychlost na stěnách potrubí nulová. Se vzdáleností od stěny rychlost zpočátku prudce stoupá, ale pak gradient rychlosti směrem ke středu potrubí klesá [5].

Laminární proudění

Jedná se o pohyb tekutiny, při kterém nevniká příčné proudění ani turbulence. Proudění probíhá ve vrstvách, které se vzájemně neprotínají. Většinou jde o proudění stacionární. Maximální

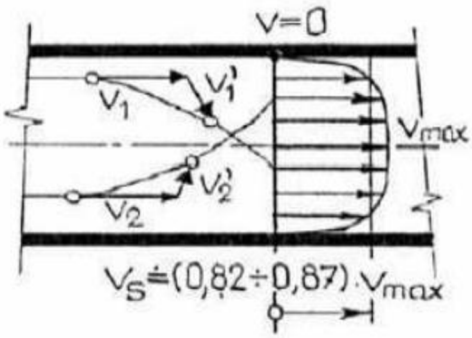
hodnota Reynoldsova čísla pro laminární proudění je Re = 2320. Velikost rychlostí proudění se v průřezu mění. Na stěně je rychlost nulová a na střednici průřezu je hodnota maximální viz Obr. 12 [14].



Obr.12 Rychlostní profil laminárního proudění [14]

Turbulentní proudění

Jedná se o proudění tekutiny, při kterém se navzájem protínají proudnice. Částice se primárně posouvají ve směru proudění a k tomu konají i vlastní neuspořádaný pohyb, při kterém dochází ke vzniku vírů. Rychlosti jednotlivých částic se v čase mění, nejedná se tedy o stacionární proudění. Na stěně potrubí vzniká laminární mezní vrstva viz Obr. 13 [14].



Obr. 13 Rychlostní profil turbulentního proudění [14]

Dále pro výpočet proudění vzduchu v potrubí jsou určujícími veličinami teplota, hustota, rychlost a tlak média. Pro vzduch, jehož měrná tepelná kapacita je nezávislá na teplotě a tlaku, platí **stavová rovnice** definovaná (1.6) [5]:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \tag{1.6}$$

kde p…tlak [Pa],

ρ…hustota tekutiny [kg/m^3],

T…teplota [T].

Pro dokonalou tekutinu jsou základními zákony proudění **Bernoulliho rovnice**, **rovnice kontinuity** a **Eulerovy rovnice**. Z hlediska řešitelnosti proudění dokonalé tekutiny bude proudění bráno jako potencionální. To znamená nevířivé a určené podmínkou pro vektor rychlosti proudu tekutiny (1.7) [2]:

$$rot\ V = 0 \tag{1.7}$$

kde V…vektorové pole rychlosti [m.s^{-1}].

Bernoulliho rovnice popisuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální tekutiny v uzavřené trubici. Součet kinetické, tlakové a potenciální energie je roven konstantě. Její definice je dána vztahem (1.8) [5]:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot h = konstanta \tag{1.8}$$

kde v…rychlost tekutiny [m.s^{-1}],
ρ…hustota tekutiny [kg.m^{-3}],
g…gravitační konstanta [m.s^{-1}],
h…vztažná výška hladiny [m].

Rovnice kontinuity nebo i jinak známý zákon zachování hmoty definuje, že hmotnostní průtok tekutiny v různých materiálech téhož nerozvětveného potrubí je stejný (co do systému vstupuje, musí z něj i odejít), tedy (1.9) [9]:

$$Q_{m1} = Q_{m2} \tag{1.9}$$

kde Q_m… hmotnostní průtok [J].

Dosadíme-li hmotnostní průtok z rovnice (1.2), dostaneme pro stlačitelnou tekutinu ($\boldsymbol{\rho_1} \neq \boldsymbol{\rho_2}$) rovnici kontinuity (1.10) a pro nestlačitelnou tekutinu ($\boldsymbol{\rho_1} = \boldsymbol{\rho_2}$) (1.11) [2]:

$$S_1 \rho_1 v_1 = S_2 \rho_2 v_2 \tag{1.10}$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \tag{1.11}$$

kde S … průřez [m^2],
ρ… hustota tekutiny [kg.m^{-3}],
v … rychlost tekutiny [m.s^{-1}].

Eulerova rovnice je to aplikace druhého Newtonova zákona v tekutinách. Definuje pohybový stav tekutiny a je dána vztahem (1.12) [2]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot grad\ V = a - \frac{1}{\varrho} \cdot \text{grad p} \tag{1.12}$$

kde a… vnější zrychlení [m.s^{-2}],
p… tlak [Pa],
t… čas [s].

Navier-Stokesovy rovnice popisující pohyb vazkých tekutin. Ve srovnání s Eulerovými rovnicemi jsou v nich zahrnuty členy charakterizující vliv vazkosti (1.13) [2]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} = a_x - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + V \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} = a_y - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + V \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right) \tag{1.13}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} = a_z - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + V \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)$$

kde x, y, z… složky souřadného systému.

K Navier-Stokesovým rovnicím přistupuje podmínka kontinuity (1.14) [2]:

$$div(\delta V) + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \tag{1.14}$$

Uvedené matematické modely proudění tekutin charakterizují každý pohyb tekutiny v daném čase a jsou základem pro pochopení řešení třídimenzionálního proudění vazké stlačitelné kapaliny používaného při návrhu motorů a s ním spojených soustav.

1.2.3 TLAKOVÉ VLNY VE VÝFUKOVÉM POTRUBÍ

Plyny ve výfukovém systému neproudí kontinuálně, ale ve formě přetlakových a podtlakových pulsů. Je to zapříčiněno pracovními cykly spalovacího motoru, kdy se ventily otevírají a zavírají a pohybuje se píst. Frekvence tlakových vln závisí na konkrétních otáčkách motoru. U sání se pomocí délkově laděných potrubí dá využít potenciální energii těchto vln ke zlepšení průběhu krouticího momentu a hodnot výkonu [4].

Vliv vlnových dějů na výměnu náplně válce znamená, že u rychloběžných motorů nebo při dlouhých a složitě větvených výfukových potrubích lze různou délkou trubek a členitostí trubek ovlivnit plnění a vyprazdňování jednotlivých válců [2]. Výsledky výpočtů výměny náplně válce pracovních oběhů spalovacích motorů pomocí matematických modelů bývají většinou rozděleny do dvou základních skupin. V první skupině jsou veličiny příslušné jednotlivým cyklům motoru. Jedná se především o **indikovaný výkon**, **střední indikovaný tlak**, **měrnou spotřebu paliva** a **ztráty tepla prostupem stěnami válce**. Druhou skupinou výstupních dat tvoří **časové průběhy tlaku**, **teploty**, **rychlostí** ve válci, v zásobníku, popřípadě v libovolně zvolených místech potrubí [2].

1.3 MECHANISMY PŘENOSU TEPLA VE SBĚRNÉM POTRUBÍ

Při návrhu systému jako je sběrné výfukové potrubí a jeho parametrizaci nelze opomenout tepelné namáhání. Proudí zde výfukové plyny o teplotě 900°, což není zanedbatelným faktorem (Obr. 14). Vysoká teplota ovlivňuje funkci turbodmychadla, dochází také k tepelným pulsům vlivem rozdílného plnění a otáček motoru, čímž je potrubí cyklicky namáháno. Dále záleží na kompresním poměru motoru. Čím vyšší kompresní poměr je, tím je i teplota spalin vyšší. Z vnitřní strany je potrubí ohříváno spalinami a z vnějšku dochází k ochlazování proudícím vzduchem. Spolehlivé určení středních hodnot teplot výfukových plynů před turbodmychadlem je kvůli značným tlakovým pulsacím, proměnlivému průtoku spalin a okamžité teplotě problematické.

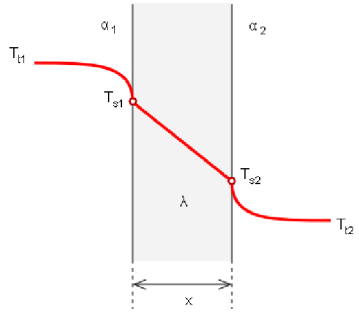
Obr. 14 Rozžhavené sběrné výfukové potrubí [20]

Pro popis tepelných dějů ve výfukovém sběrném potrubí jsou známy tři mechanismy přenosu tepla. Nazývají se vedení (**kondukce**), proudění (**konvekce**) a **záření**. Těmito mechanismy se teplo z výfukových plynů přenáší přes stěny trubek výfuku, které se ohřívají a přenášejí tak tepelnou energii do okolí.

1.3.1 VEDENÍ - KONDUKCE

První způsobem přenosu tepla je vedení neboli kondukce (Obr. 15). Vyznačuje se vázáním tepla na látku, takže vedení probíhá jen mezi sousedícími částicemi hmoty. Tepelná energie se přesouvá z jednoho místa na druhé a to díky interakci mezi molekulami hmoty nebo atomy. Tento děj se vyskytuje u všech látkových skupenství. Plyny přenáší teplo přímými srážkami mezi nabitými molekulami. V důsledku jejich řídké hmoty je jejich tepelná vodivost velmi nízká v porovnání s pevnými tělesy. Pro kapaliny je vedení tepelné energie podobné jako v plynech, ale situace se komplikuje kratšími vzdálenostmi mezi molekulami a větším vlivem molekulárního silového pole na výměnu energie při srážce. Nekovy přenáší teplo vibrací v prostorové mřížce, takže při interakci tepla nedochází k pohybu hmoty. Vedení tepla převládá

v pevných látkách, ale i v tekutinách bez proudění (např. mezera mezi skly) a je zvyšováno volnými elektrony či ionty v tekutinách [5].



Obr. 15 Přenos tepla z vnitřní strany potrubí o vyšší teplotě ke straně o nižší teplotě [5]

kde α_1…vlastnost prostředí uvnitř [-],

α_2…vlastnost prostředí venku [-],

λ…vlastnost materiálu [-],

T_{t1}…teplota uvnitř systému [°C],

T_{t2}…teplota vně systému [°C],

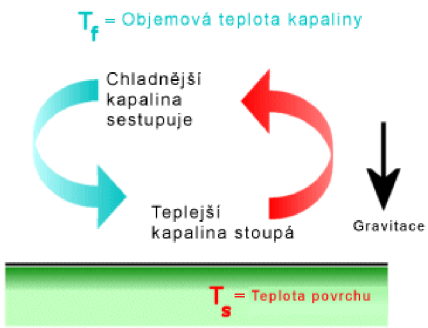
T_{S1}…teplota na vnitřní stěně systému [°C],

T_{S2}…teplota na vnější stěně systému [°C],

X…tloušťka stěny [m].

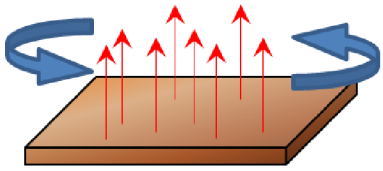
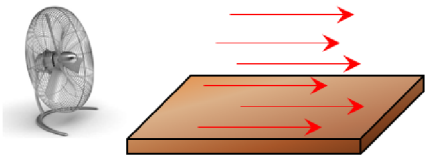
1.3.2 PROUDĚNÍ - KONVEKCE

Druhým způsobem přenosu tepla je proudění neboli konvekce (Obr. 16). Uskutečňuje se změnou pozice částic hmoty v prostoru, při níž částice přenáší svoji tepelnou energii. Tento děj se odehrává v proudících tekutinách a je vždy doprovázen vedením tepla od jedné částice k druhé. V proudící látce neexistuje teplotní rovnováha. Rozlišujeme konvekci volnou a nucenou viz Tab. 2 [5].



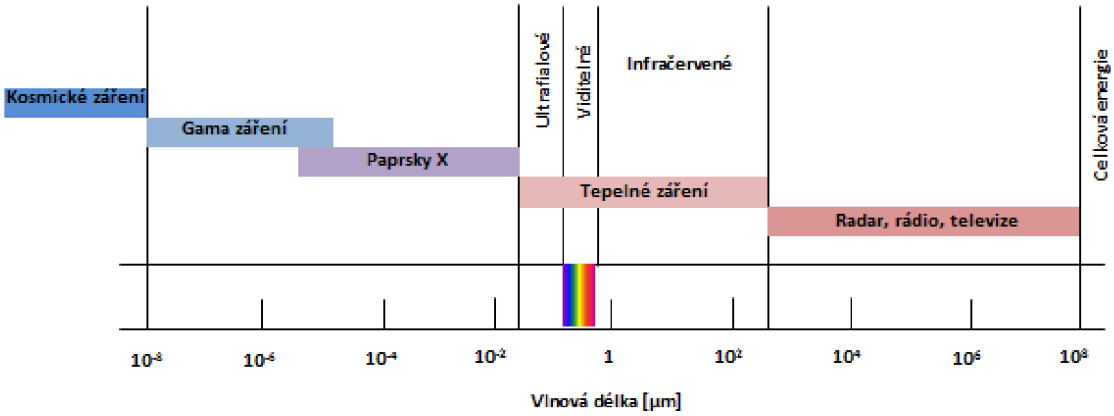
Obr. 16 Princip sdílení tepla samovolným prouděním [15]

Tab. 2 Druhy teplotních konvekcí

Druh konvekce	Definice a popis	Schéma
Volná (Přirozená)	Vrstva tekutiny sousedící s horkým povrchem zahřívá, a tím se její hustota snižuje (za konstantního tlaku je hustota nepřímo úměrná teplotě) a začne na ni působit vztlak (Obr. 17). Studenější (těžší) tekutina u povrchu nahrazuje teplejší tekutinu, a proto stoupá vzhůru [15].	 *Obr. 17 Princip sdílení tepla volnou konvencí [5]*
Nucená	Využití externích prostředků pro urychlení proudění tekutiny v blízkosti povrchu tělesa (ventilátor, přetlak z válce) viz Obr. 18. Rychlý pohyb částic plynu kolem povrchu tělesa zvyšuje teplotní gradient, a tím zvyšuje i velikost tepelné výměny [5].	 *Obr. 18 Princip sdílení tepla nucenou konvencí [5]*

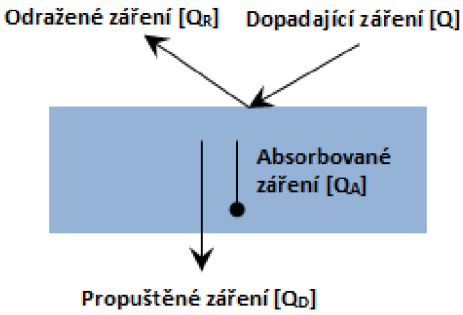
1.3.3 ZÁŘENÍ

Třetí způsob přenosu tepla je záření (Obr. 19). Tepelné záření je elektromagnetické vlnění v určitém rozsahu vlnových délek. Záření mezi dvěma tělesy se skládá z vyzařování, pohlcování a propouštění zářivé energie. Část tepelné energie tělesa se vždy mění v zářivou energii, která prochází prostředím a při dopadu na druhé těleso částečně anebo se zcela opět mění na teplo. Sálání se uskutečňuje i ve vakuu. Každý objekt o teplotě vyšší než 0 K (-273,15°C) vyzařuje fotony, které jsou nositeli energie včetně tepelné. Protože elektromagnetické vlny se šíří i ve vakuu, není pro zařízení nutné žádné médium. Fotony se šíří v transparentním prostředí rychlostí světla, a proto se jedná o nejrychlejší způsob převodu tepla [5].



Obr. 19 Rozsah vlnových délek tepelného záření [5]

Poměr v pohltivosti, odrazivosti a propustnosti se nazývá emisivita (Obr. 20). Tímto poměrem se určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Pohltivost záření (Q_A) je část dopadajícího záření absorbovaná povrchem. Odrazivost (Q_R) je část dopadajícího záření odražená povrchem (u černého tělesa je rovna nule). Propustnost (Q_D)je část dopadajícího záření propuštěná povrchem.



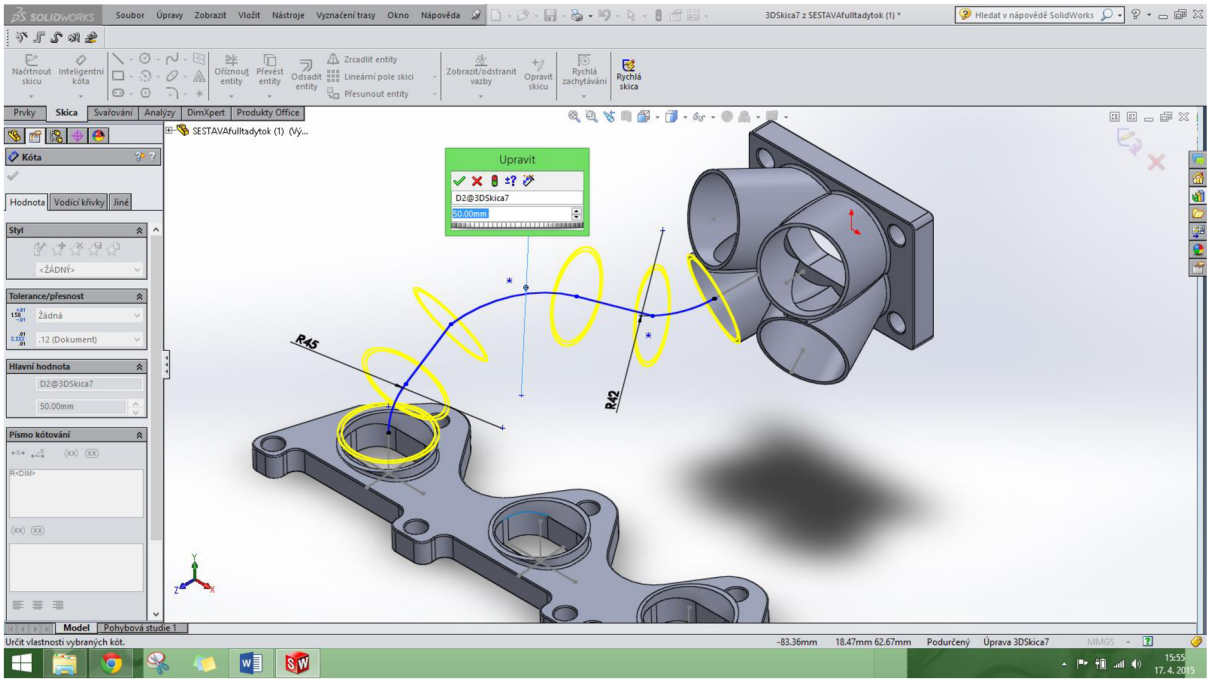
Obr. 20 Emisivita záření [5]

2 TVORBA PARAMETRICKÉHO MODELU

Pro tvorbu bakalářské práce bylo využito programů Solidworks a CREO 2.0, a to především z důvodu práce s těmito programy při předchozím průběhu studia. Cílem práce bylo vytvořit parametrický model výfukového svodu pro motor 1,4 TSI (viz Obr. 21).

Obr. 21 Výfukový svod pro motor 1,4 TSI

Požadavkem bylo dodržení základních zákonitostí pro konstruování výfukového svodu, a to hlavně dodržení co nejpřesněji konstantní délky jednotlivých trubek. Toho se dalo nejspolehlivěji docílit v programu Solidworks, který dostatečně dobře umožňuje pohyb s již hotovými prvky a jejich parametrizací. Například změny poloměrů u střednic jednotlivých trubek a změny jejich délek (viz Obr. 22).



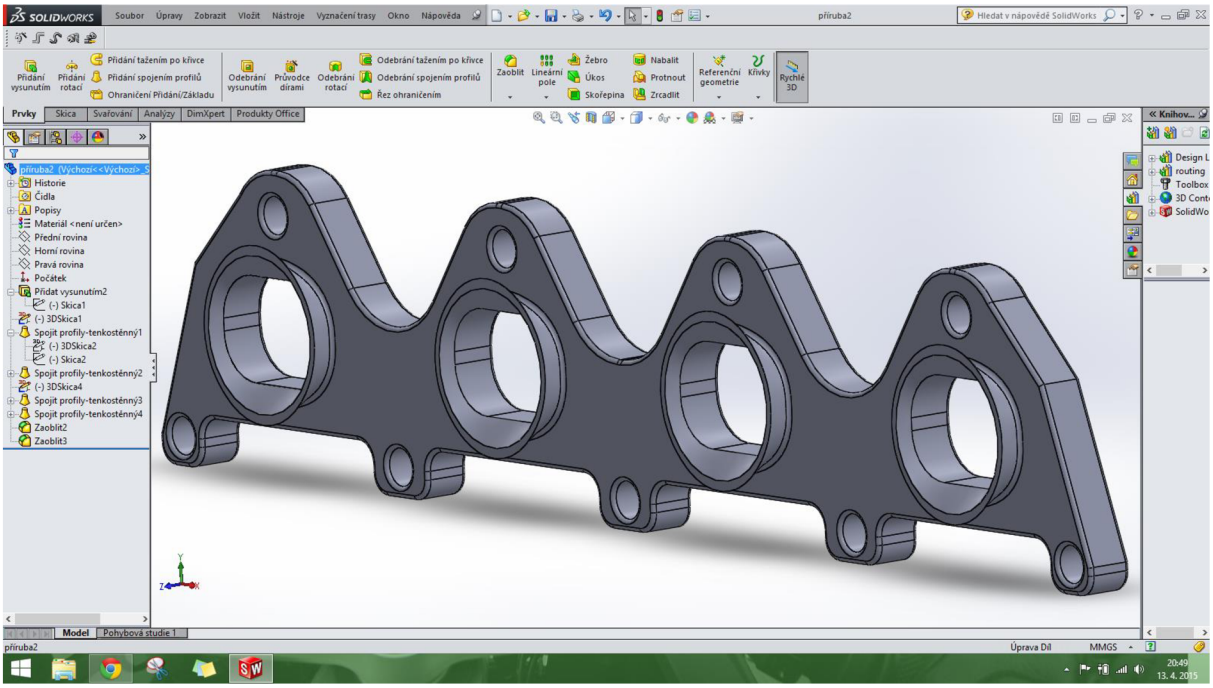
Obr. 22 Tažení střednice trubek

2.1 POSTUP VYTVÁŘENÍ PARAMETRICKÉHO MODELU

Nejdříve bylo nutné změřit zadaný výfukový svod, a to délky potrubí, poloměry kloubů a úhly u napojení přírub. Při samotném řešení modelu bylo nutné brát ohled na prostorové omezení dané zástavbou zadaného motoru 1,4 TSI.

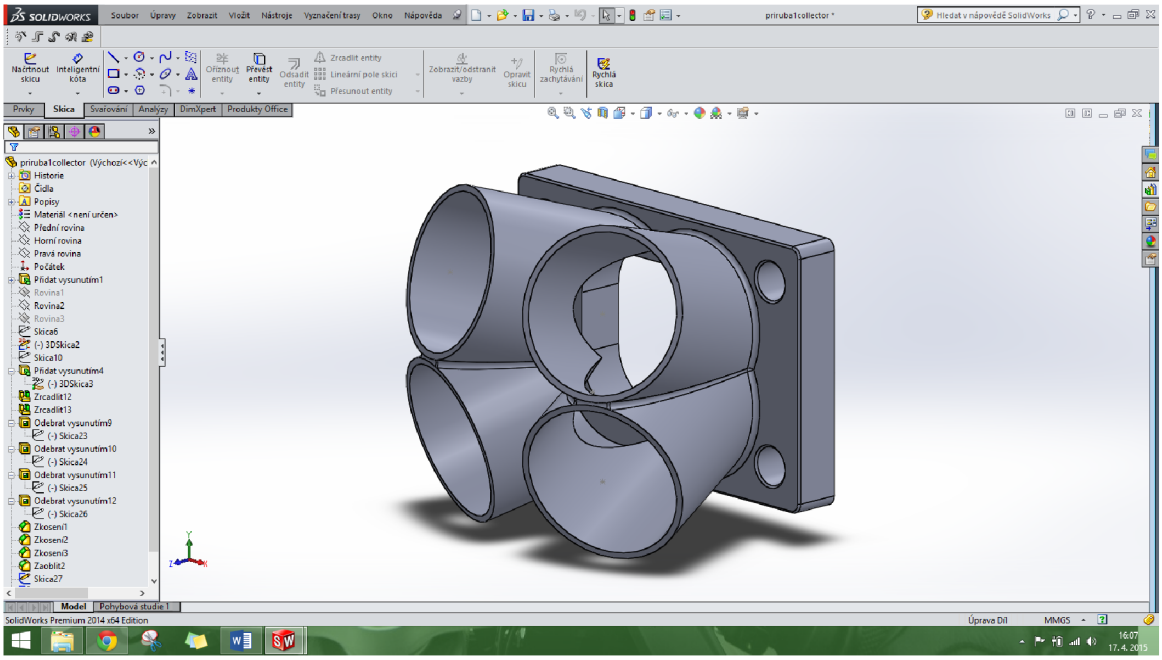
Po změření bylo zapotřebí vymodelovat základní rozvržení obou přírub. Vstupní příruba má pro každý ze čtyř válců jeden otvor.

Pro vytvoření bylo využito základních příkazů softwaru: práce ve skici, přidání vysunutím, vytvoření přechodu z oválného tvaru na tvar kruhový, tedy na trubku o vnitřním průměru 37 mm a tloušťce stěny 1,5 mm (viz Obr. 23).



Obr. 23 Příruba na straně motoru

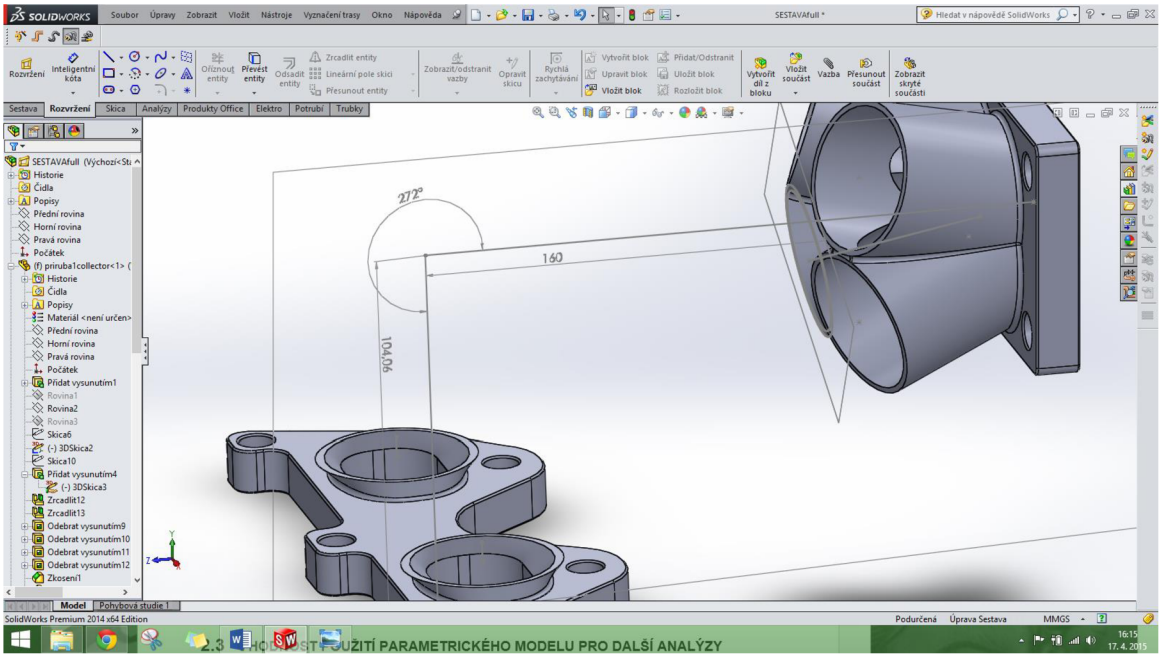
Dalším krokem bylo vytvoření tzv. kolektoru, což je samotné vústění všech trubek do jedné. Vzhledem k zástavbě tohoto motoru není možné využití spojení 4-2-1, a to z důvodu nedostatku prostoru. Proto bylo nutné zvolit řešení 4-1, tedy všechny trubky vúsťují do sebe v jednom místě a dokonce i pod stejným úhlem. Toho bylo docíleno vytvořením jednoho úhlu střednice, který byl pomocí funkce kruhové pole použit pro všechna potrubí (Obr. 24).



Obr. 24 Příruba na straně turbodmychadla (kolektor)

2.2 VYTVOŘENÍ PŮVODNÍHO SYMETRICKÉHO MODELU

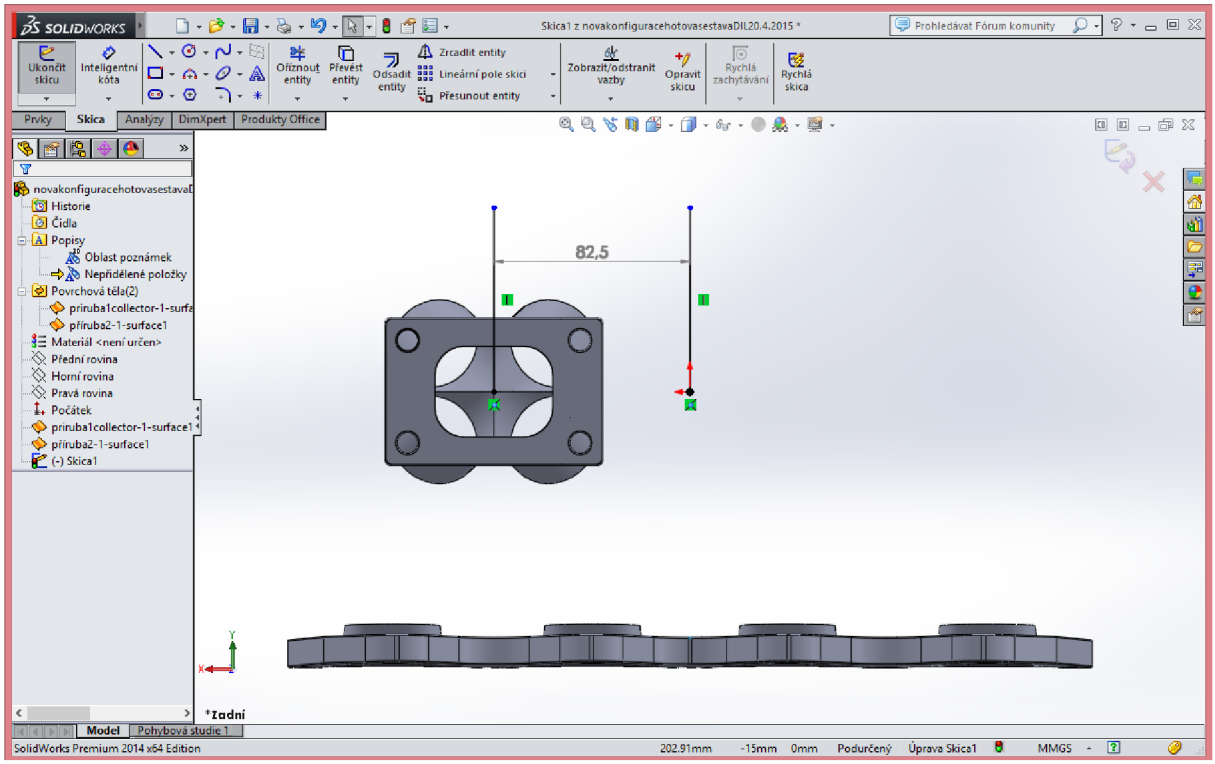
Dále bylo nutné vytvořit základní sestavu, která sloužila jako počáteční vstup pro tvorbu jednotlivých potrubí. Musel být zachován úhel jednotlivých rovin a vzdálenost přírub od sebe (viz Obr. 25).



Obr. 25 základní konfigurace

2.3 VYTVOŘENÍ ASYMETRICKÉHO MODELU

Pro porovnání a tvorbu různých řešení byla navrhnuta nová pozice kolektoru. Toto řešení je konstrukčně zajímavé z důvodu asymetrie. Náročnost tvorby modelu se několikanásobně zvýšila vzhledem k rozdílným vzdálenostem vyústění z jednotlivých válců do kolektoru (viz Obr. 26).



Obr. 26 Změna pozice kolektoru

2.4 POROVNÁNÍ KONSTRUKCÍ A SLOŽITOSTI VÝROBY

Hned při prvním náhledu je zřejmé, že asymetrické řešení bude mnohem náročnější vzhledem k pořizovacím nákladům a složitosti zkompletování. Délka přímých úseků se navýšila z 55 mm na 381 mm, což odpovídá sedminásobnému navýšení. Navíc přibyla tři kolena a tím se navýšil i počet svarů (viz Tab. 3). Z hlediska pořizovacích nákladů na sériovou výrobu je již v téhle fázi mnohem výhodnější volit první konstrukční řešení.

Tab. 3 Kusovník kolen a přímých úseků potrubí

	Množství prvků	
Typ prvku	Původní symetrická konfigurace	Asymetrická konfigurace
Koleno R40	2x	-
Koleno R50	2x	1x
Koleno R70	2x	-
Koleno R80	2x	-
Koleno R20	-	1x
Koleno R25	-	1x
Koleno R30	-	4x
Koleno R50	-	1x
Koleno R60	-	2x
Koleno R90	-	1x
Přímé úseky	55 mm	381 mm

S využitím vzorce obvodu (3.1) a známého počtu svarů je možné určit konkrétní délku svarů potřebnou pro zhotovení sběrného potrubí viz Tab. 4.

$$o = 2 \cdot \pi \cdot r \tag{3.1}$$

Kde o…obvod [mm],
π…Ludolfovo číslo [-],
r…poloměr kruhu [mm].

Tab. 4 Porovnání délek svarů

	Počet svarů	Součet obvodů svarů o [mm]
Původní symetrická konfigurace	16	2009,6
Asymetrická konfigurace	24	3014,4

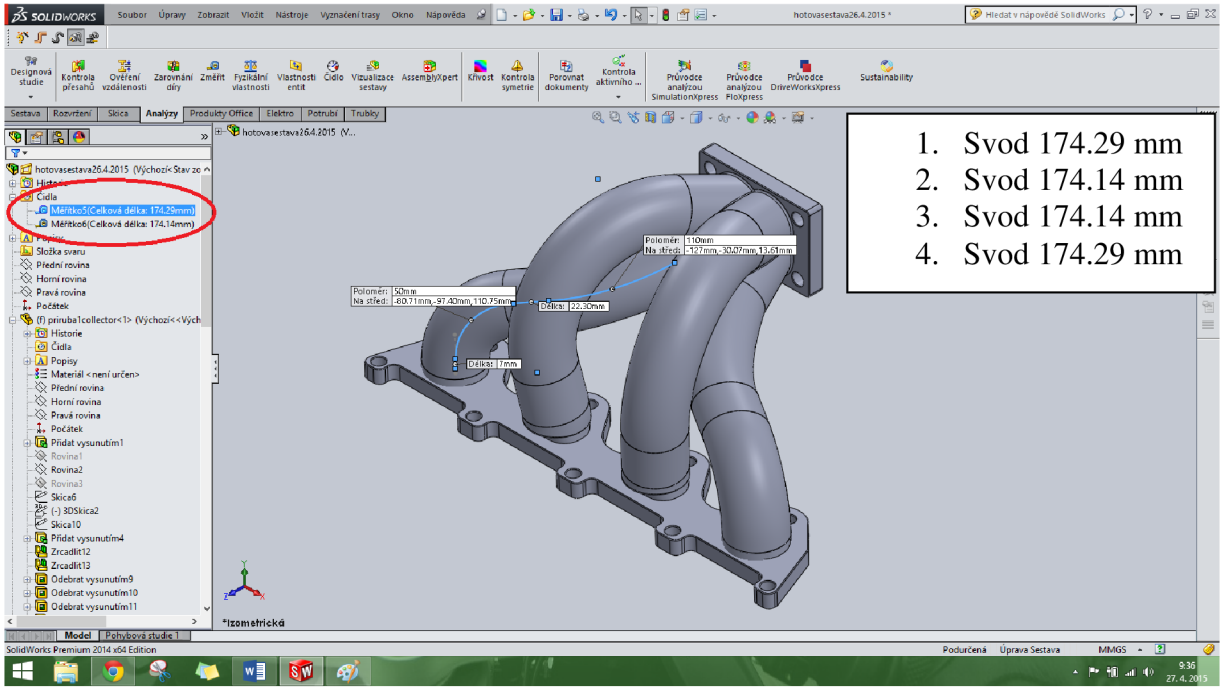
3 VYHODNOCENÍ PARAMETRICKÉHO MODELU

Parametrický model je vhodný pro řadu měření. Především je nutné porovnat vektory rychlostí spalin na vstupu a na výstupu u jednotlivých konstrukčních řešení. Pro další analýzy je vhodné využití programů **ANSCYS FX** nebo **STAR-CD**. Dále je důležitá termická analýza a tepelná roztažnost jednotlivých materiálů.

3.1 VYHODNOCENÍ PŮVODNÍHO SYMETRICKÉHO MODELU

Pro první model bylo nutné naparametrizovat pouze dvě křivky, neboť se jedná o symetrické sběrné výfukové potrubí. Proto jsou zde zavedena pouze dvě čidla měření délek (viz Obr. 27).

Na modelu (viz Obr. 27) jsou zvýrazněné délky jednotlivých svodů. Kolena potrubí byla vybírána z katalogů nerezových trubek firem ITALINOX a internetového katalogu NEREZMATERIAL.

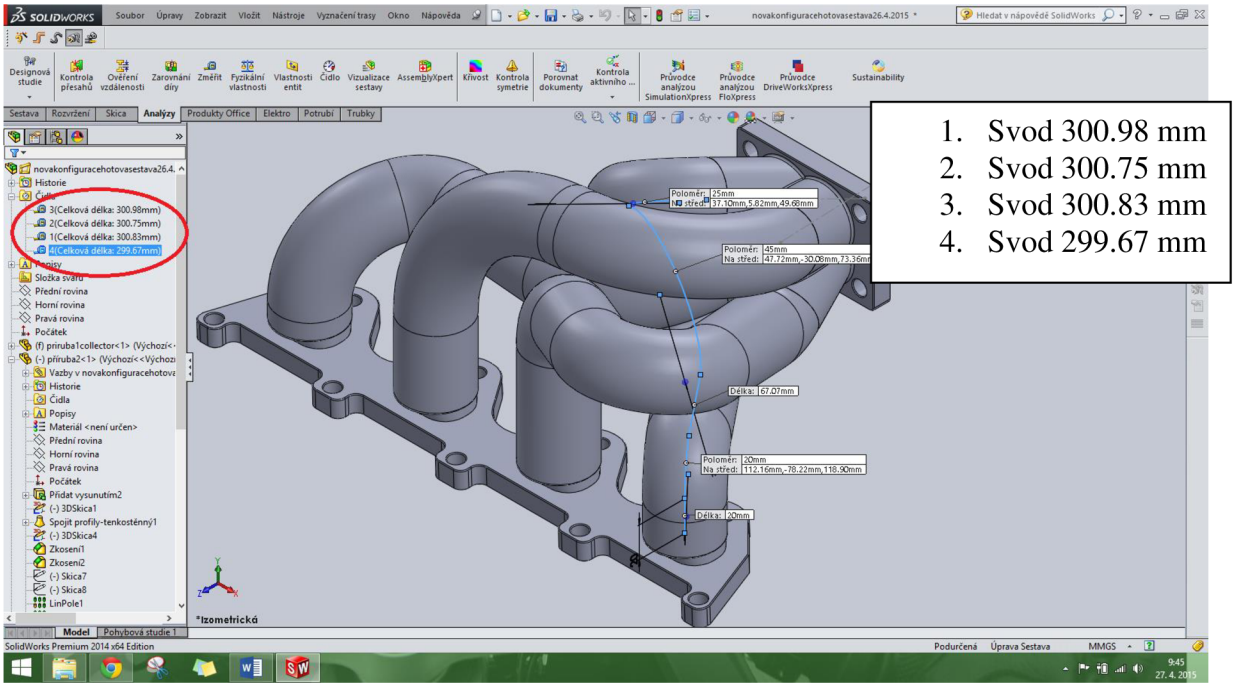


Obr. 27 Délka jednotlivých trubek

3.2 VYHODNOCENÍ ASYMETRICKÉHO MODELU S POSUNUTÝM KOLEKTOREM

Ve druhém modelu není možné využití symetrie. Každá z jednotlivých trubek byla tažena individuálně a tudíž je potřeba zavádět čidla čtyři (Obr. 28).

Konstrukční složitost tohoto řešení vyžaduje o tři kolena více a celkově se náročnost a cena výroby zvýší. Kolena potrubí byla také vybírána z katalogů firem ITALINOX a NEREZMATERIAL.



Obr. 28 Délky jednotlivých trubek

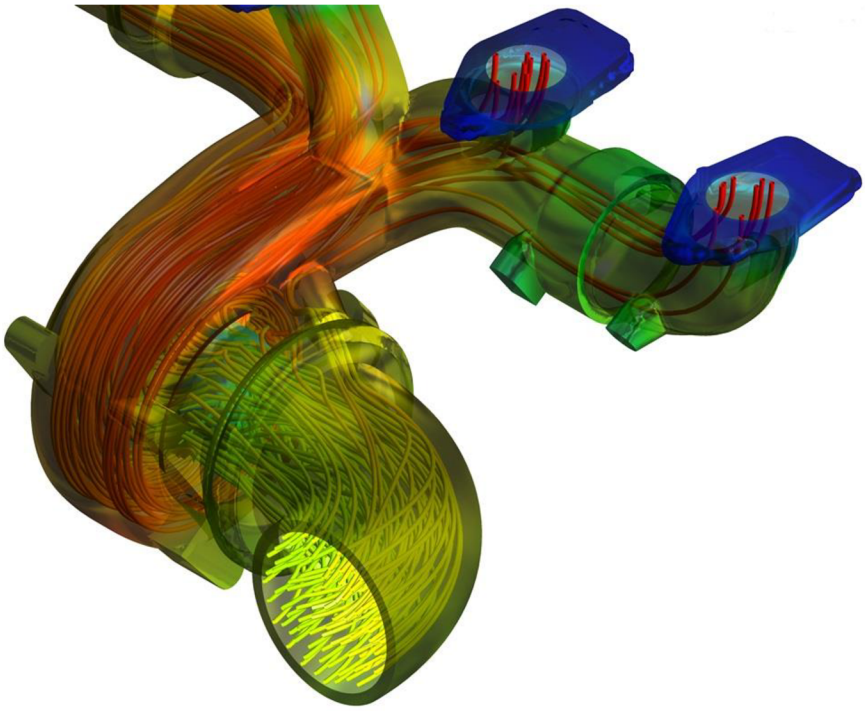
3.3 VHODNOST POUŽITÍ PARAMETRICKÉHO MODELU PRO DALŠÍ ANALÝZY

Pro další analýzy parametrického modelu jsou vhodné tzv. „Computational Fluid Dynamics“ programy (dále jen „CFD“). Čtyři CFD systémy jsou popsány níže a pro další pokračování práce by bylo zajímavé se zabývat takovýmito analýzami a simulacemi pro výfukové svody.

ANSYS CFX

Jedná se o jeden z nejlepších technologických softwarů pro analýzy modelu a je vhodný pro všechny úrovně CFD analýzy (viz Obr. 29). Pomocí softwaru ANSYS DesignModeler ANSYS CFX pracuje přímo s CAD balíčkem. Platforma ANSYS Workbench se používá ve všech fázích CFD simulace a zajišťuje konzistenci, stálost vlastností a vhodný pracovní tok. Při práci s ANSYS CFX je nutné pro procesní nastavení vycházet z fyzikálních principů. Post-processing neboli následné zpracování obsahuje grafy, pevná čísla a animace. ANSYS CFX také poskytuje volně dostupný 3D prohlížeč pro sdílení 3D modelů. Kromě toho ANSYS CFX softwarová sada obsahuje špičkový CFD řešících schopností, kde používá jedinečný více

mřížkový lineární „solver“ a zejména paralelní lineární rozlišení a přístup k širokému spektru modelů, které poskytují přesné srovnání s výsledky v reálném světě. Do ANSYS CFX je jednoduché přidat další funkce rozšířit tím stávající produkty nastavení a také díky nejspolehlivější a nejpřesnější CFD technologii je možné tento software použít pro prakticky každou problematiku ve fluidním inženýrství [18].



Obr. 29 Vizualizace v programu ANSYS CFX [16]

FLUENT

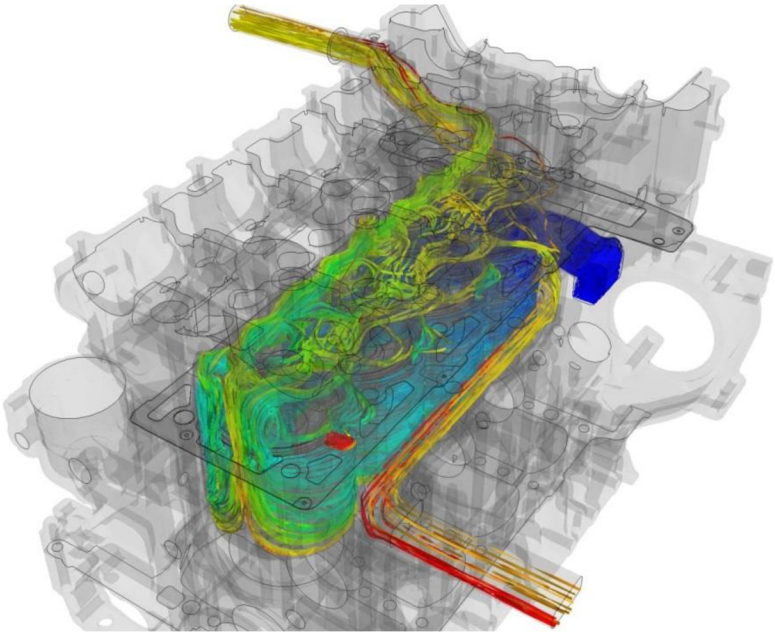
Jedná se o další software pro CFD analýzy, ale nyní je v praxi nahrazen platformou Ansys Workbench. Široké fyzikální schopnosti modelování FLUENTu byly používány pro průmyslové aplikace od proudění vzduchu přes křídlo letadla, spalování v peci, bublinkové sloupce pro výrobu skla, toku krve, výrobu polovodičů až po čistírny odpadních vod. Schopnost softwaru modelovat vnitřní prostory motoru, aero-akustiku, turbodmychadla a vícefázové systémy vedly k rozšíření využití tohoto softwaru [18].

ANSYS ICEM CFD

ANSYS ICEM CFD software umožňuje přechod mezi CAD modelem a síťovanou strukturou modelu pro další analýzy. Díky němu je možné spolehlivě zachytit vygenerovanou síť a následně ji upravovat. Na závěr lze použít velkou řadu „solverů“ pro výstupy a post-processing. Jedná se i o jediný univerzální pre-processor pro CFD analýzy včetně dalších aplikací jako je doprava částic a výpočetní elektromagnetismu. Používá se pro inženýrské aplikace jako například pro výpočet dynamiky kapalin a strukturální analýzy. Nástroje pro generování sítě ANSYS ICEM CFD umožňují parametricky vytvářet mřížku z geometrie strukturovaných multibloků, nestrukturovaných šestihranů či čtyřhranů, hybridních sítí stávajících se také bu

ď z šestihranných, čtyřhranných, pyramidálních či prizmatických buněk. Kartézský síťový formát je zde v kombinaci s okrajovými podmínkami [18].
Hlavní výhodou tedy tohoto švýcarského systému je poskytnutí celé řady flexibilních nástrojů k tvoření mřížky, které mohou generovat libovolný typ sítě na jakýkoliv typ geometrie pro různá řešení nebo aplikace [18].

STAR-CD
Je jedním z nejúčinnějších numerických metod dostupných pro průmyslové řešení CFD kódů s nejvyšší možnou přesností nestrukturovaných sítí. To je umožněno díky rychlosti, efektivitě a přesnosti, které jsou nezbytnými požadavky při tvorbě inženýrského návrhu. STAR-CD systém využívá vlastní numerické postupy a schémata k dosažení nejvyšší přesnosti jak pro stabilní, tak pro tranzitní simulaci, a tím se tento software stal nejméně citlivým a závislým na typu a kvalitě sítě a také na odchylkách a poruchách tetraedrální sítě. Je velmi zajímavé, že tímto nedošlo ke ztrátě účinnosti nebo k snížení přesnosti řešení. Takže bez ohledu na výběr sítí nebo inženýrské aplikace bude tento systém poskytovat nejlepší řešení, a to i v co nejkratším čase. Zvláštním znakem STAR-CD je jeho rychlá výkonnost pro přechodné proudění. Jako první program zavedl pohybující se sítě do CFD kódu, a v této oblasti CFD analýz je stále bez konkurence. Sítě se mohou nejen pohybovat a deformovat, ale také mohou přecházet přes odpovídající rozhraní. Navíc i vybrané buňky nebo buněčné oblasti mohou být vymazány nebo přidány, odděleny a znovu připojeny k jádru modelu [18]. Vizualizace v systému STAR-CD je na Obr. 30.



Obr. 30 Vizualizace v programu STAR-CD [17]

Oba parametrické modely vytvořené v této práci jsou vhodné pro výše představené CFD analýzy. Použití jednoho z uvedených CFD softwarů pro celkovou analýzu modelů by bylo velmi zajímavé pro další pokračování studie výfukového sběrného potrubí.

ZÁVĚR

Popis různých konstrukčních řešení výfukových sběrných potrubí byl prvním cílem této práce. Odvod spalin z válce lze řešit několika způsoby, a to individuálním odvodem z každého válce, integrovaným svodem v hlavě válců nebo odvodem spalin sběrným potrubím, který je nejpoužívanější způsob řešení odvodu spalin. Proto se tato práce zabývá především různými konstrukčními řešeními výfukových sběrných potrubí. V této části jsou také zahrnuty základní předpoklady hydrodynamiky a termodynamiky pro další nezbytné analýzy.

Hlavním cílem této práce bylo seznámení se s parametrizováním výfukového svodu u přeplňovaného motoru. Byly vytvořeny dvě konfigurace umístění turbodmychadla. Základním požadavkem byla konstantní délka jednotlivých trubek a dodržení minimální vzdálenosti mezi trubkami. V prvním případě se jednalo o jednoduchý a konstrukčně přijatelnější způsob řešení této problematiky, neboť vzdálenost kolektoru od vyústění z válců byla díky symetrii vždy pro dvě vyústění stejná. V druhém případě byla pozice turbodmychadla přemístěna ve vodorovné ose o 82,5 mm, čímž bylo složitější dodržet konstantní délku jednotlivých potrubí z vyústění do kolektoru. Bylo nutno využít velkého množství kolen a v neposlední řadě i svarů. Dodržení konstantních délek bylo v tomto případě mnohonásobně náročnější, avšak pro obě řešení byl tento základní požadavek splněn. Pro výrobu je vhodnější původní model s umístěným turbodmychadlem v ose, neboť se při jeho výrobě ušetří tři kolena, 330 mm délky přímých trubek a 1000 mm délky ke svařování. A proto z hlediska nároků na výrobu a složitosti konstrukčního řešení se opravdu jedná o vhodnější variantu. Co se týče vhodnosti modelů pro další možné analýzy, tak oba modely splňují požadavky pro CFD analýzy, a proto by bylo zajímavé pomocí nich také porovnat rozdíly mezi vytvořenými modely.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] CHLÍBEK, L. *Návrh výfukového potrubí pro vůz Formule SAE.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 73 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. David Svída, Ph.D.

[2] PÍŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů*. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991

[3] HEISLER, H. *Advanced Engine Technology*. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2

[4] SVÍDA, D. *Návrh rozměrů vysoko-výkonných zážehových atmosférických motorů* - na základě práce Gordon P. Blair. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[5] HORNÍČEK, D. *Analýza proudění výfukových plynů tlumičem výfuku: Diplomová práce* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2013. 117 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Maloch, CSc. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24522/horn%C3%AD%C4%8Dek_2013_dp.pdf?sequence=1

[6] SOLDÁT, R. *Sortiment grafitických litin v konstrukci automobilu: Bakalářská práce.* Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2011. 64 s. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D. [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: https://dspace.upce.cz/bitstream/10195/42402/2/Sold%C3%A1tR_SortimentGrafitick%C3%BDch_ES_2012.pdf

[7] *Konstrukční oceli pro práci za zvýšení teplot: Seminární práce*. Praha: Vysoké učení technické, Materiály a technologie, 2004 – 2005. [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.scritub.com/limba/ceha-slovaca/Konstrukn-oceli-pro-prci-za-zv74444.php

[8] *Hodnoty oceli pro práci za zvýšení teplot: Seminární práce*. Praha: Vysoké učení technické, Materiály a technologie, 2004 – 2005. [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.scritub.com/limba/ceha-slovaca/Konstrukn-oceli-pro-prci-za-zv74444.php

[9] SHAUER, P. *Hydrodynamika:* Interní materiál FAST VUT, Brno [online]. 2006 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/hydrodynamika.pdf

[10] SAJDL, J. *TSI (Twincharged Stratified Injection)* [online]. [cit. 2015-05-03]. Autolexicon.net – web site. 2013. Dostupné z: http://www.autolexicon.net/cs/articles/tsi-twincharger- stratified-injection/

[11] *Banks Sidewinder Top Diesel Dragster:* Banks power [online]. 2014. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.bankspower.com/topdieseldragster/

[12] *Akrapovic - official web* [online]. 2014. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.akrapovic-foundry.com/technology.html

[13] *Proudění v potrubí.* Praha: České vysoké učení technické [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf

[14] NOVOSAD, Z. *Sací potrubí zážehového závodního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 67 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Svída, Ph.D.

[15] *Konvekce.* Solidworks, IDH_Analysis_Background_Convection [online]. [cit.2015-03-01]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2012/czech/SolidWorks/cworks/IDH_Analysis_Background_Convection.htm?format=P

[16] ANSYS – oficiální web [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX

[17] *The simulation solution of choice for Internal Combustion Engine development: CD-adapco* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.cd-adapco.com/products/star-cd%C2%AE

[18] KUBIAK, K. *List of CFD simulation software and numerical tools: CFD Simulation codes* [online]. 2011 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.blog.kubiak.co.uk/post/81

[19] *Výfukové systémy: HOKCAR* [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.hokcar.cz/sortiment/vyfukove-systemy/

[20] WALKER, M. *Formula 1 Racing Technology – KERS and Exhaust Systems: Racing Technology* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://www.exhaustvideos.com/2049/formula-1-technology-exhaust-kers/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m·s^{-2}]	vnější zrychlení
a_e	[m·s^{-1}]	rychlost zvuku ve vzduchu
A_{vstup}	[mm^2]	plocha kolektoru
$A_{výstup}$	[mm^2]	plocha vstupního potrubí
d	[mm]	charakteristický rozměr potrubí
d_{ep}	[mm]	průměr vstupního potrubí
d_{tp}	[mm]	průměr kolektorov0ho potrubí
CAD	[-]	Cumputer Aided Design
CFD	[-]	Computational Fluid Dynamic
C_{kol}	[-]	poměr ploch kolektoru a vúsťujícího potrubí
g	[m·s^{-1}]	gravitační konstanta
h	[m]	vztažná výška hladiny
Le	[mm]	délka výfukového potrubí pro část potrubí ventil/kolektor
Ltr	[mm]	délka výfukového potrubí pro část potrubí kolektor/konec systému
N	[min^{-1}]	otáčky motoru
n	[-]	počet vstupních potrubí
p	[Pa]	tlak
o	[mm]	obvod
Q_A	[-]	pohltivost záření
Q_D	[-]	propustnost záření
Q_m	[J]	hmotnostní průtok
Q_R	[-]	odrazivost záření
R	[J·K^{-1}·mol^{-1}]	plynová konstanta
r	[mm]	poloměr kruhu
R30	[mm]	rádius 30 mm
S	[m^2]	průřez potrubí
T	[K]	teplota
t	[s]	čas
TSI	[-]	Twincharged Stratified Injection
T_{s1}	[°C]	teplota na vnitřní stěně systému
T_{s2}	[°C]	teplota na vnější stěně systému
T_{t1}	[°C]	teplota uvnitř systému

T_{t2}	[°C]	teplota vně systému
V	[m.s^{-1}]	vektorové pole rychlosti
v	[m.s^{-1}]	rychlost tekutiny/proudění
X	[m]	tloušťka stěny
$\alpha 1$	[-]	vlastnost prostředí uvnitř
$\alpha 2$	[-]	vlastnost prostředí venku
γ	[-]	adiabatický koeficient
λ	[-]	vlastnost materiálu
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg.m^{-3}]	hustota tekutiny
θ_r	[°]	perioda
θ_{tr}	[°]	perioda