

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T013 Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Numerický a empirický výpočet průtočného množství páry při profuku
potrubí

Autor: **Bc. Patrik Růžička**
Vedoucí práce: **Ing. Michal Volf**
Odborný konzultant: **Doc. Ing. Michal HOZNEDL, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Růžička	Jméno Patrik	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Volf	Jméno Michal	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Numerický a empirický výpočet průtočného množství páry při profuku potrubí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	64	GRAFICKÁ ČÁST	35
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá možností aplikace teorie adiabatického proudění v přímém potrubí konstantního průřezu (Fannova proudění) pro získávání hodnot proudění v praktických případech profukování potrubních tras parou. Byly popsány parní profuky, teorie Fannova proudění a analytické výsledky porovnány s výsledky numerických simulací čtyř imaginárních a jedné reálné geometrie potrubní trasy.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Parní profuky, profukování parou, Fannovo proudění, CFD, Fluent, Ansys, numerická simulace</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Růžička	Name Patrik	
FIELD OF STUDY	N2301 “ Department of Power System Engineering“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Volf	Name Michal	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Numerical and Empirical Calculation of Steam Flow Rate During Pipeline Blowing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	64	GRAPHICAL PART	35
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis deals with the application of theory of adiabatic flow in strait pipe with constant diameter (Fanno flow) for acquirment of the flow values in real pipelines during steam blowing. The theory of steam blowing and Fanno flow was described. Analytical results and the results of numerical simulation on four imaginary and one real pipeline were compared and rated.
KEY WORDS	Steam Blowing, Steam Blowout, Fanno Flow, CFD, Fluent, Ansys, Numerical simulation

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Popis parních profuků a zásady pro vyhodnocení parního profuku.....	11
2.1. Využití parního profukování	11
2.2. Trasy pro profukování parou	11
2.2.1. Vysokotlaká trasa (High Pressure – HP).....	11
2.2.2. Trasa nízkoteplotního ohřevu pro profukování parou (Cold Reheat – CR).....	12
2.2.3. Trasa vysokoteplotního ohřevu (Hot Reheat – HR).....	13
2.3. Kontinuálního a pulzačního profukování parou	15
2.4. Vypouštění páry při profukování.....	15
2.4.1. Vypouštění páry do atmosféry	15
2.4.2. Vypouštění páry do objemu vody	15
2.4.3. Vypouštění páry do kondenzátoru.....	15
2.5. Redukce hluku	16
2.5.1. Tlumiče hluku	17
2.5.2. Kondenzátory	17
2.5.3. Vstřikování vody do proudu páry.....	17
2.5.4. Vypouštění páry do objemu vody	18
2.6. Kritéria přijetí pro zákazníka	18
2.6.1. Kontrolní deska	19
2.6.2. Rychlost proudění	20
2.6.3. Kvalita vody při procesu profukování parou.....	21
2.6.4. Výsledky procesu čištění a kontrola.....	21
2.6.5. Celkové porovnání metody kontinuálního a pulzačního profukování parou	22
3. Adiabatické proudění v potrubí s uvažováním tření	24
3.1. Proudění v potrubí konstantního průřezu (7) (8).....	25
3.2. Variace součinitele tření (7) (8).....	34
4. Aplikace Fannova proudění	35
5. CFD.....	40
5.1. Analýza výpočetní sítě.....	40
5.2. CFD analýza proudění v přímém potrubí konstantního průřezu při podmínkách profuku – Varianta 1	43
5.3. CFD analýza proudění v zahnutém potrubí konstantního průřezu při podmínkách profuku – Varianta 2.....	47
5.4. CFD analýza proudění v přímém potrubí rozšiřujícího se průřezu při podmínkách profuku – Varianta 3.....	54

5.5. CFD analýza proudění v přímém potrubí rozšiřujícího a zužujícího se průřezu při podmínkách profuku – Varianta 4	60
5.6. CFD analýza proudění v reálné trase parního profuku.....	66
6. Porovnání výsledků zjištěných pomocí CFD a pomocí analytického modelu proudění ..	71
7. Závěr a doporučení.....	78
Seznam použitých zdrojů	80
Seznam obrázků	81
Seznam tabulek	82
Seznam grafů.....	82

Seznam použitých veličin

Značka veličiny	Jednotka veličiny	Název veličiny
A	$[m^2]$	plocha
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita při konstantním tlaku
c_v	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita při konstantním objemu
K	$[-]$	distribuční faktor
\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní průtok
M	$[-]$	Machovo číslo
O	$[m]$	obvod
p	$[Pa]$	tlak
R	$[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
T	$[K]$	teplota
v	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	měrný objem
w	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění
x, y, z	$[m]$	souřadnice
ϵ	$[m]$	drsnost povrchu
η	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	dynamická viskozita
κ	$[-]$	Poissonova konstanta
τ_w	$[Pa]$	smykové tření na stěně

1. Úvod

Spotřeba energie se zvyšuje po celém světě a z toho důvodu je potřeba neustále zlepšovat účinnost stávajících zdrojů energie nebo výstavbu nových energetických zařízení pro uspokojení poptávky po energii. Energetická zařízení pracují na přeměně tzv. surové energie, která je např. chemicky vázána v nerostech nebo energii slunečního záření na energii tzv. ušlechtilou, kterou se rozumí elektrická energie. Při této přeměně je v mnoha případech využívána voda, případně pára, která zastává funkci přenosného média a např. tepelnou energii, která byla uvolněna chemickou reakcí z energetického zdroje přeměňuje na kinetickou energii, kterou působí na parní turbínu, kde dochází k přeměně kinetické energie na mechanickou a ta se dále v generátoru přeměňuje na energii elektrickou. Důležitá je čistota celého zařízení na přeměnu energie, a hlavně tedy páry, aby nebyla poškozena parní turbína. Při výstavbě nových energetických zařízení nebo modernizaci stávajících zařízení však dochází k znečištění potrubních tras pro proudění páry a případné nečistoty unášené proudem mohou způsobit poškození až zničení parní turbíny. Z tohoto důvodu je nutné provádět čištění potrubních tras před uvedením do provozu tzv. profukou páry (Steam Blowing). Problémem při této operaci je z důvodu provizorních potrubních tras nebo příliš vysoké ceny měření parametrů páry znám pouze stav v hlavním parním kolektoru před vstupem do potrubní trasy a následně až parametry atmosféry na výstupu z potrubní trasy.

Cílem práce bylo vyhodnocení možnosti použití teorie stlačitelného proudění v adiabatickém přímém potrubí s konstantním průměrem pro získání představy parametrů proudění páry po celé délce potrubní trasy

Diplomová práce byla vypracována ve spolupráci s firmou Doosan Škoda Power. Celkově byla práce rozdělena do dvou hlavních částí.

V první části práce byla popisována teorie parních profuků a analytické odvození pro vypočítávání parametrů po délce potrubí při znalosti vstupních a výstupních hodnot tlaku a teploty pomocí teorie adiabatického proudění v přímém potrubí konstantního průřezu. Dále byl proveden analytický výpočet pro délku teoretických potrubních tras a reálné potrubní trasy pro pozdější zhodnocení a porovnání výsledků.

V druhé části diplomové práce byly provedeny numerické simulace v prostředí ANSYS Inc. celkem na čtyřech teoretických geometriích potrubní trasy a jedné reálné geometrii potrubní trasy získané z praktického případu od firmy Doosan Škoda Power. První čtyři geometrie byly vytvořeny pro posouzení jednotlivých částí potrubní trasy, které se mohou vyskytovat v praktickém případě. První geometrie byla vytvořena čistě v souladu s geometrickými předpoklady pro analytický výpočet za účelem porovnání výsledků parametrů proudění pro analytický a numerický výpočet. Následující geometrie byly vytvořeny s tvarovými změnami po délce potrubní trasy jako zakřivení neboli ohyb, dále rozšíření průměru potrubní trasy ve směru proudění a také zúžení potrubní trasy ve směru proudění. Poslední geometrie pro reálnou potrubní trasu byla vytvořena dle přiloženého výkresu. Výsledky všech numerických variant byly v případě stejné délky potrubní trasy porovnány s ostatními simulacemi a analytickým výpočtem anebo v případě ojedinělé délky potrubní trasy pouze s analytickým výpočtem. Na závěr práce je zhodnoceno, zda a pro jaké případy lze na základě numerických simulací teoretický výpočet použít.

2. Popis parních profuků a zásady pro vyhodnocení parního profuku

2.1. Využití parního profukování

Při výstavbě, servisu a opravách parních generátorů a potrubních tras i přes udržování čistoty není zcela možné zabránit vniknutí cizích těles do systému. Mimo cizí tělesa se na vnitřní straně důležitých částí vytváří korozivní produkty a oxidační vrstvy v důsledku tepelných úprav materiálu jako například přehřívání či žhání. Parní turbína by měla být chráněna parními sítí, která jsou umístěna před rychlozávěrnými ventily, proti vniknutí velkých pevných částic (větších jak 5 mm), a tudíž zabránit poškození parní turbíny. Síta však nedokáží zabránit proniknutí velkých kovových částic, které procházejí skrz síto a poškozují nejen síto, ale následně i součásti parní turbíny. V případě zanesení ochranných sít menšími částicemi, které nedokáží síto protrhnout, vzniká velký tlakový gradient a hrozí nebezpečí protrhnutí síta a vniknutí nečistot do parní turbíny a způsobení škod. V případě příliš malých částic nehrají již síta žádnou roli, protože částičky projdou skrz síto. (1)

V turbíně v přítomnosti nežádoucích částic v proudu páry dochází k abrazi povrchu a jeho zdršňování, opotřebování materiálu a změně průtočných kanálů mezi lopatkami turbíny deformací jednotlivých profilů lopatek. Může dojít i k poškození parních ucpávek a destrukci těsnících elementů ložisek turbíny. Před uvedením turbíny do provozu jsou potrubní trasy a parogenerátor vyčištěny proudem páry při profukování parou (Steam Blowing) pro zamezení jakéhokoliv poškození a bezproblémového chodu parní turbíny. Rychlost páry při profukování, která se pohybuje v rozmezí hodnot Machova čísla $M = 0,5 \div 1$, závisí na typu a dispozici zařízení a potrubních tras a měla by být volena s ohledem na faktor rozložení proudu K (Kapitola 2.6.2). K dosažení stanovených cílů se operace profukování parou rozděluje na dvě hlavní části. (1)

V první části je odstraňováno množství volných částic jako rzi, vodního kamene, písku a dalších velkých cizích předmětů velkými rychlostmi proudící páry. V druhé části působením tepelného šoku je odstraňováno množství usazenin. V důsledku rozdílných teplot, přibližně dosahováno rozdílu až 350 °C, dochází k odlupování adhezní vrstvy oxidu, neboť materiál potrubních tras a ostatních zařízení vykazuje jiné hodnoty tepelné roztažnosti než oxidy těchto kovů. Pro dosažení dostatečného napětí teplotním rozdílem a následné odstranění je nutná redukce teploty tlustostěnných komponentů (parní buben, kolektor páry) na hodnoty kolem 100°C. Snížení teploty může být opominuto v případě dostatečného odstranění usazených vrstev například chemickým nebo mechanickým čištěním. Operace profukování parou je velmi časově náročná, obvykle se pohybuje v řádech hodin až dnů. (1)

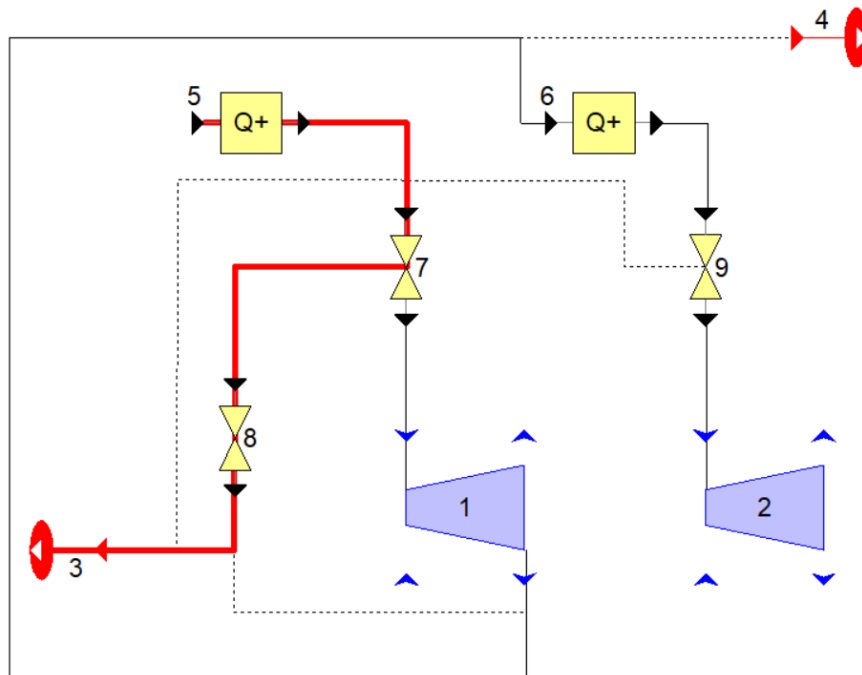
2.2. Trasy pro profukování parou

Základní způsob profukování je stejný u různých typů kotlů, avšak s variacemi z důvodu různých odlišností v konstrukci kotle. Trasy profukování jsou určeny procesem spouštění a závisí na typu elektrárny, velikosti kotle a konfiguraci parního potrubí. Typicky se jedná o tři potrubní trasy profukování oddělené podle tlaku páry při operaci - vysokotlaká trasa, trasa nízkoteplotního ohřevu a trasa vysokoteplotního ohřevu (2)

2.2.1. Vysokotlaká trasa (High Pressure – HP)

Jedná se o hlavní potrubní trasu profukování u průtočných kotlů stejně tak u menších kotlů, kotlů s cirkulující fluidní vrstvou, jednoduché parní generátory s rekuperací tepla a práškové kotly s menším výkonem (přibližně do 100MW).

Obvyklé uspořádání je patrné z Obr. 1: Vysokotlaký přehřívák (High Pressure Superheater – hlavní parní kolektor (Main Steam Header) – vysokotlaký záchytný ventil (High Pressure Stop Valve) před vstupem do turbíny – dočasná potrubní trasa pro profukování potrubí společně s ventilem – tlumič profuku do atmosféry (2)



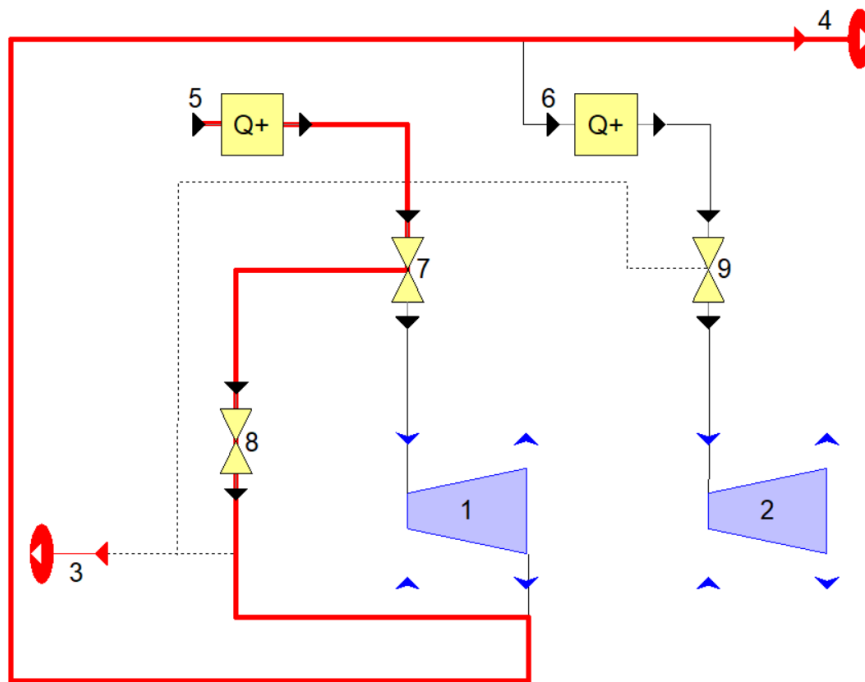
Obr. 1 Vysokotlaká trasa pro profukování parou

- Kde: č.1 – Vysokotlaká parní turbína
č.2 – Středotlaká/Nízkotlaká parní turbína
č.3, č.4 – Tlumič hluku do atmosféry
č.5 – Vysokotlaký přehřívák
č.6 – Přehřívák páry
č.7 – Vysokotlaký záchytný ventil
č.8 – Ventil na dočasné potrubní trase
č.9 – Středotlaký/Nízkotlaký záchytný ventil

2.2.2. Trasa nízkoteplotního ohřevu pro profukování parou (Cold Reheat – CR)

Jedná se o trasu profukování u větších kotlů typu fluidního, plynového a kotle používající metodu zplyňování uhlí a velké spalínové kotle (přibližně nad 100 MW) (HRSG – Heat Recovery Steam Generator). Profukování této trasy zabraňuje suti a ostatním pozůstatkům montáže vstupu do ohříváku kotle.

Obvyklé uspořádání je patrné z Obr. 2: Vysokotlaký přehřívák (High Pressure Superheater – hlavní parní kolektor (Main Steam Header) – vysokotlaký záchytný ventil (High Pressure Stop Valve) před vstupem do turbíny – dočasná potrubní trasa pro profukování potrubí společně s ventilem – přepouštění do trasy studeného ohřevu – před vstupem do přehříváku páry do dočasné potrubní trasy pro profukování – tlumič výstupu profukování do atmosféry. (2)

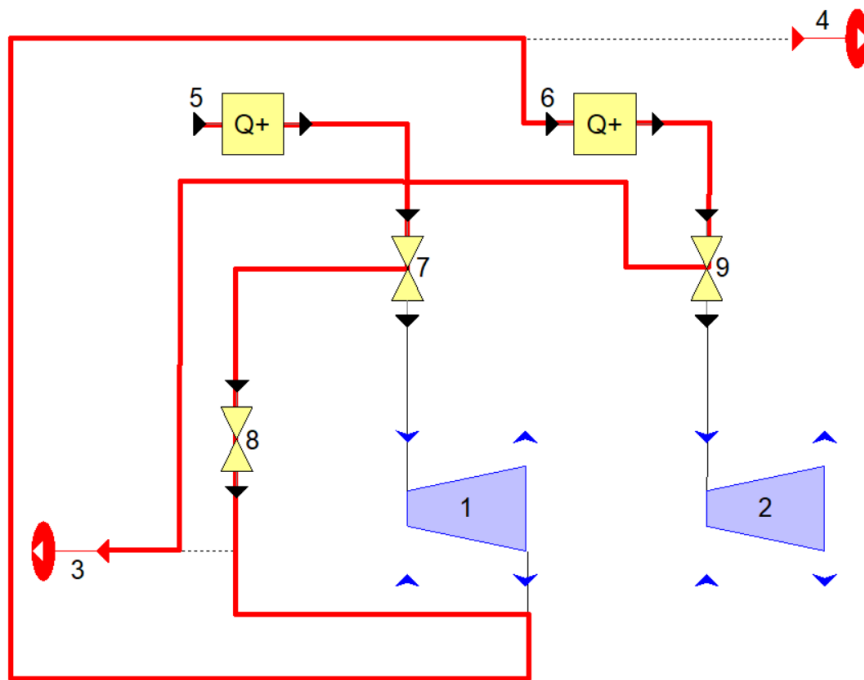


Obr. 2 Trasa nízkoteplotního ohřevu pro profukování parou

- Kde:
- č.1 – Vysokotlaká parní turbína
 - č.2 – Středotlaká/Nízkotlaká parní turbína
 - č.3, č.4 – Tlumič hluku do atmosféry
 - č.5 – Vysokotlaký přehřívák
 - č.6 – Přehřívák páry
 - č.7 – Vysokotlaký záchytný ventil
 - č.8 – Ventil na dočasné potrubní trase
 - č.9 – Středotlaký/Nízkotlaký záchytný ventil

2.2.3. Trasa vysokoteplotního ohřevu (Hot Reheat – HR)

Jedná se o trasu stejného konceptu jako trasa studeného profukování s tím rozdílem, že trasa vede skrz přehřívák a dále poté jak je patrné z Obr. 3: trasa horkého ohřevu – záchytný ventil na horké trase před vstupem páry do středotlakého/nízkotlakého dílu – dočasné potrubní trasy pro profukování – tlumič výstupu profukování do atmosféry.



Obr. 3 Trasa vysokoteplotního ohřevu pro profukování parou

- Kde: č.1 – Vysokotlaká parní turbína
č.2 – Středotlaká/Nízkotlaká parní turbína
č.3, č.4 – Tlumič hluku do atmosféry
č.5 – Vysokotlaký přehřívák
č.6 – Přihřívák páry
č.7 – Vysokotlaký záchytný ventil
č.8 – Ventil na dočasné potrubní trase
č.9 – Středotlaký/Nízkotlaký záchytný ventil

Po úspěšném vyčištění hlavních potrubních tras jsou čištěny ostatní trasy jako přepouštěcí stanice (bypass), středotlaká trasa, nízkotlaká trasa a obslužné trasy dle potřeby. Obecně řečeno jsou hlavní trasy, které musejí být důkladně pročištěny, trasy potřebné k vedení páry k lopatkám turbíny anebo do procesů jako nízkoteplotní a vysokoteplotní přihřívání. V průběhu profukování parních tras stále může docházet k uvolňování nežádoucích těles v potrubí a ty mohou docestovat až k tlumiči výfuku do atmosféry.

V případech komplexnějších kotlů obsahujících vysokotlaké a nízkotlaké parní bubny a několikastupňové přehřívání a přihřívání, musejí být trasy profukování parou a oddíly potrubních tras speciálně upraveny pro potřeby daného případu s ohledem na dovolené operace kotle a konstrukční omezení. Dalším speciálním případem jsou spalínové kotle (HRSG). Složitější konfigurace na profukování parou jsou například konfigurace $2 \times 2 \times 1$ ($A \times B \times C$, A – počet plynových turbín, B – počet spalínových kotlů, C – počet parních turbín), kde je potřeba více potrubních tras než u konfigurace $1 \times 1 \times 1$ a stejně tak u konfigurace $3 \times 3 \times 1$ pro složitost a celkové délky potrubních tras. Odlišný koncept elektráren jako je například elektrárna s nadkritickým blokem, která nepoužívá parní bubny, ale kondenzátní nádrže, je limitována menší zásobou vody oproti elektrárnám s podkritickým blokem. (2)

2.3. Kontinuálního a pulzačního profukování parou

Dva možné způsoby provádění čištění potrubních tras profukováním jsou určeny rozměry kotle, schopností generace páry, potřebného tlaku, teploty, průměry potrubí v potrubní trase a celkovou délkou pročišťované potrubní trasy. Způsoby jsou následující:

1) Kontinuální profukování

Při kontinuálním profukování dochází k počátečnímu navýšení tlaku a teploty v parogenerátoru a ten je následně po otevření ventilu pro profukování potrubní trasy stále udržován po celou dobu operace. Ukončení operace je určeno z vyhodnocování kontrolních desek (podrobněji v kapitole 2.6.1), které jsou umístovány na konec čištěné trasy a kontrolovány po určitých časových intervalech. (3)

2) Pulzační profukování

Při pulzačním profukování je operace prováděna v nárazových vlnách, kde tlak v kotli je zvýšen na předem určenou maximální hodnotu a následně je otevřen ventil na profukované trase. Během této operace je na krátký časový úsek v řádu hodin dosaženo potřebné úrovně čištění nebo potřebné rychlosti páry. V návaznosti na pokles tlaku a teploty musí opět parogenerátor vyprodukovat potřebné množství páry. Tato operace by měla být prováděna přibližně čtyřikrát až šestkrát včetně najíždění a odtavení parogenerátoru, potažmo kotle. Obecně platí pravidlo, že by nemělo docházet k více jak jednomu pulzačnímu profukování denně za účelem adekvátního vychlazení celého systému. (3)

Přehledné porovnání obou metod zobrazuje Tab. 1 (kapitola 2.6.5)

2.4. Vypouštění páry při profukování

Při čištění potrubních tras se pára dále nepoužívá a je vypouštěna ze systému třemi základními způsoby. Ty jsou: Vypouštění čistě do atmosféry, vypouštění do vody nebo vypouštění do kondenzátoru, které jsou podrobněji popsány v následující kapitole.

2.4.1. Vypouštění páry do atmosféry

Vypouštění páry do atmosféry se primárně používá v méně obydlených oblastech z důvodu vysoké hladiny hluku, který je při operaci generován v oblasti elektrárny a jejího okolí. V případě nutnosti snížení hladiny hluku se používají příslušné zařízení a postupy za účelem absorpce hluku, které jsou uvedeny později v kapitole 2.5. (1) (4)

2.4.2. Vypouštění páry do objemu vody

Vypouštění páry je realizováno do objemu vody. Tento způsob je však možné používat pouze s přípuštěním znečištění vody, a to ať už vody z přírodních toků nebo uměle upravené pro účely vypouštění páry. V obou případech je nutné vyšetření dopadů a povolení znečištění vody na základě šetření dopadu znečištění na životní prostředí. (1) (4)

2.4.3. Vypouštění páry do kondenzátoru

Základním požadavkem při vypouštění páry do kondenzátoru je schopnost obejít turbínu, tedy využití přepouštěcí stanice do kondenzátoru, a to pro celý objem proudící páry. Stejně tak přepouštěcí ventily, které odklánějí tok páry od turbíny do potrubní trasy přepouštěcí stanice musí být schopny pojmout zátěž při procesu profukování. V případě využití této metody by pára i s nečistotami vnikala do kondenzátoru a mola by poškodit vnitřní stěny potrubí. Je tedy vhodné provést proplachy kotle a potrubní trasy před kondenzátorem chemikáliemi pro

odstranění velkých nečistot a snížit tak možné poškození kondenzátoru následným profukováním páry na minimum.

Proces se používá jen v případě, kdy předchozí metody není možno realizovat jako například velký nedostatek vody nebo nemožnost znečištění okolních vod, omezení maximální hodnoty hluku nebo omezení ostatními operacemi. Přesto tato metoda disponuje řadou výhod jako jsou: krátké provizorní trasy potrubí pro účely profuku, výrazná úspora času v konstrukci a následné destrukci provizorních potrubních tras, nízká hodnota maximálního hluku při čisticí operaci, minimální ztráta vody z důvodu uzavřeného cyklu a možnost testování důležitých součástí a systému.

Nejen proplachování před operací, ale i v průběhu operace jsou používána opatření na co možná nejvyšší minimalizaci poškození kondenzátoru cizími tělesy. Jedním z možných způsobů je používání nárazových desek, které případná tělesa výrazně zpomalí.

Využívání potrubní trasy přepouštěcí stanice znemožňuje profukování potrubní trasy vedoucí od přepouštěcích ventilů až k regulačním ventilům před turbínou a musí být tedy tato trasa zvlášť kontrolována na cizí předměty a kvalitu provedení svarů případné nedostatky odstraněny. (4)

Profukování parou s vyústěním do kondenzátoru již připomíná normální provoz elektrárny, a tedy mnoho zařízení při procesu je aktivní nebo jsou připraveny pro okamžitý provoz. Mezi tato zařízení patří: zásobování olejem, napájecí systém chladicí vody, ochrany kondenzátoru pro proces přepouštění páry, kondenzátní čerpadla, vývěvy, systém ucpávkové páry a samozřejmě přepouštěcí stanice. (4)

Před započítáním procesu profukování potrubních tras parou by měla být zavedena opatření pro hladký průchod celé operace a zachování všech důležitých částí, pokud možno nepoškozených. V místech trubkových svazků kondenzátoru, kde hrozí nárazy nečistot, je vhodné instalovat již zmíněné ochranné desky. Pro předejetí poškození na straně kondenzátních čerpadel je vhodné instalovat jemná síta, u kterých je nutno vzít v úvahu tlakové ztráty a pro proces profukování parou upravit výkon kondenzátních čerpadel.

Po ukončení procesu profukování potrubních tras parou by měly být provedeny následující operace k úplnému dokončení celé procedury. Jednotlivé operace jsou: vnitřní inspekce kondenzátoru pro zjištění dopadů operace, odstranění dočasných ochranných potrubí, kontrola kondenzátoru na případné úniky chladicí vody, odstranění nečistot v kondenzátoru, náhrada dočasných ventilů za ventily používané při normálním provozu, kontrola a čištění sít kondenzátních čerpadel. (1) (4)

2.5. Redukce hluku

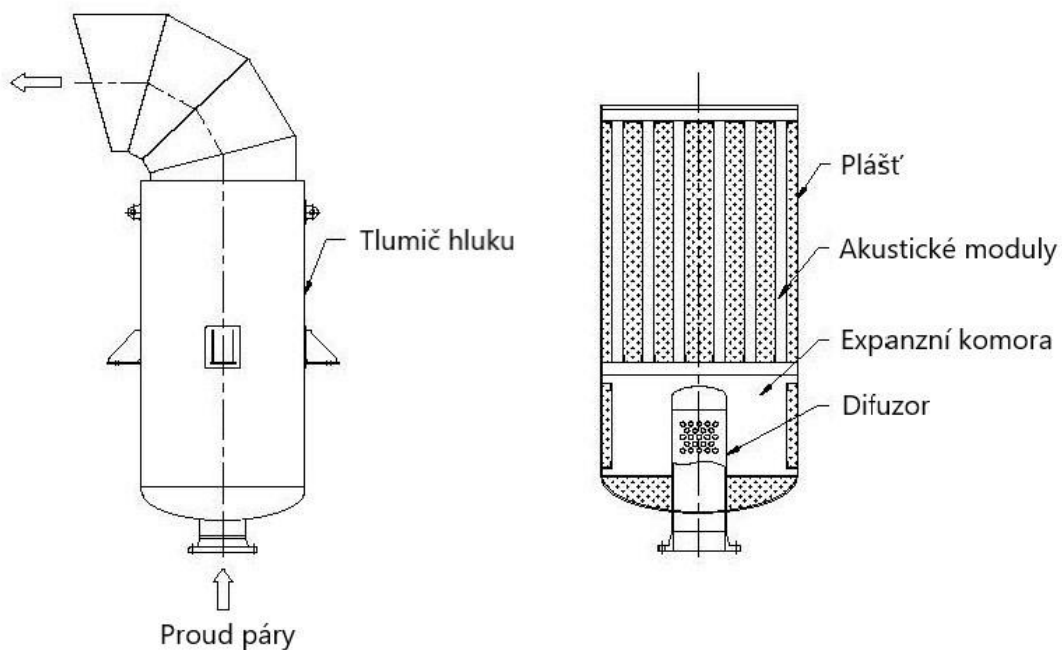
Při vypouštění páry do atmosféry vzniká společně s parní mlhou také velké množství hluku, které je potřeba snížit na akceptovatelnou hladinu. Dosažení nižších hlukových vrstev se docílí zchlazením páry na výstupu nebo absorpcí hluku. Používané přístupy jsou: (1) (4)

- Tlumiče hluku
- Kondenzátor
- Vstřikování vody do proudu páry
- Vypouštění páry do objemu vody

2.5.1. Tlumiče hluku

Tlumiče hluku jsou instalované na výstupu z provizorních potrubních tras a při navrhování designu tlumiče hluku by měl být brán v úvahu čas provozu tohoto dočasného zařízení, který by neměl přesahovat sto hodin provozu z důvodů životnosti tohoto provizorního zařízení. Dalším kritériem pro tlumič hluku je celková tlaková ztráta, která by měla dosahovat co nejnižších hodnot.

Při zvýšené tlakové ztrátě v tlumiči hluku je potřeba navýšit i iniciační tlak, který je dosažen při začátku operace. Z praktických zkušeností je známo, že vyšší tlak, a tedy i rychlost proudění vede k nerovnoměrnosti rozložení rychlostí v potrubních trasách a může mít negativní následek na kvalitu čištění parním profukováním. Z tohoto důvodu je snaha udržení co nejnižšího tlaku, a to převážně pod hranici 3 bar. V případě, že není jiné možnosti, může tlak přesáhnout stanovenou hranici, následně je však nutná kontrola části potrubí, kde rychlost překračovala danou hodnotu a čištění tedy tak nemuselo být vyhovující. (1) (4)



Obr. 4 Vertikální tlumič hluku (5)

2.5.2. Kondenzátory

V tomto případě, kdy je pára vedena přepouštěcí stanicí, není potřeba dalších opatření pro tlumení hluku, neboť kondenzátor již sám působí jako tlumič hluku. (1) (4)

2.5.3. Vstřikování vody do proudu páry

Vstřikování vody do proudu páry lze možno provádět v případě dostatečné zásoby vody a tento proces se vyznačuje málo hlučným až tichým vypouštěním páry do atmosféry. Proces je označován v literatuře také jako tiché parní profukování (silent steam blowing) nebo málo hlučné parní profukování (low-noise blowing).

Při procesu vstřikování vody nejsou použity konvekční tlumiče hluku, ale proud páry je zpomalován přímým vstřikováním vody do proudu páry před koncem provizorní potrubní trasy, což má za následek zpomalení proudu páry a následné snížení hluku při výstupu do atmosféry

bez potřeby dalších tlumičů hluku. Hodnoty dosahované při této metodě normálně nepřekračují 90 dBA.

Ke snížení teploty proudu páry je do potrubní trasy instalován provizorní rozstřikovač vody a hodnoty teploty dosahované za rozstřikem se pohybují okolo 100°C. Pro účely chlazení proudu páry je používána voda bez viditelných nečistot.

Obvykle pracuje generátor páry na třetinový výkon v případě profukování parou s klouzavým tlakem. V kombinovaných cyklech s paroplynovou turbínou se hodnoty výkonu pohybují v mírně vyšších hodnotách. Množství chladicí vody vstřikované do proudu páry představuje na výstupu z potrubních tras až 40 % celkového objemového toku, a proto je vhodné použití separátoru pro separování nejen chladicí vody, ale i zbytkové nečistoty. Voda oddělená v separátoru může být, pokud to okolnosti dovolují, vypouštěna do kanalizačního systému nebo může být opětovně použita pro vstřikování do proudu páry. Před vypouštěním použité vody do kanalizačního systému je nutné dodržet příslušná omezení a vodu předčistit od nepřipustných nečistot a chemických látek. Pára přivedena do separátoru se vypouští přímo do atmosféry.

Celkové množství vstřikované vody se upravuje podle množství proudící páry. Kvůli nízké teplotě a tlaku v místě vstřikování vody a konstrukci může dojít k selhání systému vstřikování, z tohoto důvodu se zavádí druhý totožný systém s vlastním zdrojem vody. Nízké teploty a hodnoty tlaku jsou pouze v částech potrubních tras za místem vstřikování chladicí vody, v ostatních potrubních trasách lze naměřit tyto hodnoty vysoké, a tedy je možné, že bude docházet v průběhu profukování parou v této části k akustickým projevům proudění, jako jsou hluk a akustické vibrace.

Účinnost čištění trvalých potrubních tras je ovlivňována prostředky kotelní jako například pulzačním profukováním parou s šokovými tlakovými vlnami. Charakteristickými rysy tohoto typu operace jsou následující: (1) (4)

Výhody:

- Nízké reakce v provizorních potrubních trasách za místem vstřikování vody
- Redukce hluku až pod hodnotu 90 dB
- Nízký tlak na výstupu umožňuje velkou účinnost čištění a konstantnější rozložení proudu v potrubí
- Nízký tlak na výstupu z potrubní trasy do atmosféry a extrémní redukce teploty v provizorním potrubí v místě vstřiku chladicí vody

Nevýhody:

- Velké rozměry provizorních potrubních tras
- Velká spotřeba vody

2.5.4. Vypouštění páry do objemu vody

Vypouštění páry do objemu vody pro snížení hladiny zvuku je sice možné, v dnešní době však z ekologických důvodů nevýhodné a z hlediska snížení hlučnosti ne příliš účinné řešení. (1) (4)

2.6. Kritéria přijetí pro zákazníka

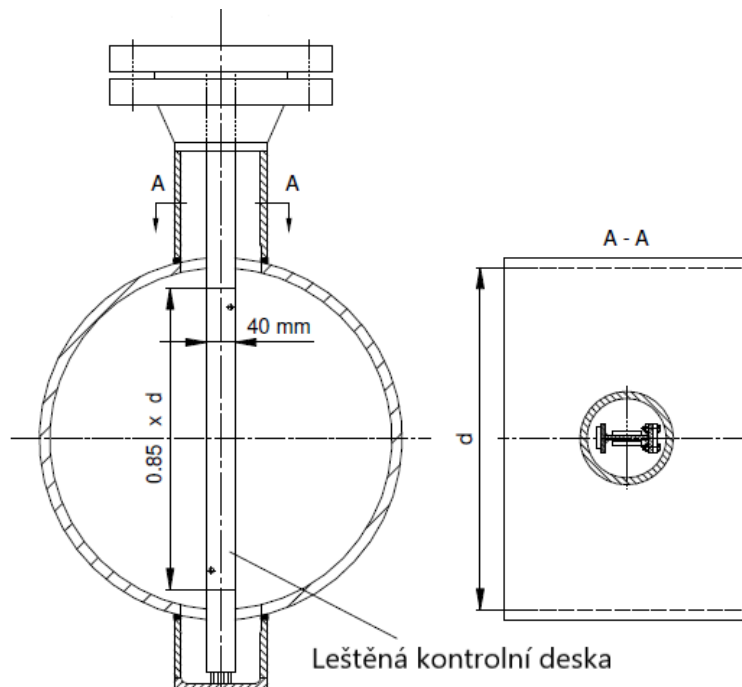
Při čištění potrubních tras profukováním parou existují kritéria pro přijetí zákazníkem, které jsou přímo stanovené dohodou mezi zákazníkem, výrobcem kotle, parní turbíny a dodavatelem návrhu a procesu uvádění do provozu elektrárny. Výrobce kotle a parní turbíny obvykle

poskytují více kritérií pro profukování parou v rámci základní dokumentace. Jsou to především dvě základní kritéria: poměr čistící síly (K faktor) a čistotu kovové desky instalované v proudu páry na konci potrubní trasy pro určení čistoty proudící páry. (3)

2.6.1. Kontrolní deska

2.6.1.1. Rozměry a povrchová úprava

Výsledek nebo stav čistoty potrubí při procesu profukování musí být kontrolován prostřednictvím kontrolní desky skládající se z držícího zařízení, ke kterému je uchycena leštěná nárazová kontrolní deska z uhlíkové oceli. Celé zařízení je vytvořeno s ohledem na snadnou výměnu desky. Mimo uhlíkové oceli je po dohodě možno použití ostatních materiálů jako hliník a měď. Různé materiály budou vykazovat různé opotřebení na konci měření, a proto je nutno stanovit závislost čistoty páry, potažmo čistoty profukovaného potrubí na míře opotřebení konkrétního materiálu. Po ukončení operace profukování parního potrubí je zařízení odstraněno z důvodu zamezení nežádoucích tlakových ztrát, které při proudění v místě měření vznikají. Příklad zařízení s kontrolní deskou je vyobrazen na obrázku (Obr. 5). (1)



Obr. 5 Zařízení s kontrolní deskou

2.6.1.2. Místo instalace kontrolní desky

Při výběru místa umístění kontrolní desky je nutno brát v potaz okrajové podmínky na vstupu do potrubí stejně tak jako rozložení proudu páry v místě měření k zabezpečení rovnoměrnosti rychlosti proudění na kontrolní desku. Výběr je tedy ovlivněn lokálními okolnostmi a nemělo by docházet k umístění kontrolní desky ve směru proudu za ohyby potrubních tras. V těchto místech dochází u hrubých nečistot k působení odstředivé síly a následnému nerovnoměrnému opotřebení kontrolní desky, a tedy i ztrátě možnosti o přesné vyhodnocení účinnosti procesu. Obecně přicházejí v úvahu dvě místa měření a to jsou: (1)

- Instalace kontrolní desky na vstupu do dočasného parního potrubí
- Instalace kontrolní desky na výstupu z hlavního parního potrubí

Instalace kontrolní desky v dočasném parním potrubí

Kontrolní deska by měla být umístěna do vstupní části dočasného potrubí parního profukování, které má být navrženo pro konkrétní rychlost proudění páry. Pozdější kontrolní měření na měřících místech včetně kontrolní desky po demontování provizorních potrubních tras totiž již nejsou proveditelná. (1)

Instalace kontrolní desky v hlavním parním potrubí

Ve výjimečných případech je možnost instalace kontrolní desky přímo na konec parního potrubí před vstupem do turbíny.

Instalace kontrolní desky na výstupu z provizorního potrubí není doporučována z důvodu znečištěné vnitřní strany méně kvalitního potrubí v provizorní části, a tedy nesrovnatelnou kvalitou k systému hlavního parního potrubí. V těchto případech dochází ke zkreslení výsledků na kontrolní desce a dále k nadbytečnému počtu cyklů profukování. Když to ale okolnosti nedovolují, lze upravit vyhodnocování cílové hodnoty měření.

Pozdější kontrolní měření na měřících místech včetně kontrolní desky po demontování provizorních potrubních tras je v tomto případě stále možné. Výhodou může být i demonstrace měření při předávání zákaznickovy. (1)

2.6.2. Rychlost proudění

Zkušenosti prokázaly efektivitu parních profuků pouze při vyšších hodnotách rychlostí páry, než tomu tak je v případě převládajících rychlostech páry při plném zatížení zařízení. Ve většině případů nedovoluje stav zařízení ve fázi při potřebě pročištění parou vytvářet dostatečné množství páry o určitých parametrech, proto se spoléhá na kinetickou energii páry, tedy její rychlost proudění v potrubní trase. Rychlost proudění páry v parním generátoru a přidružených potrubních trasách lze stanovit z poměru hmotnostního toku ku objemovému toku. Výsledný poměr je nazýván K-faktor a zastupuje rychlost proudění média. Vzorec pro stanovení K-faktoru je následující: (3) (1)

$$K = \frac{\dot{m}_P^2 * v_P}{\dot{m}_V^2 * v_V} \quad (2.1)$$

Kde: \dot{m}_B = hmotnostní tok při podmínkách parního profukování
 \dot{m}_V = hmotnostní tok při podmínkách plného zatížení zařízení
 v_B = měrný objem při podmínkách parního profukování
 v_V = měrný objem při podmínkách plného zatížení zařízení

Hmotnostní tok \dot{m}_B [kg/s] při podmínkách parního profuku se stanoví pomocí následujícího vzorce:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_V * \sqrt{\left(\frac{v_V}{v_B}\right) * K} \quad (2.2)$$

Hodnota K-faktoru byla empiricky stanovena a pohybuje se v rozmezí: $K = 1,2 - 1,7$ v závislosti na složitosti potrubní trasy, kde v případě složité a členité trasy se volí vyšší hodnoty koeficientu.

Specifický objem páry lze získat z tabulek páry nebo z diagramů entalpie a teploty s ohledem na tlak a teplotu v daném místě na potrubní trase, často však není tlak a teplota měřena v místě

kontrolní desky, ale pouze v bubnu kotle. Tlak páry při podmínkách parního profukování lze získat v závislosti na typu procesu profukování parou, který by však neměl překročit maximální dovolený tlak v jednotlivých potrubních trasách či zařízeních. Zabránění poškození mokrou parou se provádí přehřátím páry, která by opět neměla přesahovat maximální provozní teplotu v jednotlivých potrubních trasách či zařízeních. Teplota přehřátí záleží na typu zařízení a pohybuje se v hodnotách přehřátí až o 80°C. (3) (1)

2.6.3. Kvalita vody při procesu profukování parou

Kvalita napájecí vody ve fázi profukování parou zpravidla nedosahuje ještě kvality pro provoz zařízení. Profukování parou probíhá za sníženého provozního tlaku oproti tlaku při normálním provozu zařízení za účelem dosažení většího měrného objemu páry s možností rychlých změn tlaku a z tohoto důvodu je zvýšená pravděpodobnost unášení kapiček vody po proudu do přehříváče páry. Voda je v průběhu profukování parou do systému přiváděna po úpravě, a tedy ve stejné kvalitě jako při budoucím normálním provozu zařízení.

Pro všechny doposud zmíněné procesy profukování parou by neměla napájecí voda obsahovat sloučeniny solí jako např: hydroxid sodný, sulfid sodný aj. Alkalizace by měla být prováděna pouze v páře rozpustnými činidly jako amoniak, aminy aj. (6)

2.6.4. Výsledky procesu čištění a kontrola

Správné výsledky operace mohou být dosaženy jen s dodržением všech předchozích předpokladů. Mimo jiné jsou zaznamenávány hodnoty z procesu, a to hodnoty jako:

- Faktor rozložení proudu
- Rychlost proudění páry
- Teplota a tlak páry
- Hmotnostní průtok páry
- Redukce tlaku a počet opakování profukování parou na celou operaci
- Čas chladnutí a teplota stěn nádob a potrubí před dalším profukováním parou

Cizí předměty, které byly operací odstraňovány z parního potrubí narážejí na povrch kontrolní desky a zanechávají tam stopy po nárazu. Počet těchto stop, jejich velikost a tvar slouží k vyhodnocení čistoty potrubí. Profukování parou může být považováno za dokončené při splnění kritérií pro absolutní hodnotu stop nárazů na jednotce plochy kontrolní desky (Kapitola 2.6.4.1). Pro komplexnější vyhodnocení je vhodné použít i pomocné relativní hodnoty stop nárazů (Kapitola 2.6.4.2). (1) (2)

2.6.4.1. Absolutní hodnota stop nárazů na jednotce plochy

Pro získání hodnoty se využívá kontrolní deska o rozměrech 40x40 mm vyrobené nejčastěji z uhlíkové oceli. Pro ostatní materiály se následující hodnoty mohou lišit. V případě uhlíkové oceli však stopy po nárazech cizích těles musejí splňovat následující rozestupy a celkové počty.

- Na kontrolní desce nesmějí být stopy po nárazu větší jak 1 mm
- Na kontrolní desce se nesmí nacházet více jak čtyři stopy po nárazu větších 0,5 mm
- Na kontrolní desce se nesmějí nacházet více jak deset stop po nárazu větších jak 0,2 mm

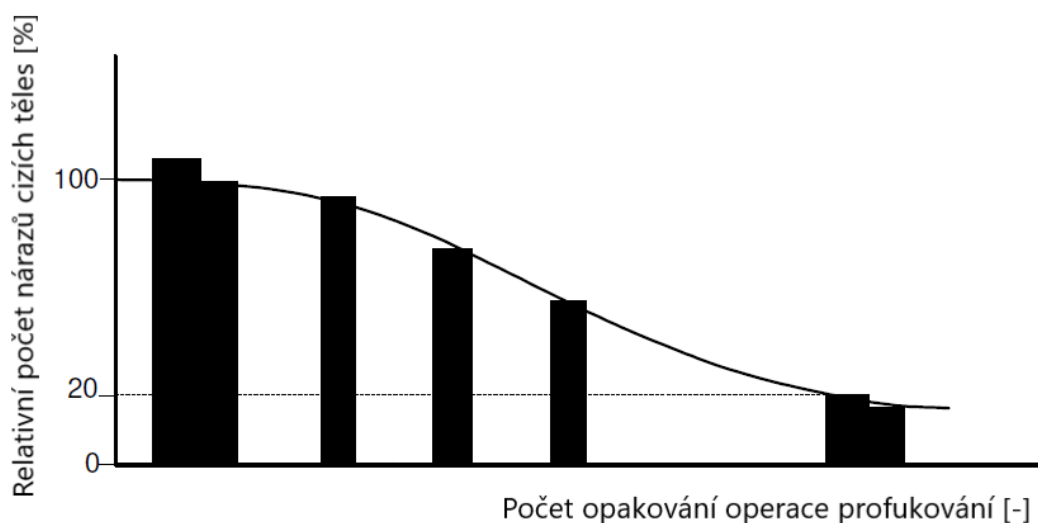
V případě dodržení hodnot jsou výsledky zkoušky čistoty považovány za vyhovující a mohou být uznány jak zákazníkem, tak výrobcem, pokud není dohodnuto jinak. Uvedené hodnoty jsou obecně považovány za bezpečné pro generátor páry, potrubní trasy a parní turbínu. Mimo

vyhodnocení je vhodné zaznamenávat všechny stopy po nárazech pro vyhodnocení zastoupení velikosti cizích těles v parním potrubí, a tedy účinnosti parních profuků v časových intervalech či opakováních. Důležité je zaznamenávání všech dílčích operacích během celé operace a také rozložení stop nárazů cizích těles na kontrolní desce. (1) (2)

2.6.4.2. Relativní hodnota stop nárazů na jednotce plochy

S každým dalším profukováním potrubních tras parou by mělo docházet k postupnému čištění, a tedy redukci počtu cizích těles v proudu páry. V závislosti na použitém způsobu profukování by mělo dojít po skončení celé operace k redukci až na 20 % počtu a velikosti cizích těles při stejných parametrech páry oproti a v žádném případě by nemělo docházet při dalším profukování k zvětšování nebo k nárstu počtu cizích těles v proudu páry. (1) (2)

Relativní pokles cizích těles s počtem operací je pro ilustraci uveden na Obr. 6.



Obr. 6 Počet nárazů cizích těles v závislosti na počtu operací

2.6.4.3. Kontrola čistoty potrubních tras před a po operaci profukování parou

Před operací není nutné v normálních případech zkoumání vzorků potrubí na nečistoty. Vyhodnocení operace se provádí pomocí kontrolní desky instalované v provizorní potrubní trase a ukončení operace a odstranění této provizorní potrubní trasy je nutná dodatečná kontrola v místě připojení na permanentní potrubní trasu. Následující kontroly čištění jsou naplánovány podle výsledků vyhodnocení posledního parního profukování. V případě zachytávání nečistot v permanentním potrubí musejí být zásobníky a filtry vyčištěny, stejně tak potrubní trasy, které nebyly nebo nemohly být čištěny parou z důvodu umístění. (1) (2)

2.6.5. Celkové porovnání metody kontinuálního a pulzačního profukování parou

	Kontinuální profukování parou	Pulzační profukování parou
Opatření pro redukci hluku	Bez výrazné tlakové ztráty Provizorní potrubní trasa malých průměrů	Tlumiče a absorbery zvuku Vysoká tlaková ztráta Provizorní potrubní trasa velkých průměrů
Oblasti uplatnění	- Odstraňování cizích těles a nečistot v parní části kotle - Návrhové zatížení kotle a potrubních tras není překročeno	- Odstraňování cizích těles a nečistot v parní části kotle - Návrhové zatížení kotle a potrubních tras je překročeno

	- Možné použít i při nízkém zatížení kotle	
Proces profukování parou	<p>Kotel je regulován pomocí klouzavého tlaku a pára vystupuje do atmosféry. Tlak páry vychází z tlakových ztrát v systému přehříváku a provizorních potrubních tras. Parametry páry se obvykle pohybují v rozmezí 15-35 bar a teplota páry v rozmezí 480-525 °C na začátku procesu. V průběhu profukování potrubních tras by teplota neměla klesnout pod 480°C. Výkon kotle se pohybuje mezi 20-40 % jmenovitého výkonu a ventily jsou plně otevřené. Proces profukování parou trvá obvykle 4 až 5 dní.</p>	<p>Počáteční operační tlak kotle pro profukování parou na 50 % jmenovitého výkonu. Akumulace tlaku pro pulzační profukování před profukovacím ventilem (čas otevření/zavření maximálně 10 s). Během jednoho dne je možné provést 2-5 pulzních profuků. Zapojování přídavného regulátoru napájecí vody, aby při procesu profukování byla udržena hladina v kotli na viditelné úrovni. Počet parních profuků záleží na úrovni čistoty během výstavby potrubních tras. Čas potřebný pro operaci nelze určit.</p>
Výhody	<p>Přívětivější pro systém z důvodu postupné a jednotné změny teploty a tlaku. Menší spotřeba vody. Hladina vody může být ovlivňována přívodem vody do proudu páry. Hodnoty páry při profukování dovolují použití tenčích stěn a menších průměrů provizorního potrubí. Není potřeba ventilů s rychlým otevíráním/zavíráním.</p>	<p>Hladina hluku může být snížena tlumiči na výstupu do atmosféry. Stálý průměr potrubní trasy. Možnost ušetření vody, která není použita pro zchlazení páry před výstupem do atmosféry.</p>
Nevýhody	<p>Zvýšení průměru potrubí za vstřikováním vody. Vytváření parní mlhy na výstupu do atmosféry.</p>	<p>Ne příliš přívětivé pro systém z důvodu tlakových rázů. Velká spotřeba vody. Provizorní potrubní trasy pro profukování parou mají z důvodu většího namáhání silnější stěny a větší průměry. Ventily s rychlým otevíráním/zavíráním jsou velmi nákladné.</p>

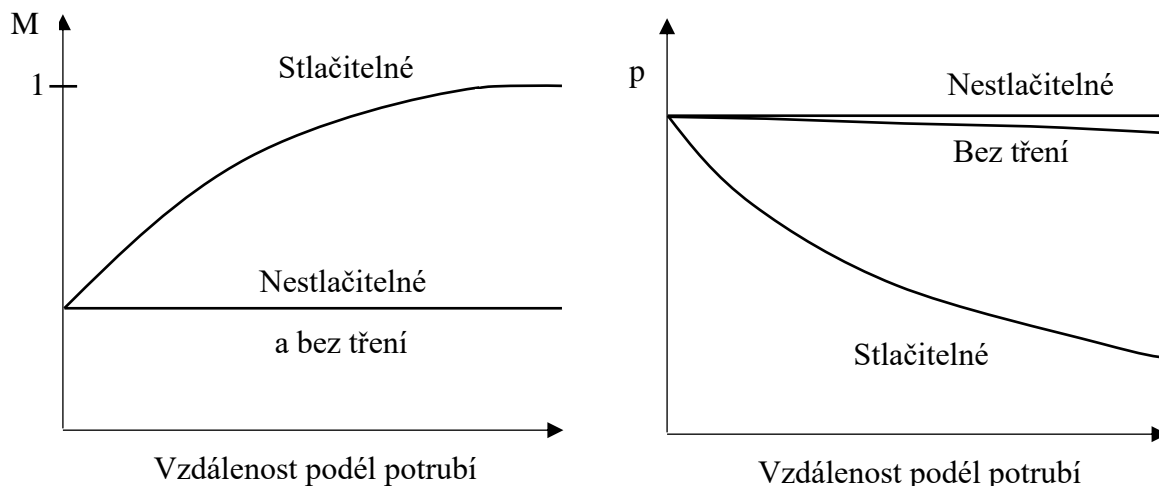
Tab. 1 Porovnání metod kontinuálního a pulzačního profukování parou (3)

3. Adiabatické proudění v potrubí s uvážením tření

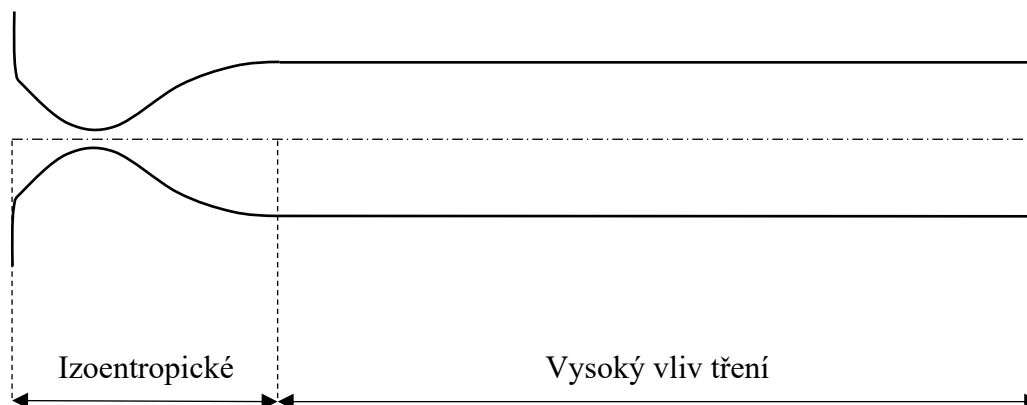
Při analytických výpočtech je v mnoha případech uváženo zanedbání tření při proudění potrubím, které lze adekvátně uvazovat při řešení proudění buď v tryskách nebo potrubí krátkých délek. Při proudění v dlouhých trubkách však již vliv viskozity nelze zanedbat a působení třecích sil na stěny potrubí mohou být i dominantní. Na obrázku (Obr. 7) je v grafu znázorněn průběh tlaku a Machova čísla v potrubí s konstantním průřezem a zanedbáním třecích sil proudícího média. (7) (8)

V případě uvažování nestlačitelného proudění v potrubí stálého průřezu má třecí síla vliv pouze na tlakovou ztrátu, která narůstá ve směru proudění, a rychlost proudění zůstává po délce potrubí nezměněna. (7) (8)

V případě uvažování stlačitelného proudění ovlivňuje třecí síla všechny proměnné, protože při změně tlaku dochází ke změnám hustoty proudícího média, které dále ovlivňují i rychlost proudění. V určitých případech, jak je možno vidět na obrázku (Obr. 8) je možné určité úseky potrubní trasy uvažovat s prouděním se zanedbanou viskozitou (již zmiňované trysky) na rozdíl od těch, kde viskozitu zanedbat nelze (dlouhé trubky konstantního průřezu). (7) (8)



Obr. 7 Vliv tření na hodnoty Machova čísla



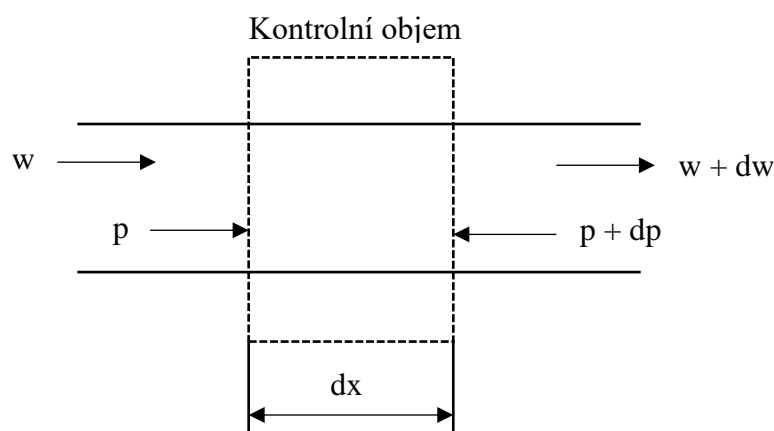
Obr. 8 Vliv tření v různých úsecích potrubí

Následující vztahy budou uvedeny s pozorností na účinek viskozity pro ustálené proudění plynů v potrubní trase konstantního průřezu při takových podmínkách, kde stlačitelnost proudění nelze zanedbat, naopak je nutno ji věnovat zvýšenou pozornost. Dále je předpokladem, že se jedná o adiabatické proudění, které lze v praxi uvažovat jako dokonale izolované potrubí.

3.1. Proudění v potrubí konstantního průřezu (7) (8)

Důraz je zde kladený na vliv třecích sil na stěně potrubí při adiabatickém proudění potrubní trasou s konstantním průřezem kolmým na směr proudění. Tento typ proudění, jak bude zmíněno i dále, tedy stlačitelné proudění v potrubí konstantního průřezu s vlivem tření, je označováno jako: „Fannovo proudění“.

Na malém kontrolním objemu je uvažována změna hybnosti v potrubí (Obr. 9) při konstantním proudění.



Obr. 9 Kontrolní objem pro analýzu proudění (7)

Výchozí úvahu je možno zapsat tak, že rozdíl tlakové síly a síly vyvolané smykovým napětím je roven hmotnostnímu průtoku násobeného rozdílem vstupní rychlosti a výstupní rychlosti. Jelikož je síla vyvolána smykovým třením na stěně rovna výsledku smykovému tření a povrch stěny potrubí lze uvažovat jako obvod násobený elementární délkou potrubí, lze vztah zapsat následujícím způsobem:

$$pA - (p + dp)A - \tau_w(\text{obvod})dx = \rho wA(w + dw - w) \quad (3.1)$$

Kde: p – tlak

A – plocha řezu

τ_w – smykové tření u stěny

x – vzdálenost

w – rychlost proudění

pak lze rovnici zapsat jako:

$$-dp - \tau_w \frac{O}{A} dx = \rho w dw \quad (3.2)$$

Kde: O – obvod

Hodnota obvodu v případě kruhového potrubí je $O = \pi D$, kde D je průměr potrubí a hodnota plochy průřezu $A = \pi D^2/4$ a tedy je možné zapsat $O/A = 4/D$. Z tohoto důvodu je i pro potrubní trasy nekruhového průřezu používán termín hydraulický průměr, který je udáván právě poměrem obvodu ku ploše a značí se D_H . Jeho vyjádření lze zapsat následovně:

$$D_H = \frac{4(\text{plocha})}{\text{obvod}} = \frac{4A}{O} \quad (3.3)$$

Vydělení rovnice (3.2) výrazem ρw^2 vznikne výraz:

$$-\frac{dp}{\rho w^2} - \frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx = \frac{dw}{w} \quad (3.4)$$

Jako další je dle zákona zachování hmotnosti, které zní:

$$\rho A w = \text{konstanta} \quad (3.5)$$

V případě uvážení pro tento případ konstantního průřezu je rovnice (3.5) zjednodušena na:

$$\rho w = \text{konstanta} \quad (3.6)$$

Aplikováno na kontrolní objem v potrubí:

$$\rho w = (\rho + d\rho)(w + dw) \quad (3.7)$$

Z rovnice (3.7) vyplývá v závislosti na přesnosti, kde výraz $d\rho \cdot dw$ je zanedbatelný, protože změna $d\rho$ a dw jsou velmi malé, lze zapsat rovnici:

$$\rho dw + w d\rho = 0 \quad (3.8)$$

Vydělením rovnice (3.8) výrazem ρw vznikne rovnice:

$$\frac{dw}{w} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (3.9)$$

Dále při uvážení energetické rovnice platné pro ideální plyn:

$$c_p T + \frac{w^2}{2} = \text{konstanta} = c_p (T + dT) + \frac{(w + dw)^2}{2} \quad (3.10)$$

Kde: c_p – tepelná kapacita při konstantním tlaku

T – teplota

Rovnice v závislosti na řádu přesnosti lze zapsat jako:

$$c_p dT + w dw = 0 \quad (3.11)$$

Dále při uvážení stavové rovnice

$$\frac{p}{\rho} = RT ; p = \rho RT \quad (3.12)$$

Kde: R – univerzální plynová konstanta

A dále:

$$\frac{p + dp}{\rho + d\rho} = R(T + dT) ; p + dp = (\rho + d\rho)R(T + dT) \quad (3.13)$$

V závislosti na řádu přesnosti nabývá tvaru:

$$dp = RTd\rho + \rho R dT \quad (3.14)$$

Dále při vyjádření Machova čísla:

$$M^2 = \frac{w^2}{a^2} = \frac{w^2}{\kappa RT} \quad (3.15)$$

Kde: M – Machovo číslo

κ – Poissonova konstanta

Při uvážení změny:

$$(M + dM)^2 = \frac{(w + dw)^2}{(a + da)^2} = \frac{(w + dw)^2}{\kappa R(T + dT)} \quad (3.16)$$

Po úpravě pak následovně:

$$M^2 \left(1 + 2 \frac{dM}{M}\right) = \frac{w^2}{\kappa RT} \left(1 + 2 \frac{dw}{w} - \frac{dT}{T}\right) \quad (3.17)$$

V závislosti na řádu přesnosti:

$$\frac{dM}{M} = \frac{dw}{w} - \frac{dT}{2T} \quad (3.18)$$

Tyto rovnice reprezentují soustavu pěti rovnic o pěti neznámých (dM , dw , dp , dT a $d\rho$), které mohou být vyřešené a může jimi být vyjádřeno dM a dw jak je odvozeno dále.

Z rovnice (3.11):

$$\frac{dT}{T} + \frac{w dw}{c_p T} = 0 \quad (3.19)$$

S uvážením rovnice Machova čísla:

$$M^2 = \frac{w^2}{\kappa RT} \quad (3.20)$$

A dále:

$$(M + dM)^2 = \frac{(w + dw)^2}{\kappa R(T + dT)} \quad (3.21)$$

Po úpravě rovnice (3.21):

$$2M dM = \frac{2w dw}{\kappa RT} - \frac{w^2}{\kappa RT^2} dT \quad (3.22)$$

Což může být upraveno na:

$$w dw = \kappa RTM dM + \frac{w^2}{2} \frac{dT}{T} \quad (3.23)$$

Odsud dosazením rovnice (3.23) do rovnice(3.19):

$$\frac{dT}{T} + \frac{\kappa R}{c_p} M dM + \frac{w^2}{2c_p T} \frac{dT}{T} = 0 \quad (3.24)$$

Nyní s faktem, že:

$$R = c_p - c_v ; c_p = \kappa R / (\kappa - 1) \quad (3.25)$$

Kde: c_p – tepelná kapacita při konstantním tlaku

c_v – tepelná kapacita při konstantním objemu

Nabývá rovnice (3.24) tvar:

$$\frac{dT}{T} + (\kappa - 1)M dM + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \frac{dT}{T} = 0 \quad (3.26)$$

Která může být dále upravena na tvar:

$$\frac{dT}{T} = - \frac{(\kappa - 1)M^2}{\left(1 + \frac{(\kappa - 1)M^2}{2}\right)} \frac{dM}{M} \quad (3.27)$$

Nyní vydělením rovnice (3.14) výrazem $p = \rho RT$ vznikne rovnice:

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (3.28)$$

Dosazením rovnice (3.9) do rovnice (3.28) je zbaveno výrazu s hustotou:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dw}{w} + \frac{dT}{T} \quad (3.29)$$

Pomocí rovnice (3.18) se změna rychlosti vyjádří jako:

$$\frac{dw}{w} = \frac{dM}{M} + \frac{dT}{2T} \quad (3.30)$$

A dosazením rovnice (3.30) do rovnice (3.29) vznikne:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dM}{M} + \frac{dT}{2T} \quad (3.31)$$

Dále dosazením rovnice (3.27) do rovnice (3.31):

$$\frac{dp}{p} = -\left(1 + \frac{(\kappa - 1)M^2/2}{1 + (\kappa - 1)M^2/2}\right) \frac{dM}{M} \quad (3.32)$$

S použitím výrazu $a^2 = \kappa p / \rho$ v rovnici (3.4) vznikne rovnice:

$$\frac{dw}{w} + \frac{1}{\kappa M^2} \frac{dp}{p} + \frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx = 0 \quad (3.33)$$

Substituce výrazu dw/w z rovnice (3.18) umožní zapsání rovnice (3.33) jako:

$$\frac{dM}{M} + \frac{1}{2} \frac{dT}{T} + \frac{1}{\kappa M^2} \frac{dp}{p} + \frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx = 0 \quad (3.34)$$

Substitucí rovnic (3.27) a (3.32) do rovnice (3.34) vznikne rovnice:

$$\frac{dM}{M} - \frac{(\kappa - 1)M^2/2}{1 + (\kappa - 1)M^2/2} \frac{dM}{M} - \frac{1 + (\kappa - 1)M^2}{1 + (\kappa - 1)M^2/2} \frac{dM}{M} + \frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx = 0 \quad (3.35)$$

Po úpravě vznikne rovnice:

$$\frac{dM}{M} = \frac{\kappa M^2 (1 + (\kappa - 1)2M^2)}{1 - M^2} \left(\frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx \right) \quad (3.36)$$

Zpětnou substitucí rovnice (3.36) do rovnice (3.27) vznikne rovnice:

$$\frac{dT}{T} = \frac{\kappa(\kappa - 1)M^4}{(1 - M^2)} \left(\frac{\tau_w}{\rho V^2} \frac{O}{A} dx \right) \quad (3.37)$$

Podobně substitucí rovnice (3.36) do rovnice (3.32) vznikne:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\kappa M^2 (1 + (\kappa - 1)M^2)}{(1 - M^2)} \left(\frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx \right) \quad (3.38)$$

Protože hodnota smykového tření, rychlost proudění a Machovo číslo jsou vždy kladné, z rovnice (3.36) vyplývá, že znaménko změny dM závisí na výsledném znaménku $(1 - M^2)$. Z rovnice je tedy možno vyčíst, že v případě Machova čísla nabývajících hodnot menších jedné, způsobí tření zvyšování hodnot Machova čísla, a naopak při hodnotách menších jedné způsobí tření snižování hodnot Machova čísla. Viskozita dle výsledků rovnice způsobuje přibližování hodnot Machova čísla k hodnotě 1. Jakmile je dosaženo této hodnoty, nemohou změny dále v proudu již ovlivnit stav proudu proti směru proudění a může se zde objevit jako výsledek tření tzv. „ucpání proudu“, kdy při zvyšování vstupních parametrů již nelze zvyšovat průtok místem ucpání.

Stejným způsobem ukazují rovnice (3.37) a (3.38) hodnoty pro změnu teploty a změnu tlaku. V případě Machova čísla menšího 1 vycházejí hodnoty změny záporné, a naopak v případě Machova čísla většího 1 vycházejí hodnoty změny kladné.

Jako poslední je uvažována změna entropie v důsledku tření. Změnu entropie je možno vyjádřit následovně:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (3.39)$$

Případně:

$$\frac{ds}{c_p} = \frac{dT}{T} - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{dp}{p} \quad (3.40)$$

Při použití rovnice (3.38) a (3.38) lze dostat: (7) (8)

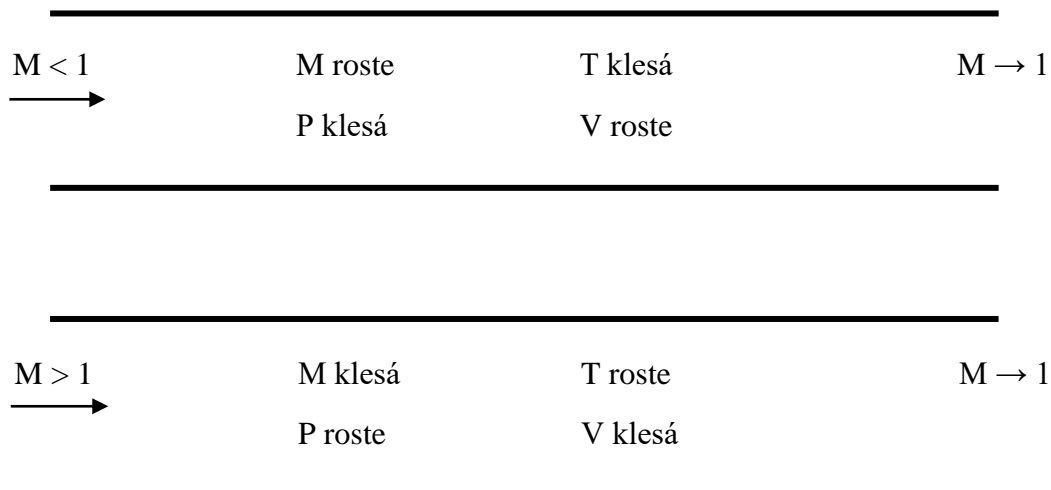
$$\frac{ds}{c_p} = (\kappa - 1)M^2 \left(\frac{\tau_w}{\rho w^2} \frac{O}{A} dx \right) \quad (3.41)$$

Z toho vyplývá, že entropie se v každém případě bude zvyšovat.

Předchozí rovnice společně ukazují na skutečnost, že v případě stlačitelného proudění se třením v potrubí konstantního průřezu se vlastnosti proudění mění, jak je vyznačeno v tabulce (Tab. 2) a graficky znázorněno na obrázku (Obr. 10.)

	dM	dV	dP	dT	ds
$M < 1$	+	+	-	-	+
$M > 1$	-	-	+	+	+

Tab. 2 Hodnoty proměnných v závislosti na Machově čísle (7)



Obr. 10 Hodnoty proměnných v přímém potrubí (7)

Rovnice obsahují i smykové tření na stěně potrubí, které je vyjádřeno pomocí bezrozměrného smykového tření u stěny f , které je definováno následovně:

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho w^2} \quad (3.42)$$

Bezrozměrné smykové tření na stěně, f , je označováno jako „Fannův třecí faktor“. Další třecí faktor často používán při hodnocení nestlačitelných proudění v potrubí je „Darcyův třecí faktor“. Tyto dva třecí faktory jsou vzájemně závislé následovně:

$$f = \frac{f_D}{4} \quad (3.43)$$

Obecně platí:

$$f = \text{funkce}(Re, \epsilon/D_H, M) \quad (3.44)$$

Kde: Re – Reynoldsovo číslo

ϵ – drsnost povrchu

Reynoldsovo číslo vychází z rychlosti proudění a hydraulického průměru. Vliv Machova čísla je však v tomto případě zanedbatelný, proto pro většinu aplikací lze závislost zapsat jako:

$$f = \text{funkce}(Re, \epsilon/D_H) \quad (3.45)$$

Darcyův třecí faktor je dán rovnicemi, které se používají i při malých rychlostech ($M < 0,3$), nebo lze hodnoty faktoru vyčíst z grafů. Rovnice pro získání faktoru mají následující tvar pro proudění laminárního typu:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (3.46)$$

A pro proudění turbulentního typu:

$$f = 0,0625 / \left(\log \left(\frac{\epsilon}{3,7D_H} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2 \quad (3.47)$$

Přechodový charakter proudění z laminárního do turbulentního typu lze ve většině případech považovat na hodnotě Reynoldsova čísla přibližně 2300. Většina stlačitelných plynů při proudění v potrubí vykazuje charakter turbulentního proudění.

Hodnota drsnosti povrchu potrubí ϵ závisí na materiálu, ze kterého je potrubí vyrobeno a na povrchové úpravě. Pro tažené potrubí nabývá drsnost hodnot průměrně 0,0015 mm a pro komerční oceli používané pro výrobu potrubí se hodnota pohybuje okolo 0,045 mm.

Při uvážení faktoru f a dosazení do rovnice (3.36) lze rovnici zapsat následovně:

$$\frac{4f}{D_H} dx = \frac{2(1 - M^2)}{\kappa M^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M^2 \right)} \frac{dM}{M} \quad (3.48)$$

Kde byl použit hydraulický průměr, který byl odvozen dříve. Integraci rovnice (3.48) lze dostat:

$$\int_0^l \frac{4f}{D_H} dx = \int_{M_1}^{M_2} \frac{2(1 - M^2)}{\kappa M^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M^2 \right)} \frac{dM}{M}$$

Po úpravě dále:

$$\frac{4\bar{f}}{D_H} l = \int_{M_1}^{M_2} \frac{2(1 - M^2)}{\kappa M^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M^2\right)} \frac{dM}{M} \quad (3.49)$$

Kde \bar{f} je průměrná hodnota třecího faktoru z celé délky l . Hodnoty třecího faktoru se mění jen velmi málo a jejich změna je tedy zanedbatelná a lze uvažovat třecí faktor jako konstantní po celé délce potrubí. (8) Na základě této skutečnosti bude v následujících rovnicích \bar{f} nahrazeno f . Integrace rovnice vede k následující rovnici:

$$\frac{4f}{D_H} l = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{M_1^2} - \frac{1}{M_2^2} \right) + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \ln \frac{M_1^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M_2^2\right)}{M_2^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M_1^2\right)} \quad (3.50)$$

Tato rovnice umožňuje nalezení změny Machova čísla na předem dané délce potrubí. Pro popis výsledků této rovnice je vhodné určení Machova čísla M_2 . Jak bylo odvozeno dříve, při vlivu tření má proudění tendenci přibližovat se k hodnotám $M = 1$, určením hodnoty na konci potrubí v bodě 2 jako $M_2 = 1$, lze rovnici (3.50) zapsat následovně:

$$\frac{4f}{D_H} x = \frac{1 - M^2}{\kappa M^2} + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \ln \frac{(\kappa + 1)M^2}{2(1 + 0,5(\kappa - 1)M^2)} \quad (3.51)$$

Kde bylo zavedeno x jako proměnná délka v předpokladu, že je vhodné pro další výpočet hodnoty Machova čísla uvažovat jako nezávislou proměnnou a následně hodnoty délky jsou dopočítávány.

Podobným způsobem integrací rovnice (3.32) mezi body, kde je v prvním bodě tlak p a v bodě druhém $M = 1$ a tlak $p = p_2$ lze rovnici zapsat v integrálním tvaru:

$$\int_p^{p_2} \frac{dp}{p} = \int_M^1 \left(1 + \frac{(\kappa - 1)M^2/2}{1 + \frac{1}{2}(\kappa - 1)M^2} \right) \frac{dM}{M} \quad (3.52)$$

Která po integraci nabývá tvaru:

$$\frac{p}{p_2} = \frac{1}{M} \left(\frac{(\kappa + 1)/2}{1 + (\kappa + 1)M^2/2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.53)$$

Dále poté podobně integrací rovnice (3.27) lze dostat:

$$\int_T^{T_2} \frac{dT}{T} = - \int_M^1 \frac{(\kappa - 1)M}{1 + (\kappa - 1)M^2/2} dM \quad (3.54)$$

A dále po integraci:

$$\frac{T}{T_2} = \frac{(\kappa + 1)/2}{1 + (\kappa - 1)M^2/2} \quad (3.55)$$

Kde teplota T_2 odpovídá teplotě v reálném nebo imaginárním bodě 2, kde je předpokládána hodnota Machova čísla 1.

Použitím výsledků a definice statického tlaku lze odvodit závislost p_0/p_{02} . Když:

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.56)$$

Dále poté:

$$\frac{p_0}{p_{02}} = \frac{p}{p_2} \left(\frac{1 + (\kappa - 1)M^2/2}{(\kappa + 1)/2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.57)$$

S použitím rovnice (3.53) vznikne:

$$\frac{p_0}{p_{02}} = \frac{1}{M} \left(\frac{1 + (\kappa - 1)M^2/2}{(\kappa + 1)/2}\right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad (3.58)$$

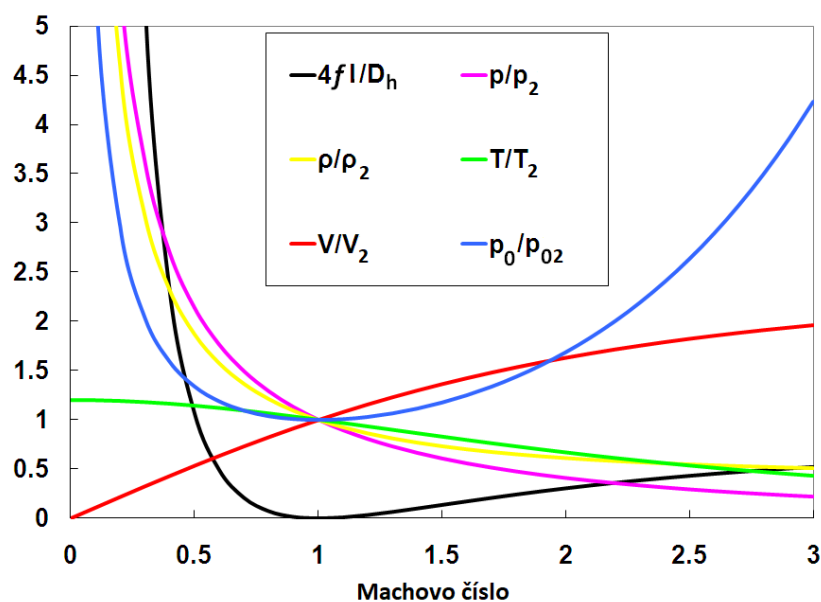
Odvozené rovnice tedy mají všechny společné, že jsou funkcí Machova čísla: (7) (8)

$$\frac{4f}{D_H} l = \text{funkce}(M) \quad (3.59)$$

$$\frac{p}{p_2} = \text{funkce}(M) \quad (3.60)$$

$$\frac{T}{T_2} = \text{funkce}(M) \quad (3.61)$$

Jednotlivé hodnoty a křivky těchto funkcí jsou znázorněny na obrázku dole (Obr. 11) a v příloze A pro hodnoty Poissonovy konstanty 1,4 a také relevantní pro srovnání s CFD výpočty dále konstanty 1,32. Hodnoty pro jakékoliv konstanty je možné snadno dopočítat použitím např. prostředí Microsoft Excel.



Obr. 11 Poměr proměnných při Fannovo proudění (9)

3.2. Variace součinitele tření (7) (8)

V práci bylo dříve řečeno, že lze považovat třecí faktor jako konstantní. Na následující úvaze je ukázána velikost změny třecího faktoru. Jak bylo již uvažováno dříve:

$$f = \text{funkce}(Re, \epsilon/D_H) \text{ kde } Re = \frac{\rho w D_H}{\eta} \quad (3.62)$$

Kde η – dynamická viskozita

Při uvažování hmotnostního toku potrubím jako $\dot{m} = \rho w A$, lze zapsat rovnici Reynoldsova čísla následovně:

$$Re = \frac{\dot{m} D_H}{A \eta} = \frac{4 \dot{m}}{O \eta} \quad (3.63)$$

V případě potrubí konstantního průřezu $O = konst$ a $\dot{m} = konst$, lze tedy uvažovat:

$$Re \text{ závisí na } \frac{1}{\eta} \quad (3.64)$$

Hodnota koeficientu viskozity je závislá na teplotě a její závislost je popsána:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^n \quad (3.65)$$

Kde T je hodnota celkové teploty a hodnota exponentu n se pohybuje v rozmezí 0,5 – 0,8 v případě běžných plynů, proto jsou změny Reynoldsova čísla po délce potrubí velmi malé. Dále je proudění ve většině případech turbulentní a v takovém případě hodnota třecího faktoru je málo závislá na Reynoldsově čísle. Z uvedených důvodů je adekvátní práce při výpočtu s třecím faktorem jako s konstantou.

Z kapitoly 3.1 a 3.2 vyplynuly výhody a nevýhody používání Fannova proudění, které jsou pro přehlednost uvedené v tabulce (Tab. 3) a dále budou rozvinuty a porovnány s výsledky CFD analýzy proudění

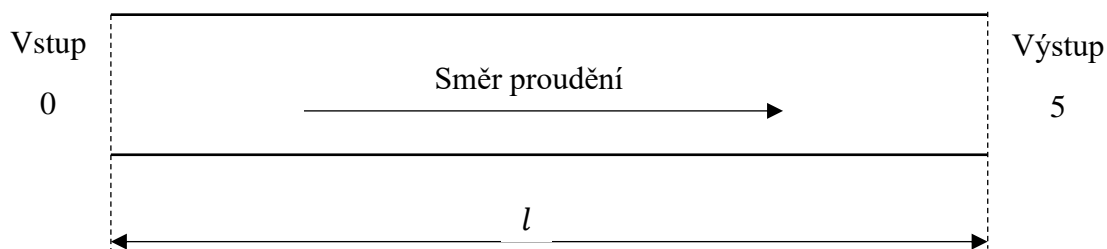
Používání Fannova proudění	
Výhody	Nevýhody
Rychlý výpočet	Použití pouze pro adiabatické proudění v přímých potrubních trasách
Představa o vyvíjení proudění při znalosti pouze vstupních nebo výstupních parametrů	Zprůměrování hodnot proměnných při výpočtu

Tab. 3 Výhody a nevýhody používání Fannova proudění

4. Aplikace Fannova proudění

Při aplikaci odvozených rovnic Fannovo proudění je vhodné použít Machovo číslo na vstupu do potrubí a následně dopočítávat hodnoty proměnných po délce potrubní trasy. V případě aplikace na reálný problém profukování potrubní trasy parou však nejsou vždy dostupná měření rychlosti, teploty a tlaku.

Pro následující případ jsou známy pouze hodnoty celkového tlaku a celkové teploty na začátku potrubní trasy a hodnoty celkového tlaku a celkové teploty na výstupu do atmosféry. Grafické znázornění příkladu je vidět na obrázku dole (Obr. 12):



Obr. 12 Grafické znázornění řešeného příkladu

Pro výpočet při proudění vodní páry byly použity následující konstanty:

Délka potrubí l [m]	5 (s výpočetním krokem 0,25 [m])
Poissonova konstanta κ [–]	1,32
Drsnost povrchu potrubí ϵ [m]	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Celkový tlak na vstupu p [bar]	10
Celková teplota na vstupu T [°C]	250
M. č. na výstupu M [–]	1

Tab. 4 Vstupní hodnoty příkladu Fannova proudění

Při zadaných parametrech a předpokladu dle teorie Fannova proudění, že na výstupu do atmosféry $M_2 = 1$, je třeba nalézt řešení následující rovnice:

$$\frac{4f}{D_H} x = \frac{1 - M_1^2}{\kappa M_1^2} + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \ln \frac{(\kappa + 1)M_1^2}{2(1 + 0,5(\kappa - 1)M_1^2)} \quad (4.1)$$

Jelikož není známo Machovo číslo v počítaném místě, je pro první výpočet je hodnota odhadnuta. Není předpokládáno nadzvukové proudění a je tady zvolena hodnota $M < 1$.

Statický tlak společně se statickou teplotou lze nalézt z definice statického tlaku a teploty. Pro tlak platí: (10)

$$p_{celk} = p_{stat} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (4.2)$$

A následně pro statickou teplotu: (10)

$$\frac{p_{celk}}{p_{stat}} = \left(\frac{T_{celk}}{T_{stat}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \quad (4.3)$$

Následně se podle hodnoty Machova čísla vypočte pravá strana rovnice (4.1) a dopočítává se rychlost z rychlosti zvuku za daných podmínek, která je získávána z tabulek. Dále jsou z tabulek získány hodnoty hustoty a dynamické viskozity pomocí dané teploty a tlaku. Nyní lze vypočítat hodnotu Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} \quad (4.4)$$

Následně třecí faktor f :

$$f = 0,0625 / \left(\log \left(\frac{\epsilon}{3,7 D_H} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2 \quad (4.5)$$

Při zadané délce potrubí lze získat výsledek levé strany rovnice. V této chvíli pravděpodobně vyjde nepravda, protože se nejspíše jednotlivé strany rovnice sobě nerovnjí. Pomocí iterací lze opravit hodnotu třecího faktoru, popřípadě Reynoldsova čísla. V případě použití prostředí Microsoft Excel je možné použít citlivostní analýzu s měněnou hodnotou Machova čísla a nulovým rozdílem pravé a levé strany rovnice (4.1). Při získání hodnoty Machova čísla lze použít tabulky z přílohy (Příloha A) nebo dopočtem jednotlivých hodnot z předem odvozených rovnic.

Tímto způsobem lze získat hodnoty na vstupu do potrubí, které jsou uvedeny v Tab. 5.

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
l [m]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	w [$m \cdot s^{-1}$]	p [bar]	T [°C]	[–]
0	3,228	382,520	7,293	231,581	0,71

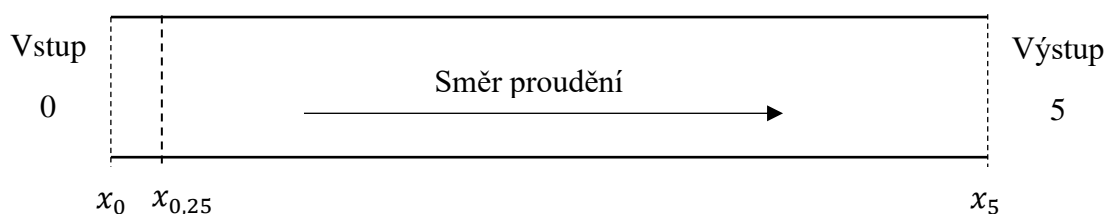
Tab. 5 Hodnoty proměnných na vstupu a výstupu potrubí

Následně při znalosti jednotlivých hodnot proměnných na vstupu a Machova čísla na výstupu z potrubí lze dopočítat hodnoty po délce potrubí následujícím způsobem:

Z tabulek v Příloze A nebo z předchozího výpočtu levé strany rovnice (4.1) lze získat hodnotu na vstupu do potrubí ve vzdálenosti x_0 :

$$\frac{4f}{D_H} x_0 = 0,215 \quad (4.6)$$

Pro vypočtení hodnoty v bodě $x = 0,25$ [m] (znázorněno na Obr. 13) od vstupu do potrubí je možno psát:



Obr. 13 Grafické znázornění výpočetního místa potrubí

$$x_{0,25} = x_0 - (x_0 - x_{0,25}) \quad (4.7)$$

Lze tedy vytvořit rovnici:

$$\frac{4f}{D_H} x_{0,25} = \frac{4f}{D_H} x_0 - \frac{4f}{D_H} (x_0 - x_{0,25}) \quad (4.8)$$

Stejným způsobem by nacházela rovnice pro další výpočetní místa. Po zvolení kroku výpočtu neboli vzdálenosti jednotlivých výpočetních míst, kde v našem případě se krok rovná 0,25 m lze získat výsledek rovnice (4.8) a následným dosazením do rovnice (4.1) hodnotu Machova čísla v počítaném bodě. Použitím hodnot z tabulek (Příloha A) nebo výpočtem z odvozených rovnic se s využitím poměrových hodnot získá hodnota tlaku a teploty. Vzorec pro tlak je následující:

$$p_{0,25} = \frac{p_{0,25}/p}{p_0/p} * p_0 \quad (4.9)$$

A následně pro teplotu:

$$T_{0,25} = \frac{T_{0,25}/T}{T_0/T} * T_0 \quad (4.10)$$

Pomocí hodnoty Machova čísla při použití tabulek lze vypočítat rychlost proudění. Pomocí hodnot teploty a tlaku dále poté lze získat dynamickou viskozitu a hustotu a tyto hodnoty dále použijeme při určení Reynoldsova čísla dosazením do rovnice (4.4). Následněm určení třetího faktoru dle rovnice(4.5) umožňuje výpočet dalšího imaginárního bodu stejným postupem jako u $x_{0,25}$.

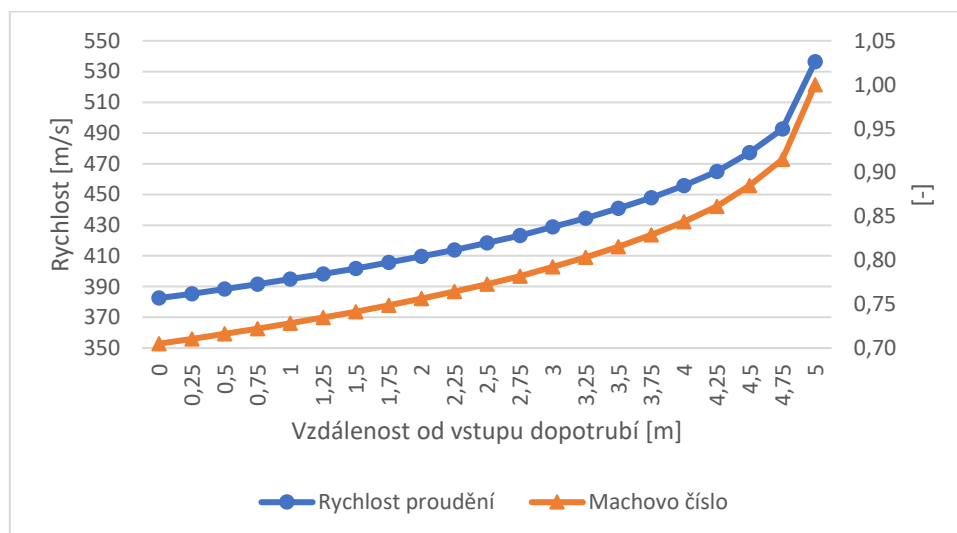
Výsledné hodnoty jednotlivých proměnných pro přímé potrubí konstantního průřezu jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6):

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [bar]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,228	382,520	7,293	231,581	0,71
0,25	3,178	388,147	7,176	231,063	0,72
0,5	3,152	391,280	7,113	230,775	0,72
0,75	3,124	394,551	7,049	230,471	0,73
1	3,096	397,973	6,982	230,151	0,73
1,25	3,067	401,560	6,913	229,813	0,74
1,5	3,037	405,332	6,842	229,456	0,75
1,75	3,006	409,307	6,768	229,076	0,76
2	2,973	413,511	6,692	228,671	0,76
2,25	2,940	417,972	6,612	228,238	0,77
2,5	2,905	422,724	6,529	227,773	0,78

2,75	2,864	428,339	6,434	227,217	0,79
3	2,825	434,038	6,339	226,648	0,80
3,25	2,782	440,291	6,237	226,017	0,81
3,5	2,736	447,236	6,128	225,308	0,83
3,75	2,686	455,064	6,008	224,498	0,84
4	2,631	464,058	5,875	223,556	0,86
4,25	2,560	476,000	5,706	222,283	0,88
4,5	2,477	490,961	5,505	220,657	0,91
4,75	2,331	519,446	5,152	217,463	0,97
5	2,251	536,324	4,960	215,514	1,00

Tab. 6 Hodnoty proměnných pro příklad Fannovo proudění

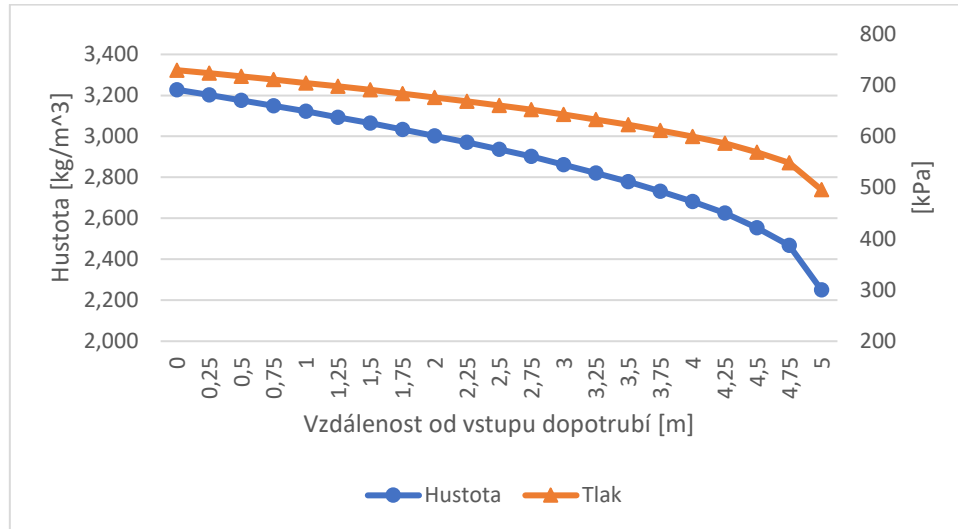
Při převedení hodnot do grafů je dobře patrná změna proměnných. Jak je možné vidět v grafu (Graf 1) hodnoty rychlosti proudění a Machova čísla se spojitě zvyšují z hodnot na začátku potrubí $M = 0,71 [-]$ a $w = 382,520 [m \cdot s^{-1}]$ až nakonec potrubí na hodnoty $M = 1 [-]$ a $w = 536,324 [m \cdot s^{-1}]$, což odpovídá teoretické části, kde se rychlost v důsledku tření při uvažování stlačitelnosti média zvyšuje. Ve vzdálenosti 4,5 až 5 m se hodnoty blíží svému maximu, které dle teorie nemohou přesáhnout $M = 1$. V důsledku zaokrouhlování koncové hodnoty Machova čísla na hodnotu $M \equiv 1$, potažmo zaokrouhlování hodnoty Machova čísla na vstupu do potrubí na dvě desetinná místa, je patrný rychlejší nárůst hodnot na konci potrubí. Koncová hodnota Machova čísla vypočteného a zaokrouhleného na celá čísla je rovna 0,7% což odpovídá zaokrouhlení vypočtené hodnoty na dvě desetinná místa na vstupu do potrubí. Celkový rozdíl hodnot proměnných mezi místem vstupu do potrubí a místem výstupu z potrubí je $M = 0,29 [-]$ $w = 153,804 [m \cdot s^{-1}]$. Při přibližování se k výstupu z potrubí a tedy hodnot $M = 1 [-]$ je znatelný větší rozdíl změny. Při porovnání úseku 0 – 0,25, kde je změna Machova čísla $\Delta M = 0,01 [-]$, s úsekem 4,5 – 4,75 je změna $\Delta M = 0,06 [-]$, lze určit, že rychlost změny v druhém úseku 6 krát větší.



Graf 1 Průběh hodnot rychlosti proudění a Machova čísla Fannova proudění

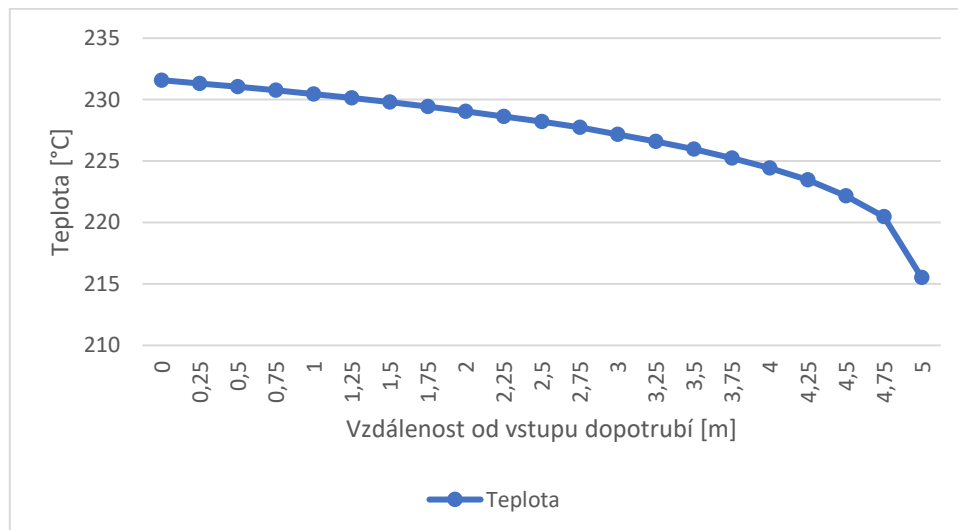
Změna hustoty a tlaku je graficky znázorněna v následujícím grafu (Graf 2). Hodnoty hustoty se snižují od počáteční hodnoty $\rho = 3,228 [kg \cdot m^{-3}]$ až ke koncové hodnotě

$\rho = 2,251 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$. Stejně tak jako v případě rychlosti proudění a Machova čísla je patrná rychlejší změna v koncové části potrubí. Dále také postupné zvyšování změny mezi výpočetními body po délce potrubí. Poslední hodnota v místě $x = 5 \text{ [m]}$ se odvíjí od hodnoty $M = 1 \text{ [-]}$, která byla zaokrouhlena na dvě desetinná místa. Tlak nabývá hodnot od $p = 495,986 \text{ [kPa]}$ k hodnotám $p = 729,279 \text{ [kPa]}$.



Graf 2 Průběh hodnot hustoty a tlaku Fannova proudění

Statická teplota v potrubí v místě vstupu nabývá hodnot $T = 231,581 \text{ [}^\circ\text{C]}$ a na konci potrubí $T = 215,514 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Stejně tak jako u předchozích uvedených hodnot dochází k postupnému zvyšování rychlosti změny hodnot teploty směrem k výstupu z potrubí. Se zvyšující se rychlostí klesá statická teplota, což odpovídá teoretické části. V posledním úseku je změna razantnější, což je opět následkem zaokrouhlení hodnoty $M = 1 \text{ [-]}$ v místě $x = 5 \text{ [m]}$ podle teorie.



Graf 3 Průběh hodnot teploty čísla Fannova proudění

V následujících kapitolách bude na několika čtyřech teoretických geometriích a jedné reálné geometrii provedena simulace proudění v prostředí ANSYS Inc. právě pro účely pozdějšího potvrzení či vyvrácení možnosti aplikace v praktických situacích.

5. CFD

Počítačové simulace byly prováděny za pomoci prostředí Ansys Inc, kde pro tvorbu geometrie bylo použito prostředí SpaceClaim, pro vytváření výpočtové sítě ANSYS meshing a Fluent Meshing, následná simulace pomocí prostředí Fluent byla vyhodnocována v prostředí CFD Post. Vlastnosti geometrií a jednotlivých výpočetních sítí jsou uvedeny u každé zkoumané geometrie v následujících kapitolách. V případě následné simulace proudění byly pro všechny případy použity okrajové a fyzikální podmínky uvedené v následujících tabulkách (Tab. 7, Tab. 8):

Okrajové podmínky

Vlastnosti prostředí zadávané na ploše vstupu do potrubní trasy a ploše výstupu z objemu nejdéle od konce potrubí.

	Vstup do potrubní trasy	Výstup do atmosféry
Tlak [kPa]	1 000	100
Teplota [°C]	250	20

Tab. 7 Okrajové podmínky výpočtu

Proudící médium

Pro výběr proudícího média byla použita databáze prostředí Fluent. V Tab. 8 jsou uvedené hodnoty, ze kterých byla upravena pouze hodnota hustoty na vlastnosti ideálního plynu.

médium – databáze Fluent	water-vapor (H2O)
hustota	ideal-gas
měrné tepelná kapacita []	polynom (default Ansys)
tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,0261
viskozita [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]	$1,34 \cdot 10^{-5}$
molární hmotnost [$kg \cdot kmol^{-1}$]	18,01534

Tab. 8 Proudící médium

Výpočetní turbulentní model

Pro výpočet byl ponechán výchozí turbulentní model v nastavení verze Fluent 2020 R1, který je SST k-omega. Z důvodu potřeby zkoumání teplotního pole a zachycení vlivu stlačitelnosti byla pro výpočty aktivována energetická rovnice.

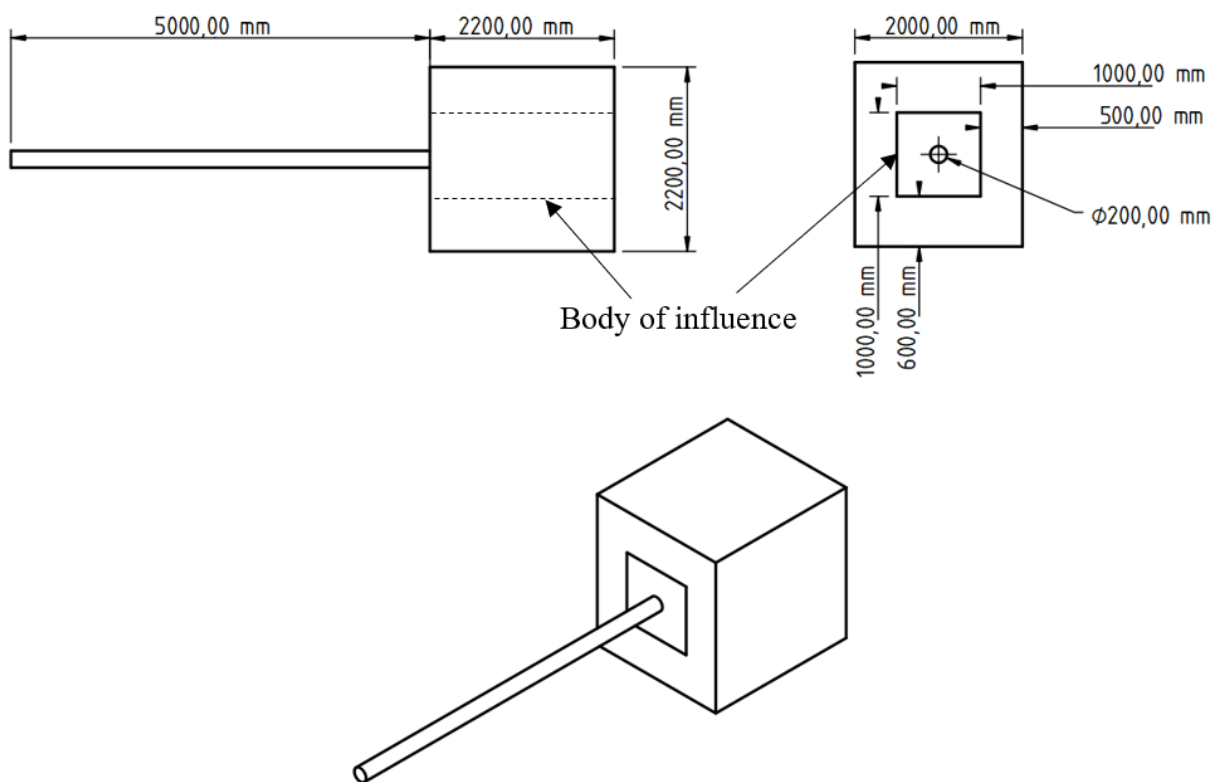
5.1. Analýza výpočetní sítě

Při používání výpočetní sítě pro simulaci, v případě této diplomové práce simulaci proudění, je důležitá tzv. analýza výpočetní sítě, která zaručuje nezávislost získaných výsledků na výpočetní síti. Postup analýzy spočívá ve vytvoření několika výpočetních sítí s různou maximální velikostí výpočetní buňky a následné sledování rozdílu hodnot mezi jednotlivými sítěmi a také hodnot potřebných pro turbulentní model jako je y^+ . Nejdříve byla zkoumána právě bezrozměrná vzdálenost od stěny, tedy y^+ , jehož hodnota při použití zmíněného turbulentního modelu by neměla přesahovat 1. Po několika simulacích byla nalezena ideální hodnota první výpočetní buňky u stěny potrubí a u stěny objemu reprezentujícího atmosféru na výstupu. Hodnoty jsou uvedené u každé geometrie v následujících kapitolách.

Ukazatelem dostatečného počtu prvků výpočetní sítě je porovnání tlakové ztráty v případě řešeného problému na vstupu do potrubí a výstupu do atmosféry. Pro tyto účely byly vytvořeny následující výpočetní sítě s maximální velikostí buněk uvedené v Tab. 9. Pro přesnější představu hodnot proměnných v oblasti výstupu z potrubí byla vytvořena výstupní oblast reprezentující atmosféru společně s tzv. „Body of Influence“. Celá geometrie výpočetního prostoru je znázorněna na Obr. 14. Nejzásadnější hodnota v oblasti Body of Influence je maximální velikost výpočetní buňky 0,02 [m]

Výpočetní síť	maximální velikost buňky [m]	počet buněk [-]	tlak na vstupu do potrubí [Pa]	tlak na výstupu do atmosféry [Pa]	tlaková ztráta [Pa]
T1	0,05	4315164	656531,87	99893,543	556638,327
T2	0,04	6264323	656682,54	99879,815	556802,725
T3	0,035	8900538	656714,97	99854,549	556860,421

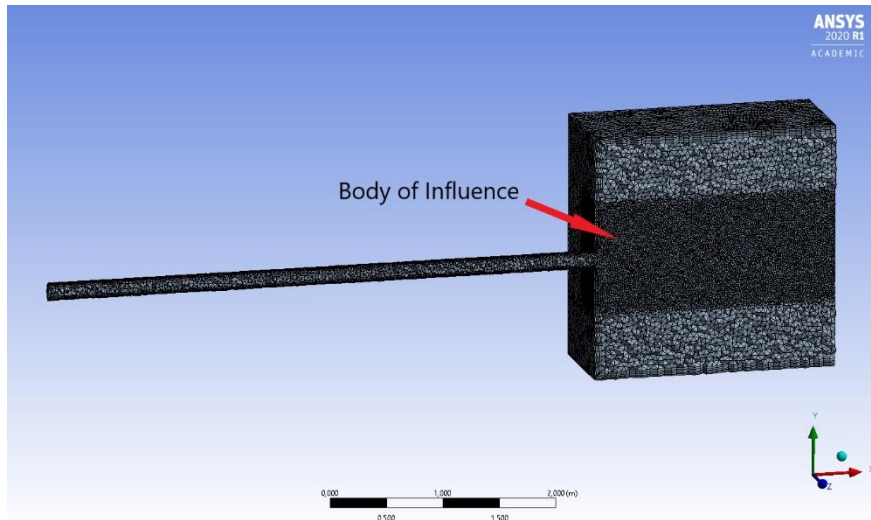
Tab. 9 Analýza výpočetní sítě - hodnoty výpočetních sítí



Obr. 14 Geometrie pro analýzu výpočetní sítě

Pro tvorbu výpočetní sítě na geometrii vytvořené v prostředí SpaceClaim bylo použito nejdříve prostředí Fluent Meshing v. 2020 R1. Orientační časy vytvoření jedné výpočetní sítě se pohybovaly v řádu desítek minut až jedné hodiny na výpočetní technice s konfigurací: Intel Core i5-4590 CPU 3,30GHz, 16GB RAM. Při spuštění simulace ve výpočtovém prostředí Fluent 2020 R1 však nebylo možné dosáhnout uspokojivých výsledků. Při výpočtu docházelo ke zvyšování rychlosti v potrubní trase nad hodnoty Machova čísla = 1 a po délce potrubní trasy dále narůstala. Tato skutečnost nejen odporuje teoretické části práce, ale znemožňovala konvergenci jednotlivých hodnot při simulaci, a tedy získání uspokojivých výsledků.

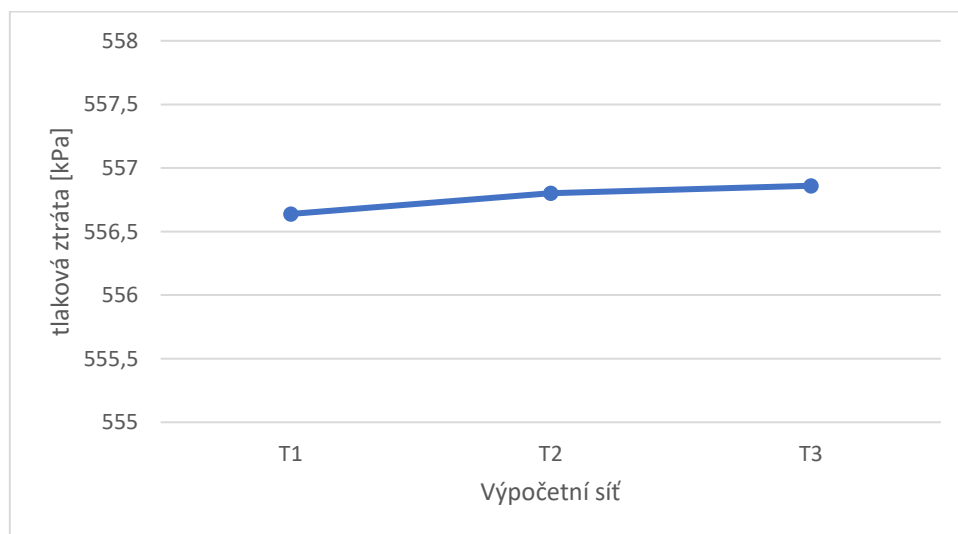
Připravená výpočetní síť pro variantu T1 je znázorněna na Obr. 15. Tato síť byla vytvořena v prostředí Ansys Meshing, které je méně náročné na výpočetní kapacitu, vytváření výpočetní sítě se pohybovalo v rozmezí 20 ÷ 40 min, a také, jak se později ukázalo, následné simulace proběhly úspěšně. Je zde zřetelně vidět více výpočetních buněk v oblasti „Body of Influence“, jež byla vytvořena u každé výpočetní sítě u výstupu z potrubní trasy. Všechny použité výpočetní sítě pro získání uvedených výsledků v následujících kapitolách byly vytvořeny v prostředí Ansys Meshing.



Obr. 15 Výpočetní síť – Body of Influence

Hodnoty z Tab. 9 jsou pro přehlednost znázorněny v grafu dole (

Graf 4). Jak je patrné, tlaková ztráta je ve všech třech případech takřka totožná, maximální rozdíl tlakových ztrát je mezi výpočetní sítě T_1 a T_2 , kde nabývá hodnoty $\Delta = 164 \text{ [Pa]}$ což odpovídá méně než 0,1% tlakové ztráty. Při takto malé odchylce lze již výpočetní síť T_1 považovat za dostačující a následující sítě pro jednotlivé geometrie byly vyvářeny s maximální výpočetní velikostí buňky 0,05 [m]



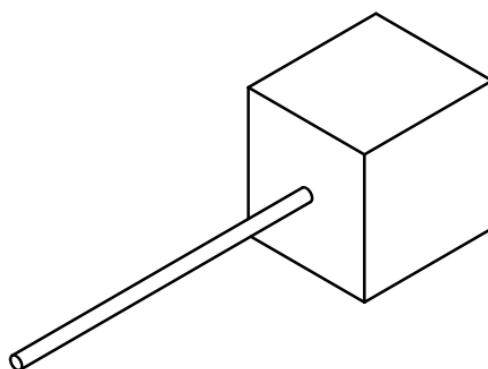
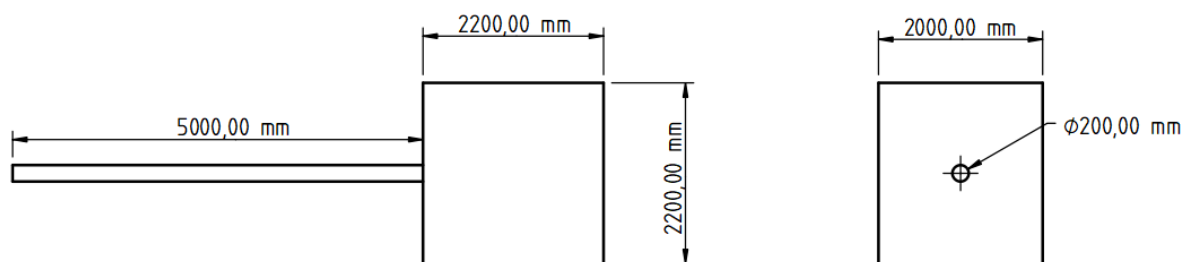
Graf 4 Analýza výpočetní sítě

5.2. CFD analýza proudění v přímém potrubí konstantního průřezu při podmínkách profuku – Varianta 1

Geometrie varianty 1 znázorněné na Obr. 16 byla navržena podle teorie Fannova proudění za účelem prvotního srovnání výsledků analytického výpočtu a numerické simulace. Dle předpokladu by výsledky měly být takřka totožné, protože se v obou případech jedná o přímé potrubí bez výměny tepla s okolím. Porovnání výsledků s ostatními geometriemi a Fannovo prouděním je uvedeno v Kapitole 6. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Tab. 7. a vlastnosti výpočetní sítě jsou uvedeny v Tab. 10.

Počet výpočetních buněk	4 315 164 [–]
Max. velikost buňky	0,05 [m]
Max. velikost buňky v Body of Influence	0,02 [m]
Velikost první buňky u stěny v potrubní trase	$5 \cdot 10^{-7}$ [m]
Velikost první buňky u stěny mimo potrubí	$1 \cdot 10^{-5}$ [m]
Čas generování sítě	19,6 [min]
Čas numerické simulace	47,4 [hod]

Tab. 10 Varianta 1 - vlastnosti výpočetní sítě

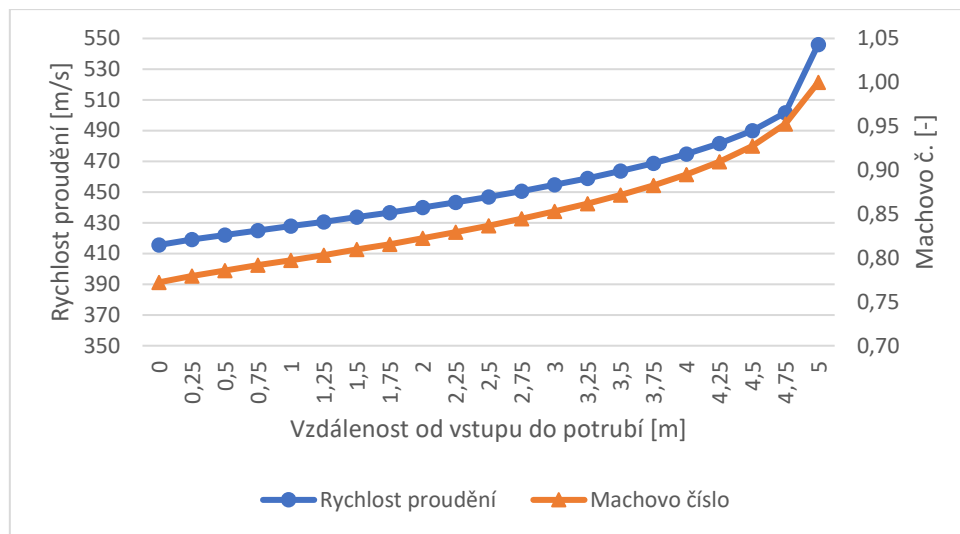


Obr. 16 Geometrie – Varianta 1

Stejně jako u analytického výpočtu, byly jednotlivé hodnoty proměnných posuzovány vždy v průměrných hodnotách na řezu kolmém k ose potrubí ve vzdálenosti jednotlivých míst 0,25 [m]. Pro získání výsledků byly použity dvě metody průměrování, a to metoda průměru z plochy, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 1 a metoda průměrování hmotnostního toku, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 2. Vývoj hodnot je popsán u grafů průběhu jednotlivých proměnných

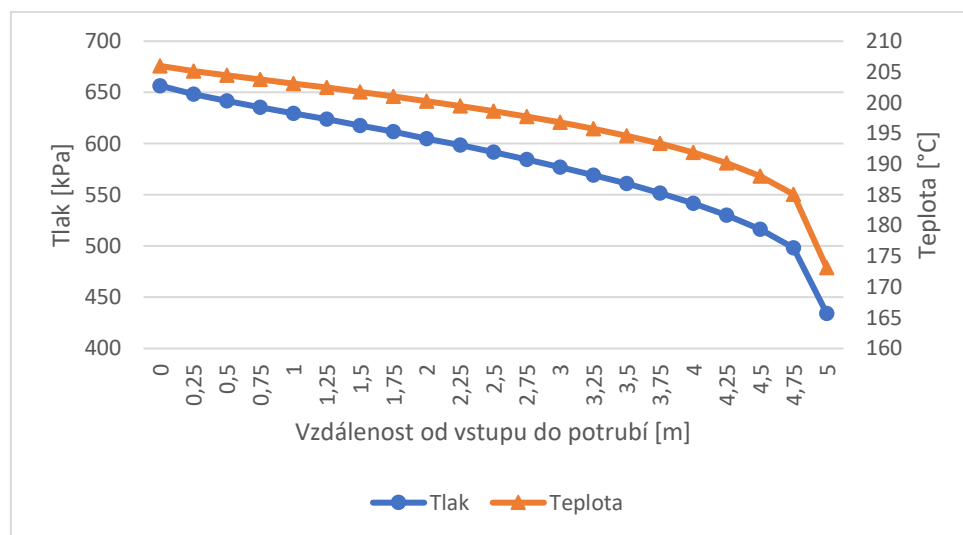
Průběh rychlosti a Machova č. zobrazené v Graf 5 je velmi podobný analytickému výpočtu. Rychlost se pohybuje v rozmezí od 415,590 [$m \cdot s^{-1}$] na vstupu do 546,133 [$m \cdot s^{-1}$] na

výstupu z potrubí. Machovo č. nabývalo hodnot od 0,77 do 1. Je patrný kontinuální růst hodnot po celé délce potrubní trasy s mírným zvýšením růstu na posledním úseku ve vzdálenosti $4,75 \div 5$ [m].



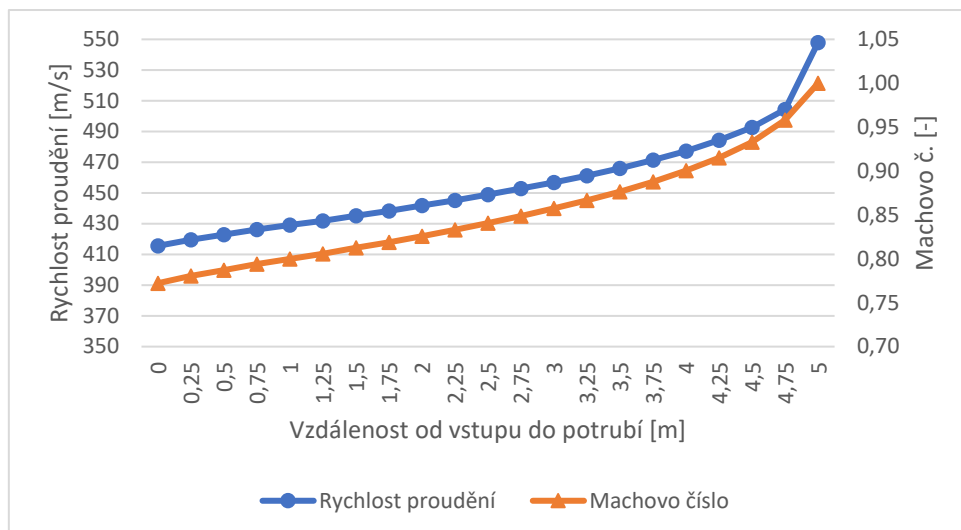
Graf 5 Varianta 1 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha

Průběhy teploty a tlaku zobrazený v Graf 6 nabývá v případě teploty hodnot na začátku potrubní trasy 205,983 [°C] a dále s přibývajícím délkou klesá až na hodnotu 173,129 [°C]. Podobně se také vyvíjel tlak, který nabývá hodnot 656,532 [kPa] na vstupu a dále klesá k hodnotě 434,236 [kPa]. Rychlost snižování hodnot se zvýšila v posledním sledovaném úseku ve vzdálenosti $4,75 \div 5$ [m].



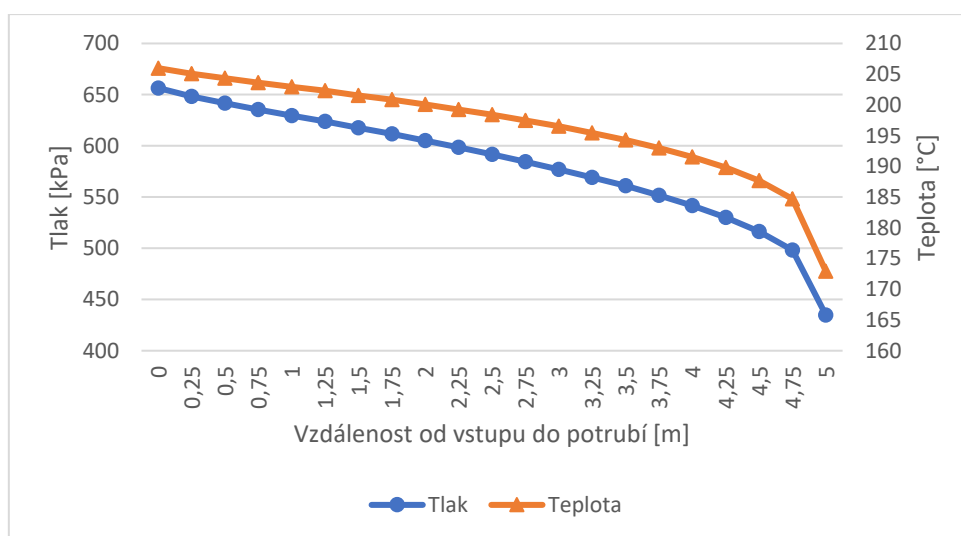
Graf 6 Varianta 1 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha

Pro případ průměrování hodnot pomocí hmotnostního toku jsou průběhy hodnot znázorněné v obou grafech (Graf 7 a Graf 8) takřka totožné. Rozdíl hodnot na vstupu do potrubí při vyhodnocování rychlosti pomocí průměrování přes hmotnostní tok, hodnota $415,612$ [$m \cdot s^{-1}$] ku rychlosti zjištěné pomocí průměrování přes plochu činí $0,022$ [$m \cdot s^{-1}$]. Na výstupu, kde rychlost nabývá hodnoty $547,930$ [$m \cdot s^{-1}$] činí rozdíl hodnot různého průměrování $1,797$ [$m \cdot s^{-1}$]. Machovo č. v obou případech nabývá hodnoty 1 na výstupu a 0,77 na vstupu. Rovnost je nejspíše zapříčiněna zaokrouhlováním Machova čísla.



Graf 7 Varianta 1 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok

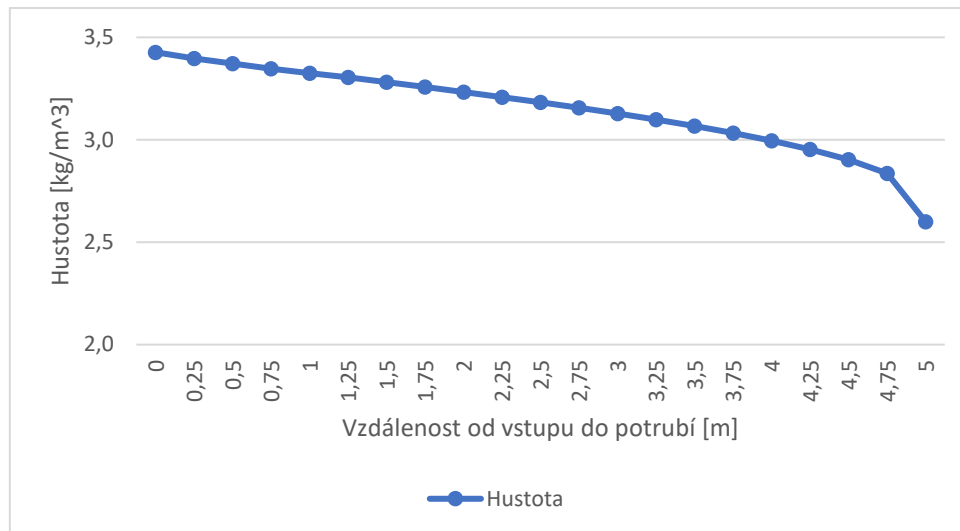
Při pohledu na průběh hodnot teploty a tlaku zjištěných pomocí průměrování přes hmotnostní tok lze spatřit opět takřka totožný tvar křivky jako v případě hodnot průměrovaných přes plochu. Rozdíl teploty na vstupu do potrubí mezi jednotlivými metodami průměrování je $0,002 [^{\circ}\text{C}]$ a na výstupu $0,22 [^{\circ}\text{C}]$. Tlak na vstupu do potrubí nabývá stejných hodnot a na výstupu se hodnota liší o $559 [\text{Pa}]$.



Graf 8 Varianta 1 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok

Zkoumané hodnoty byly zobrazeny na následujících obrázcích, kde jsou vyobrazeny barevně plochy se stejnou hodnotou v řezu rovinou, pro případ Varianty 1, kolmou na osu potrubí.

Na Obr. 17 znázorňující rozložení Machova čísla v rovině řezu je patrné postupné zvyšování rychlosti po délce potrubí a razantní zrychlení proudu za výstupem do atmosféry, kde Machovo č. nabývá hodnot až 3,25, tedy nadzvukové hodnoty. Patrná je i rázová vlna, kde se hodnoty skokově mění z nadzvukových hodnot na hodnoty podzvukové.



Graf 9 Varianta 1 - Průběh hodnot hustoty – plocha

Průběh hodnot hustoty je zobrazen na Graf 9. Na vstupu do potrubí nabývá hustota hodnoty $3,427 [kg \cdot m^{-3}]$ a po délce potrubí klesá s trendem v řádu setin mezi každým sledovaným místem. Větší změna se vyskytuje v koncové části $4,75 \div 5[m]$, kde hustota na výstupu z potrubí nabývá hodnoty $2,601 [kg \cdot m^{-3}]$.

Průběhy hodnot hustoty získané průměrováním v rovině řezu přes hmotnostní tok jsou, z důvodu minimálního rozdílu oproti průměrování hodnot přes plochu, uvedeny v Příloze B Tab. 2.



Obr. 17 Varianta 1 - Machovo číslo

Rychlosti proudění, znázorněny na Obr. 18, korespondují s hodnotami Machova čísla. Z grafu byly popsány hodnoty v potrubní trase, následně po výstupu z potrubí do atmosféry se proud prudce urychluje a nabývá hodnot až kolem $1120 [m \cdot s^{-1}]$ v oblasti těsně za výstupem vyznačené červenou barvou. Následuje rázová vlna, kde se rychlost prudce sníží a následuje v důsledku expanze opakované urychlování.



Rázové vlny jsou zřetelně vidět i v případě Obr. 19 s konturami reprezentující statický tlak. Lze z obrázku vyčíst, že za výstupem z potrubní trasy se vytváří až pět míst s prudkou změnou statického tlaku, tedy míst tlakových vln.

Obr. 18 Varianta 1 - Rychlost proudění



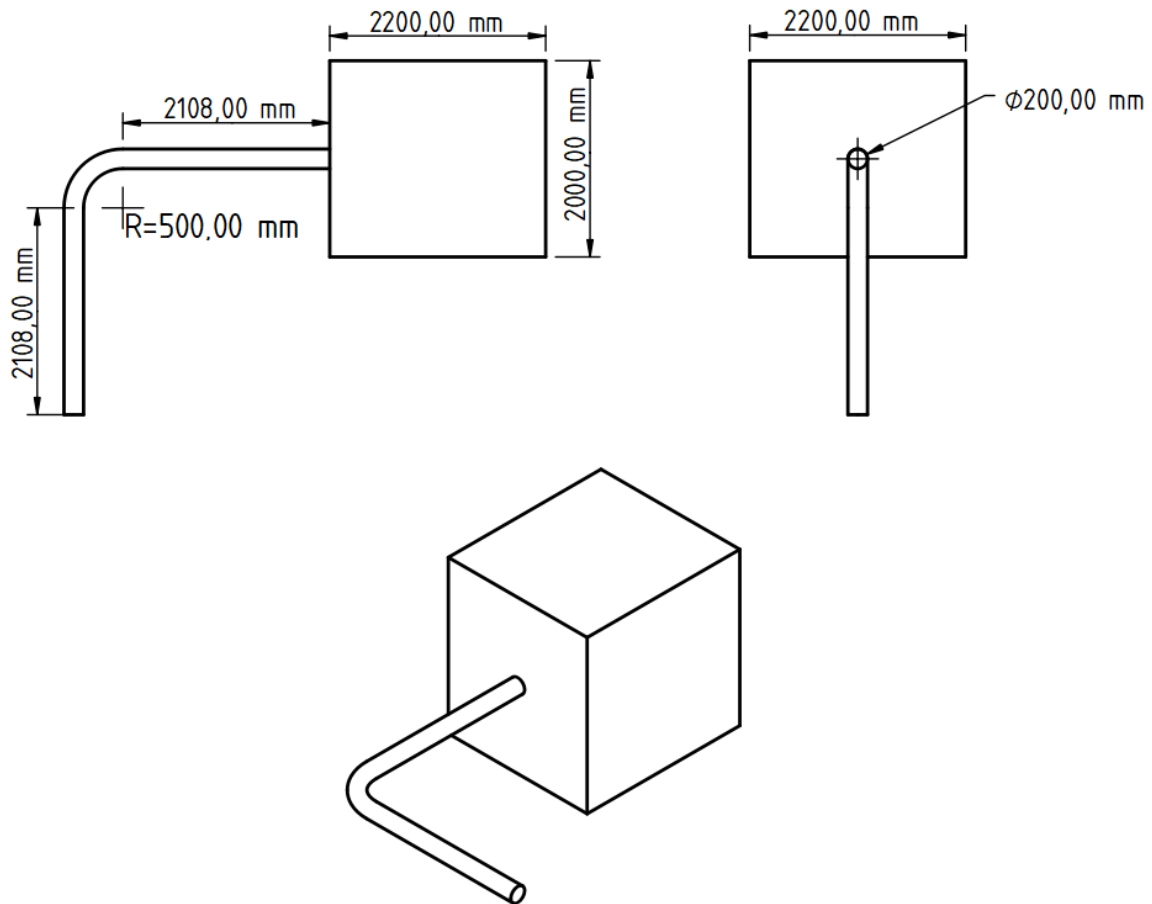
Obr. 19 Varianta 1 – Tlak

5.3. CFD analýza proudění v zahnutém potrubí konstantního průřezu při podmínkách profuku – Varianta 2

Geometrie pro Variantu 2 znázorněna na Obr. 20 vyobrazuje potrubí konstantního průřezu s jedním kolenem v polovině své délky a celkovou délkou potrubní trasy 5 [m] z důvodu pozdějšího porovnání s teoretickým průběhem hodnot dle Fannova proudění. Při numerické simulaci bylo uvažováno adiabatické proudění. V koncové části byl vytvořen reprezentační objem atmosféry, který má zachytit změnu charakteristik proudění po výstupu z potrubí. Porovnání následných výsledků s ostatními geometriemi a Fannovo prouděním je uvedeno v Kapitole 0. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Tab. 7 a vlastnosti výpočetní sítě v Tab. 11.

Počet výpočetních buněk	4 234 910 [–]
Max. velikost buňky	0,05 [m]
Max. velikost buňky v Body of Influence	0,02 [m]
Velikost první buňky u stěny v potrubní trase	$5 \cdot 10^{-7}$ [m]
Velikost první buňky u stěny mimo potrubí	$1 \cdot 10^{-5}$ [m]
Čas generování sítě	21 [min]
Čas numerické simulace	55,2 [hod]

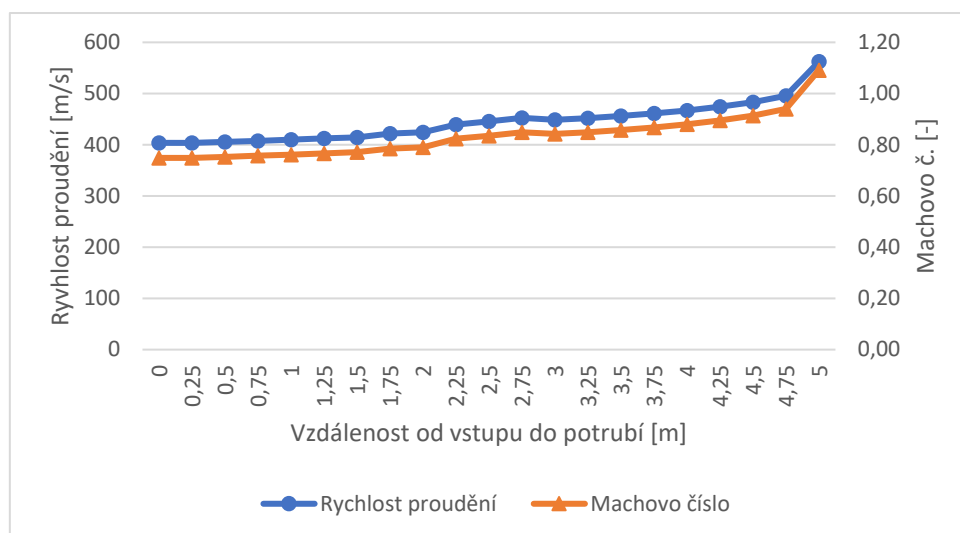
Tab. 11 Varianta 2 - vlastnosti výpočetní sítě



Obr. 20 Geometrie – Varianta 2

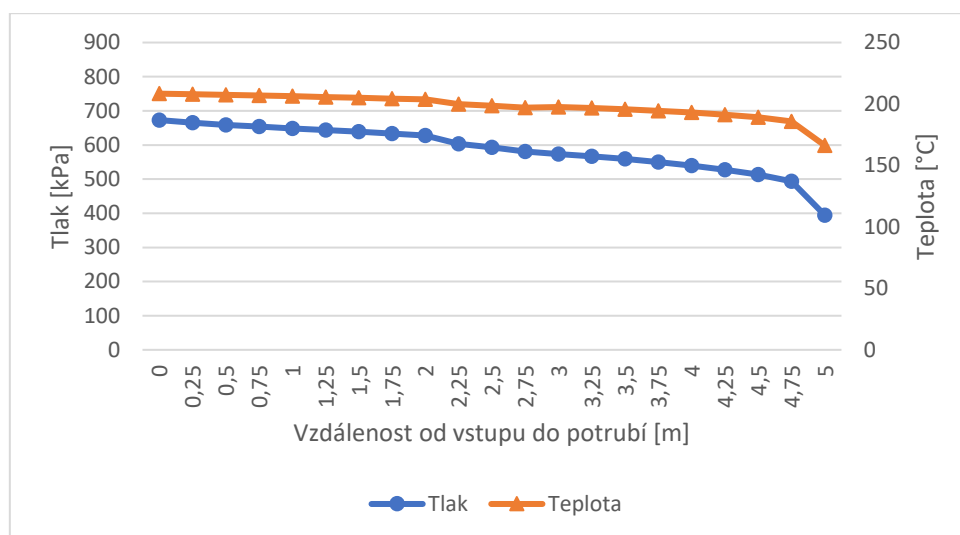
Stejně jako v předchozích případech byly jednotlivé hodnoty proměnných posuzovány vždy v průměrných hodnotách na řezu kolmém k ose potrubí ve vzdálenosti jednotlivých míst 0,25 [m]. Pro získání výsledků byly použity dvě metody průměrování, a to metoda průměru z plochy, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 3 a metoda průměrování hmotnostního toku, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 4. Vývoj hodnot je popsán u grafů průběhu jednotlivých proměnných.

Graf 10 znázorňuje průběh hodnot rychlosti a Machova čísla. V případě Machova č. na vstupu nabývá hodnot 0,75, po délce potrubí stoupá až na hodnotu 1 na výstupu z potrubní trasy. V průběhu hodnot je patrné i místo kolene v potrubní trase ve vzdálenosti zhruba $2 \div 3$ [m] kde jsou hodnoty vyšší, stejně tak tím i rychlosti vyšší a následně za kolenem v přímé části potrubí se hodnoty na počátku snižují a dále pak pokračuje trend mírného zvyšování až do konce potrubní trasy. Rychlost na vstupu dosahuje $404,056 [m \cdot s^{-1}]$ a následně na výstupu $562,438 [m \cdot s^{-1}]$. Přesné hodnoty v oblasti kolene jsou uvedeny v Příloze B Tab 3.



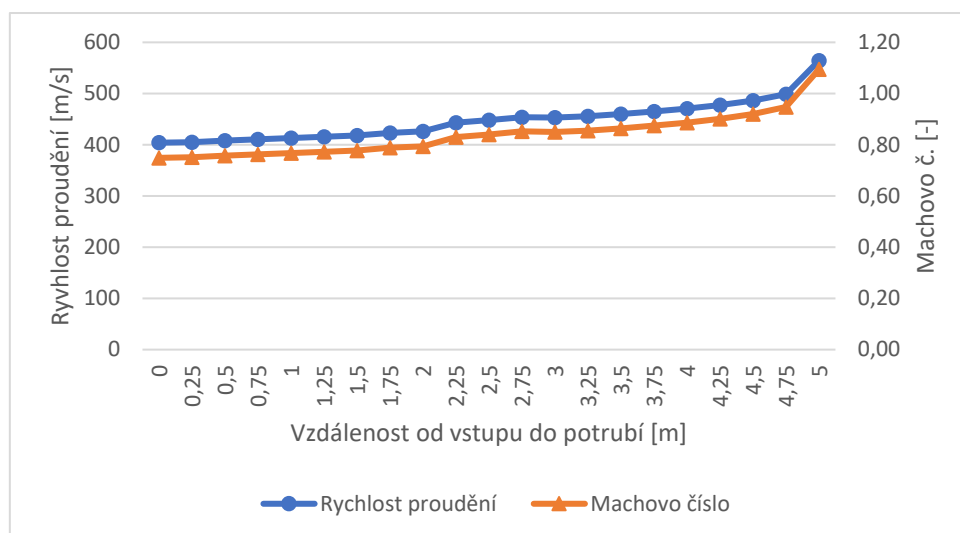
Graf 10 Varianta 2 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha

Při zkoumání vývoje hodnot pro statický tlak a statickou teplotu (Graf 11) je opět zřetelná oblast změny směru proudu, tedy oblast kolene. Teplota na vstupu do potrubí nabývá hodnoty 208,402 [°C] s přibývajícím délkou potrubí klesá až do vzdálenosti přibližně 2 [m], následuje prudší pokles mezi místy 2 [m] a 2,25 [m], dále klesá až do vzdálenosti 2,75 [m], kde se hodnota trochu zvýší v oblasti přímého potrubí a následně postupně klesá až na hodnotu 166,219 [°C] na výstupu z potrubní trasy. Velmi podobný vývoj lze pozorovat i u hodnot tlaku, kde na vstupu do potrubí tlak nabývá hodnoty 672,979 [kPa], v oblasti kolene se vzrůstající rychlostí klesá rychleji než v oblasti přímého potrubí a následně opouští potrubní trasu na výstupu s hodnotou 394,394 [kPa]. Přesné hodnoty po celé délce potrubí, a hlavně v oblasti kolene jsou uvedeny v Příloze B Tab 3



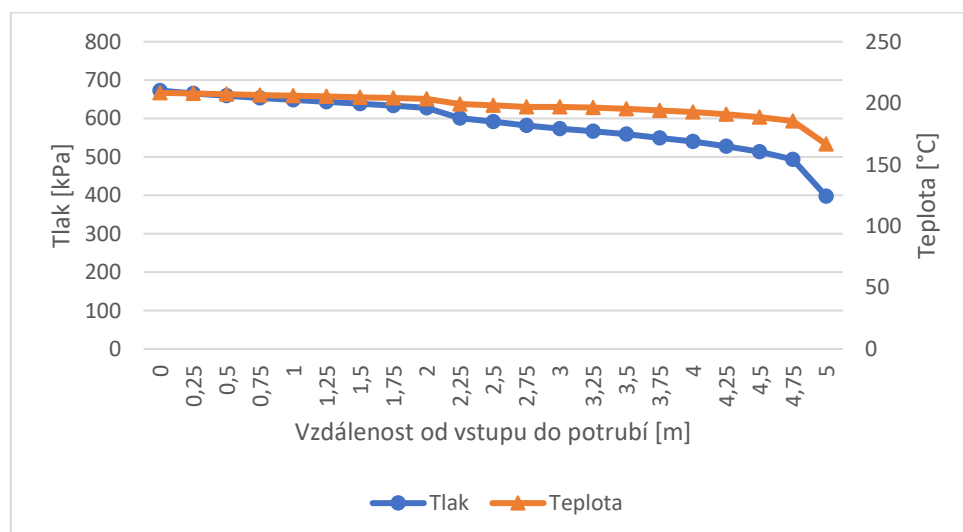
Graf 11 Varianta 2 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha

Pro hodnoty zjištěné pomocí průměrování hmotnostního toku v Graf 12 a Graf 13 se téměř shodují s grafy Graf 10 a Graf 11. Rychlost proudění při použití průměrování přes hmotnostní tok se liší o 0,924 [$m \cdot s^{-1}$] oproti hodnotám průměrovaným přes plochu na začátku potrubní trasy a o 1,911 [$m \cdot s^{-1}$] na konci potrubní trasy. Machovo číslo při zaokrouhlení na dvě desetinná místa je v obou případech totožné.



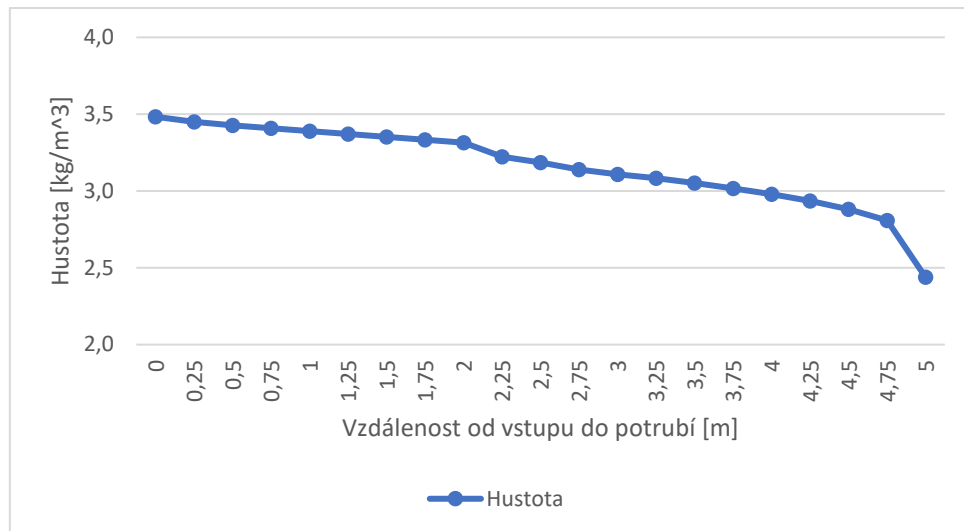
Graf 12 Varianta 2 - Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č. - hmotnostní tok

Jednotlivé hodnoty tlaku se liší o 43 [Pa] na vstupu do potrubní trasy a o 3676 [Pa] na výstupu. Pro teplotu nabývá rozdíl 0,005 [°C] na vstupu a 0,423 [°C] na výstupu. V průběhu je zřetelné vychýlení v oblasti zakřivení potrubní trasy a také výraznější snížení hodnot v posledním úseku potrubní trasy nejspíše z důvodu zaokrouhlování.



Graf 13 Varianta 2 - Průběh hodnot tlaku a teploty – hmotnostní tok

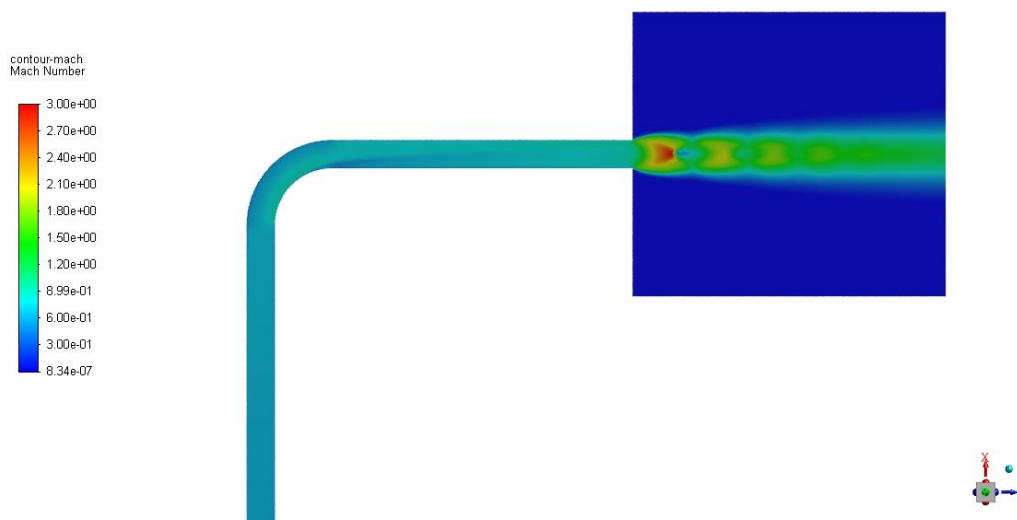
V případě hustoty, jejíž průběh hodnot je zobrazen v Graf 14, vykazuje klesání hodnot z počáteční 3,483 [kg · m⁻³]. V místě zakřivení potrubí průměrná hodnoty hustoty vykazovala větší rozdíl mezi sledovanými místy 2 ÷ 2,25 [m] a to 0,92 [kg · m⁻³]. Dále hodnota klesala v řádu setin až na poslední sledovaný úsek 4,75 ÷ 5 [m], kde výstupní hodnota byla 2,439 [kg · m⁻³].



Graf 14 Varianta 2 - Průběh hodnot hustoty – plocha

Průběhy hodnot hustoty získané průměrováním v rovině řezu přes hmotnostní tok jsou, z důvodu minimálního rozdílu oproti průměrování hodnot přes plochu, uvedeny v Příloze B Tab. 4.

Pro grafické znázornění rozložení jednotlivých proměnných byl vybrán řez rovinou při pohledu shora rovnoběžnou s podstavou ve výšce osy potrubí pro zachycení celé potrubní trasy. Dále byl pro případ popisu rychlosti proudění a Machovo č. vybrán detailnější pohled na oblast kolene ve stejném pohledu na stejné rovině řezu.



Obr. 21 Varianta 2 - Machovo číslo

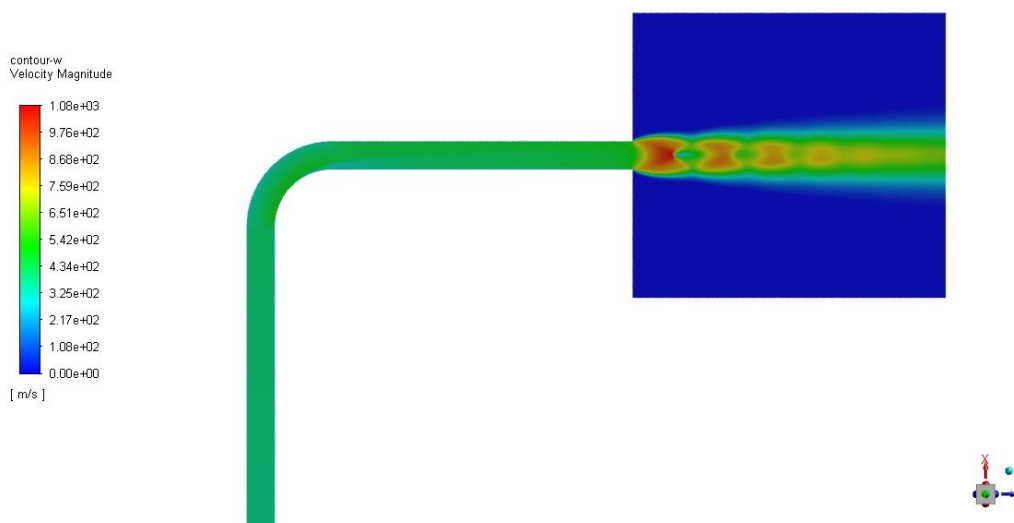


Obr. 22 Varianta 2 - Machovo číslo – detail

Stejně jako tomu bylo u Varianty 1 lze na výstupu do atmosféry za koncovou částí potrubní trasy vidět prudké zvýšení Machova č. až k hodnotám 3 a následné skokové snížení, což reprezentuje tlakovou vlnu. Zajímavou částí potrubní trasy je koleno, detailněji zobrazeno na Obr. 22, kde je znatelně vidět zvýšení rychlosti a tedy Machova č. v oblasti bližší vnitřnímu poloměru kolena a směrem po proudu následně odtržení mezní vrstvy reprezentované nízkými hodnotami Machova č. na vnitřním průměru zhruba v polovině a dále u stejné hrany směrem po proudu. Naopak u protější hrany na větším průměru ohybu dochází k narážení proudu na stěnu a jeho zpomalování, tudíž snižování hodnot Machova č.

Na následujícím Obr. 23 je znázorněno rozložení tlaku. Oblast výstupu do atmosféry je takřka totožná s Variantou 1 pouze s rozdílem maximálních hodnot rychlostí v oblasti rázových vln. Maximální rychlost zobrazena na Obr. 23 je $1080 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ v oblasti první rázové vlny za výstupem z potrubní trasy a následuje soustava rázových vln.

Detailnější pohled na rozložení rychlosti v oblasti zakřivení potrubní trasy poskytuje Obr. 24. Jak již bylo popsáno v případě Machova č. je patrné snížení rychlosti proudění u vnitřního poloměru zakřivení potrubí, za kterým následuje ovlivněná oblast odtržením mezní vrstvy proudu a rychlost je zde výrazně nižší než v oblasti osy potrubní trasy. Stejně tak nastává zpomalení proudu na vnějším poloměru zakřivení v důsledku narážení proudu na stěnu potrubí

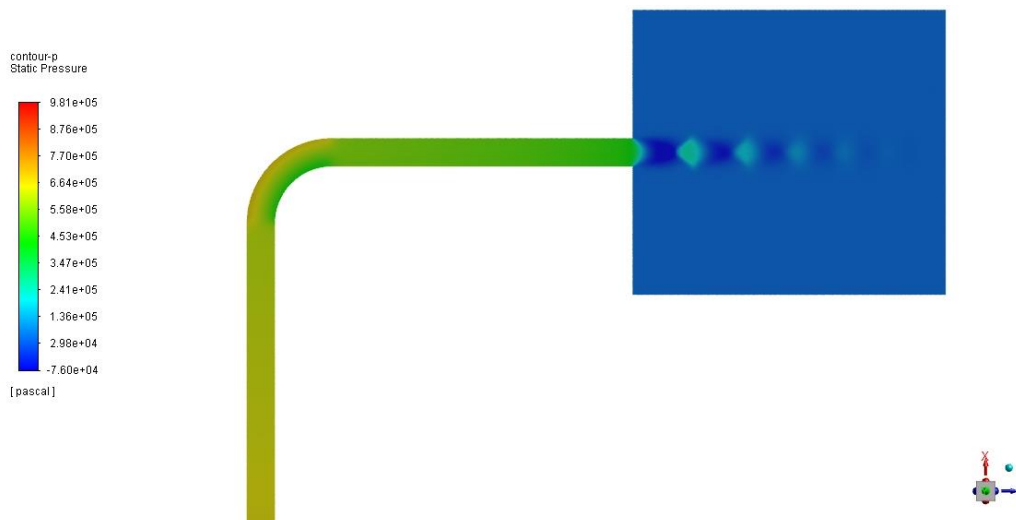


Obr. 23 Varianta 2 – Rychlost proudění

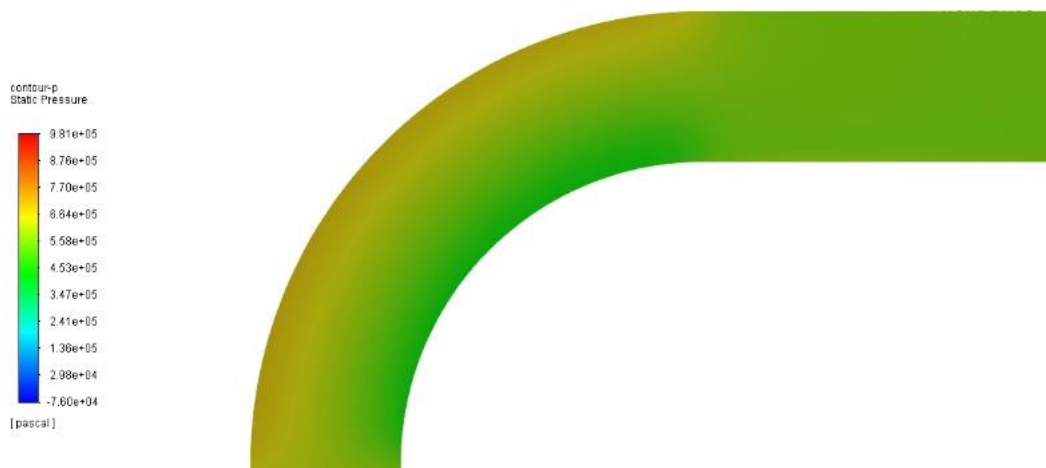


Obr. 24 Varianta 2 – Rychlost proudění – detail

Rozložení statického tlaku na Obr. 25 potvrzuje soustavu rázových vln na výstupu z potrubní trasy do atmosféry. Jak již bylo patrné z grafu, statický tlak po celou délku potrubní trasy klesá, což je znatelné i ze změny barvy v obrázku a při detailnějším pohledu na místo ohybu potrubní trasy. Na Obr. 26 je patrný rozdíl tlaků na vnitřním a vnějším poloměru zakřivení potrubní trasy. Vlivem narážení proudu a jeho zpomalování na vnějším průměru ohybu vzrůstá i statický tlak který je právě funkcí rychlosti proudění a jak již bylo popsáno, rychlost proudění v tomto místě také klesá. Na straně vnitřního poloměru je statický tlak výrazně nižší, což odpovídá zvýšené rychlosti proudění u této stěny.



Obr. 25 Varianta 2 – Tlak



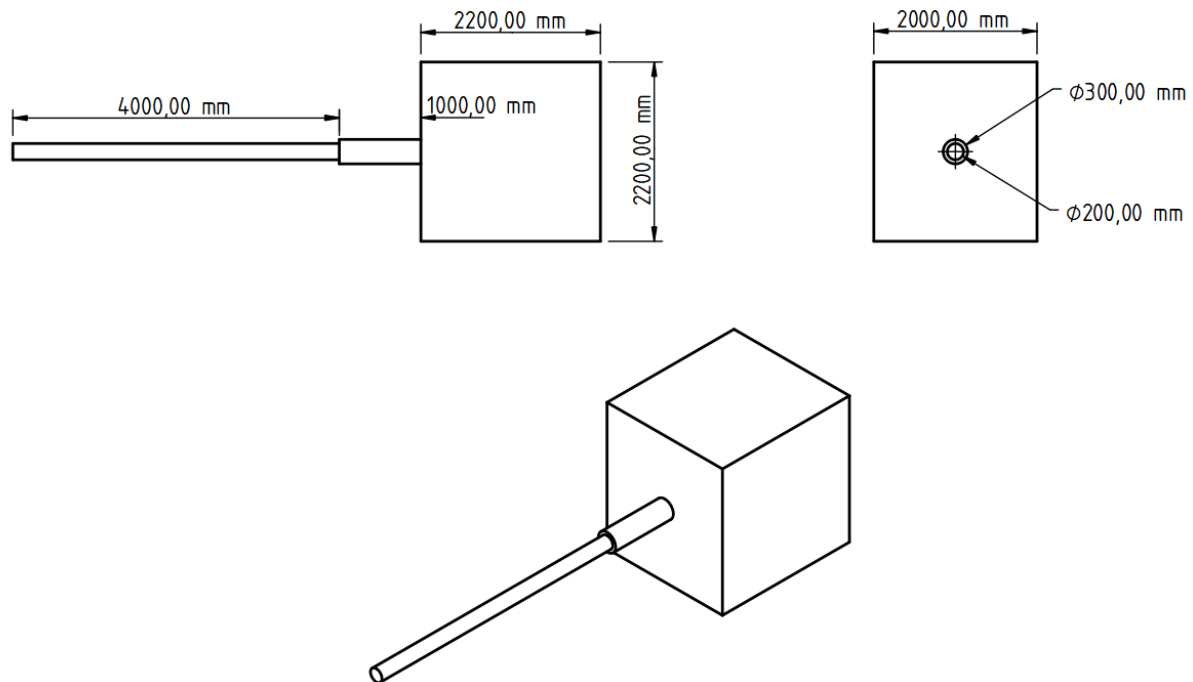
Obr. 26 Varianta 2 – Tlak – detail

5.4. CFD analýza proudění v přímém potrubí rozšiřujícího se průřezu při podmínkách profuku – Varianta 3

Geometrie pro Variantu 3 zobrazena na Obr. 27 byla vytvořena s jedním rozšířením ve vzdálenosti 4 [m] od vstupu potrubí. Tato geometrie byla vytvořena nejen za účelem sledování odchylky v místě rozšíření oproti analytickému výpočtu, který pracuje s předpokladem konstantního průřezu potrubí, ale také s odkazem na již uskutečněné praktické provedení s cílem snížit hladinu zvuku. V koncové části byl vytvořen reprezentační objem atmosféry, který má zachytit změnu charakteristik proudění po výstupu z potrubí. Porovnání následných výsledků s ostatními geometriemi a Fannovo prouděním je uvedeno v Kapitole 6. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Tab. 7 a vlastnosti výpočetní sítě v Tab. 12.

Počet výpočetních buněk	4 294 514
Max. velikost buňky	0,05 [m]
Max. velikost buňky v Body of Influence	0,02 [m]
Velikost první buňky u stěny v potrubní trase	$5 \cdot 10^{-7}$ [m]
Velikost první buňky u stěny mimo potrubí	$1 \cdot 10^{-5}$ [m]
Čas generování sítě	22,56 [min]
Čas numerické simulace	64,8 [hod]

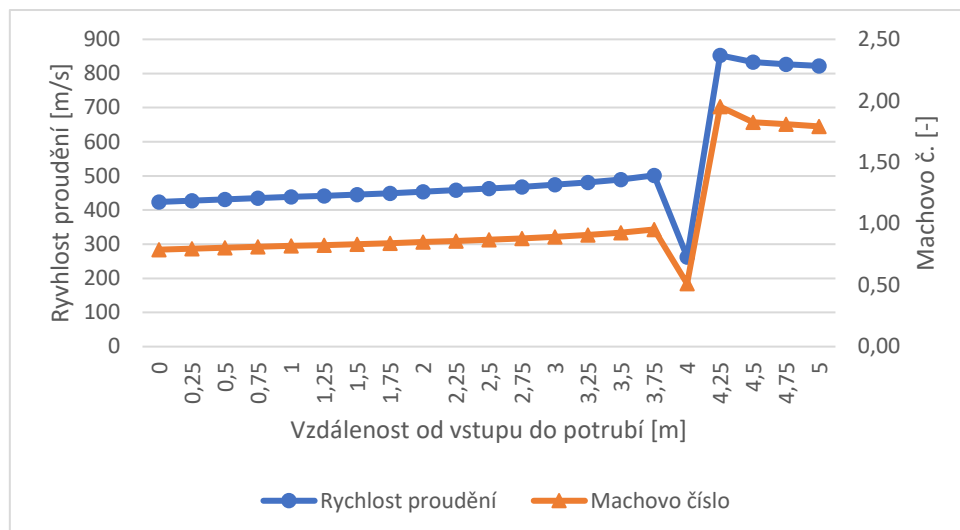
Tab. 12 Varianta 3 - vlastnosti výpočetní sítě



Obr. 27 Geometrie – Varianta 3

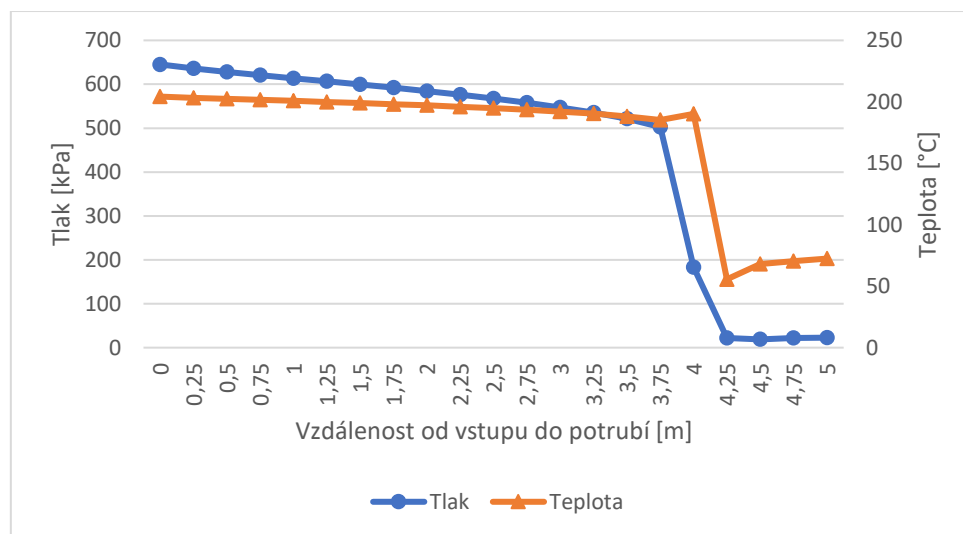
Stejně jako v předchozích případech byly jednotlivé hodnoty proměnných posuzovány vždy v průměrných hodnotách na řezu kolmém k ose potrubí ve vzdálenosti jednotlivých míst 0,25 [m]. Pro získání výsledků byly použity dvě metody průměrování, a to metoda průměru z plochy, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 5 a metoda průměrování hmotnostního toku, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 6. Vývoj hodnot je popsán u grafů průběhu jednotlivých proměnných.

Graf 15 zobrazující průběh hodnot rychlosti proudění a Machova čísla ukazuje velmi zřetelně, jak se měnily průběhy právě v oblasti rozšíření potrubní trasy. V Graf 15 ve vzdálenosti 4 [m] od vstupu do potrubí se nachází rozšíření, tudíž při odečtení průměrné hodnoty rychlosti případně Machova č. je započítána se stejnou vahou plocha uprostřed proudu stejně tak jako u vnitřní stěny širšího potrubí, kde je hodnota výrazně nižší než před rozšířením. V následujícím sledovaném místě ve vzdálenosti 4,25 [m] nabývá rychlost téměř dvojnásobku rychlosti před rozšířením potrubní trasy a stejně tak Machovo č. Hodnoty na vstupu do potrubní trasy jsou pro rychlost proudění $423,536 [m \cdot s^{-1}]$ a Machovo č. 0,79 a na výstupu pro rychlost proudění $423,558 [m \cdot s^{-1}]$ a Machovo č. 1,79



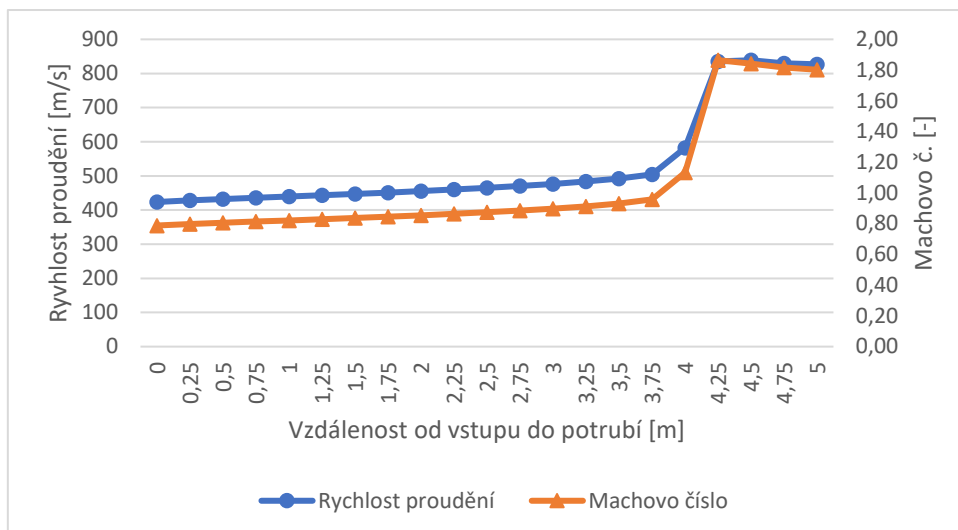
Graf 15 Varianta 3 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha

Hodnoty tlaku a teploty znázorněné v Graf 16 vykazují prudkou změnu v oblasti rozšíření potrubní trasy. V tomto místě ve vzdálenosti 3,75 ÷ 4 [m] tlak klesá přibližně na poloviční hodnotu a dále pak do vzdálenosti 4,25 [m]. Následuje vývoj tlaku na lehce vyšší hodnoty. V případě teploty dochází k mírnému zvýšení zhruba o 5 [°C] mezi místy 4 ÷ 4,25 [m] a následuje prudký pokles na třetinovou hodnotu v dalším měřicím místě. Následně se hodnoty teploty mírně zvyšují po délce potrubí. Na vstupu potrubí teplota nabývá hodnoty 204,273 [°C] a tlak 645,161 [kPa].



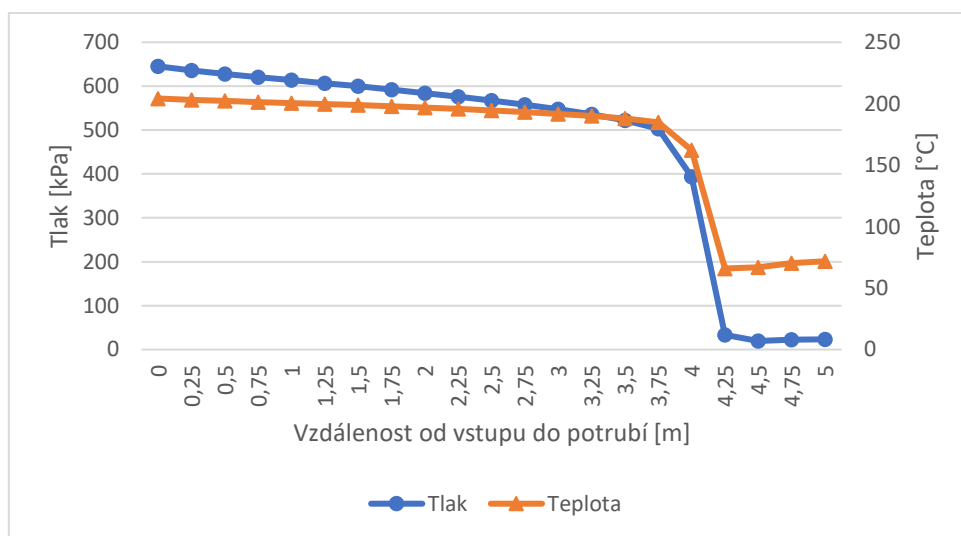
Graf 16 Varianta 3 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha

Při použití průměrování hodnot přes hmotnostní tok neklesají hodnoty rychlosti a Machova č. v úseku 3,75 ÷ 4 [m] a naopak stoupají. Je to dáno právě způsobem průměrování, kde oblast úplavu v potrubí má malou váhu z důvodu malého hmotnostního toku. Hodnoty oproti prvnímu způsobu průměrování se liší o 0,022 [m · s⁻¹] pro rychlost a Machovo č. zůstává stejné na vstupu. Naopak na výstupu z potrubí se Machovo č. liší o 0,01 a rychlost o 4,273 [m · s⁻¹]

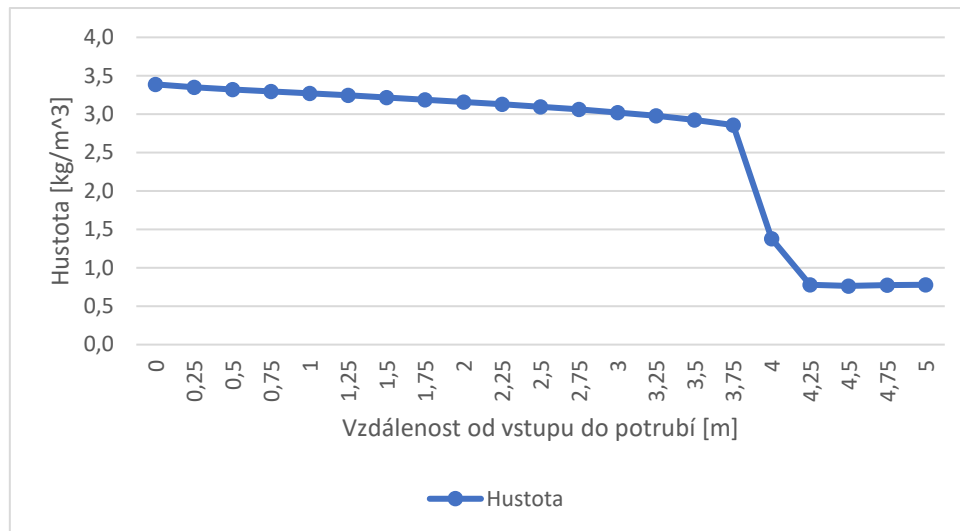


Graf 17 Varianta 3 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok

Více spojitý průběh u hodnot tlaku a teploty oproti prvnímu způsobu průměrování je zřejmý z Graf 18. Teplota zde v úseku 3,75 ÷ 4 [m] nestoupá a naopak klesá, stejně tak jako tlak, který ale je reprezentován vyšší hodnotou než v případě průměrování přes plochu. Ve vztahu k hodnotám v Graf 16 se hodnoty tlaku ne liší na vstupu a liší o 734 [Pa] na výstupu a hodnoty teploty o 0,001 [°C] na vstupu a o 0,617 [°C] na výstupu.



Graf 18 Varianta 3 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok



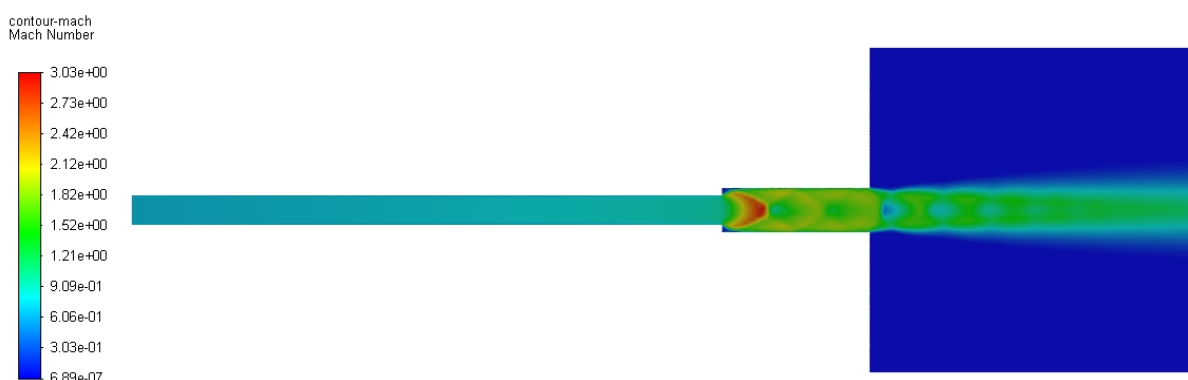
Graf 19 Varianta 3 - Průběh hodnot hustoty – plocha

Hodnoty hustoty pro Variantu 3 začínaly na $3,388 [kg \cdot m^{-3}]$, dále po délce potrubní trasy klesaly v řádu setin mezi jednotlivými sledovanými místy. Ve vzdálenosti $3,75 \div 4,25 [m]$ v oblasti rozšíření potrubí hodnota poklesla o $2,079 [kg \cdot m^{-3}]$ a nadále se do vzdálenosti výstupu do atmosféry pohybovala kolem výstupní hodnoty $0,777 [kg \cdot m^{-3}]$.

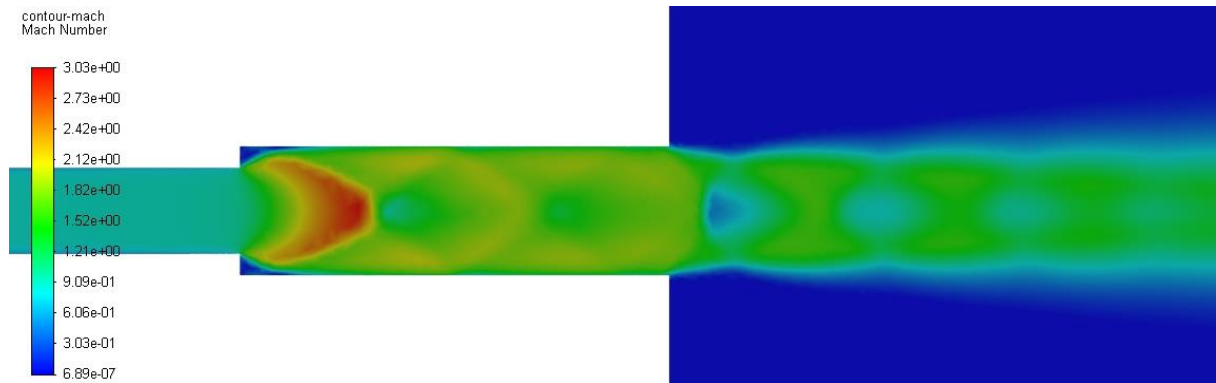
Průběhy hodnot hustoty získané průměrováním v rovině řezu přes hmotnostní tok jsou, z důvodu minimálního rozdílu oproti průměrování hodnot přes plochu, uvedeny v Příloze B Tab. 6.

Pro grafické znázornění jednotlivých proměnných byla vybrána rovina řezu kolmá k ose potrubí a pro lepší představu v oblasti rozšíření použitím stejné roviny řezu vybrán detail potrubní trasy od místa rozšíření až po konec potrubní trasy.

Na prvních dvou obrázcích (Obr. 28, Obr. 29) jsou zobrazeny hodnoty Machova č. Od vstupu do potrubí vlevo se hodnoty jen mírně mění po délce potrubní trasy až k rozšíření, kde vlivem zvýšení průměru potrubí nastává urychlení proudu. Detailněji na Obr. 29 je vidět prudké zvýšení hodnoty až na 3,03 a následnou soustavu tlakových vln, které pokračují až k výstupu do atmosféry.

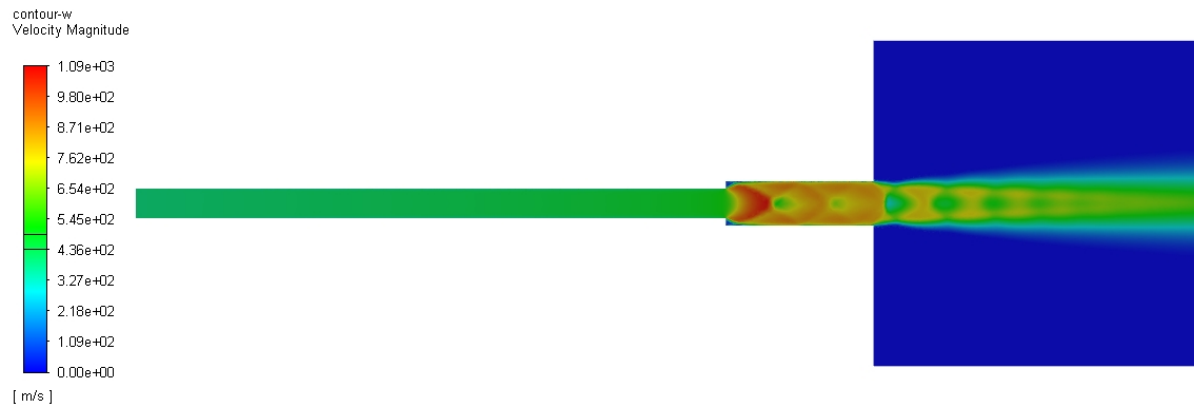


Obr. 28 Varianta 3 - Machovo číslo

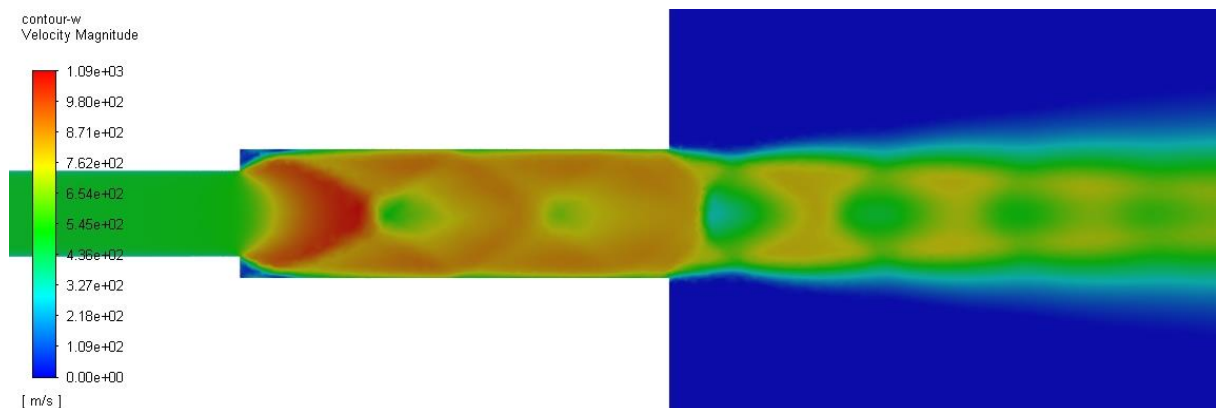


Obr. 29 Varianta 3 - Machovo číslo – detail

Jelikož se Machovo č. odvíjí od rychlosti proudění, velmi podobný obrázek poskytuje rozložení rychlosti na Obr. 30 a následně detailněji oblast rozšíření na Obr. 31. V místě změny průměru potrubí dochází k urychlení proudu až na hodnoty okolo $1090 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ a následuje soustava tlakových vln, kde se rychlost proudění skokově mění až k výstupu do atmosféry a dále. Nejvýraznější změny v rychlosti proudění lze pozorovat za rozšířením potrubní trasy a za výstupem do atmosféry.



Obr. 30 Varianta 3 - Rychlost proudění

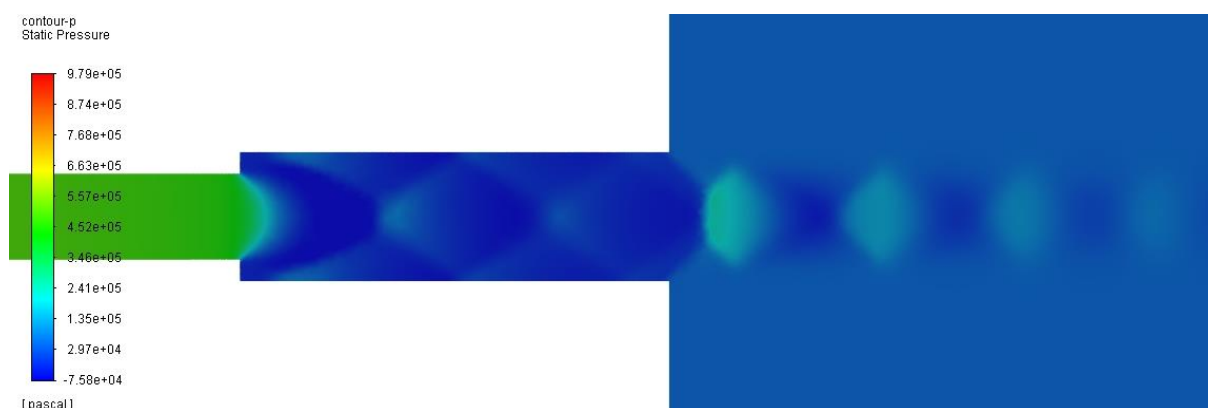


Obr. 31 Varianta 3 - Rychlost proudění – detail

Nejlépe jsou tlakové vlny vyobrazeny pomocí statického tlaku na Obr. 32 a následně detailněji na Obr. 33. Za místem rozšíření je zřetelná změna hodnot tlaku právě v místě rázové vlny a následně i za výstupem do atmosféry. Místa s nejnižšími hodnotami statického tlaku odpovídají místům s nejvyšší rychlostí proudění, potažmo nejvyšší hodnotou Machova č.



Obr. 32 Varianta 3 – Tlak



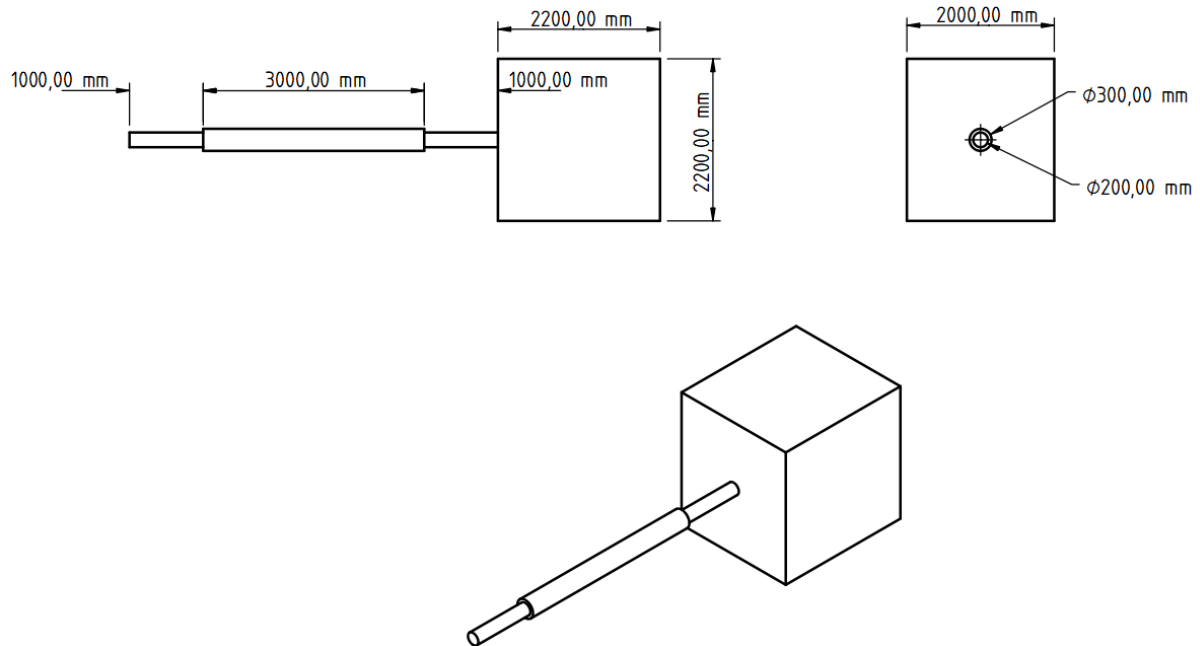
Obr. 33 Varianta 3 – Tlak – detail

5.5. CFD analýza proudění v přímém potrubí rozšiřujícího a zužujícího se průřezu při podmínkách profuku – Varianta 4

Geometrie pro Variantu 4 byla vybrána na základě praktických postupů, kdy nejen trvalé potrubní trasy pro vedení páry mohou měnit svůj průměr po své délce, ale i provizorní potrubní trasy vytvořené jen pro profuky parou jsou tvořeny z různých typů potrubí, a tedy potrubní trasa může obsahovat rozšíření a zúžení zároveň. V koncové části byl vytvořen reprezentační objem atmosféry, který má zachytit změnu charakteristik proudění po výstupu z potrubí. Porovnání následných výsledků s ostatními geometriemi a Fannovo prouděním je uvedeno v Kapitole 6. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Tab. 7 a vlastnosti výpočetní sítě v Tab. 13.

Počet výpočetních buněk	4 360 234 [–]
Max. velikost buňky	0,05 [m]
Max. velikost buňky v Body of Influence	0,02 [m]
Velikost první buňky u stěny v potrubní trase	$5 \cdot 10^{-7}$ [m]
Velikost první buňky u stěny mimo potrubí	$1 \cdot 10^{-5}$ [m]
Čas generování sítě	26,73 [min]
Čas numerické simulace	69,6 [hod]

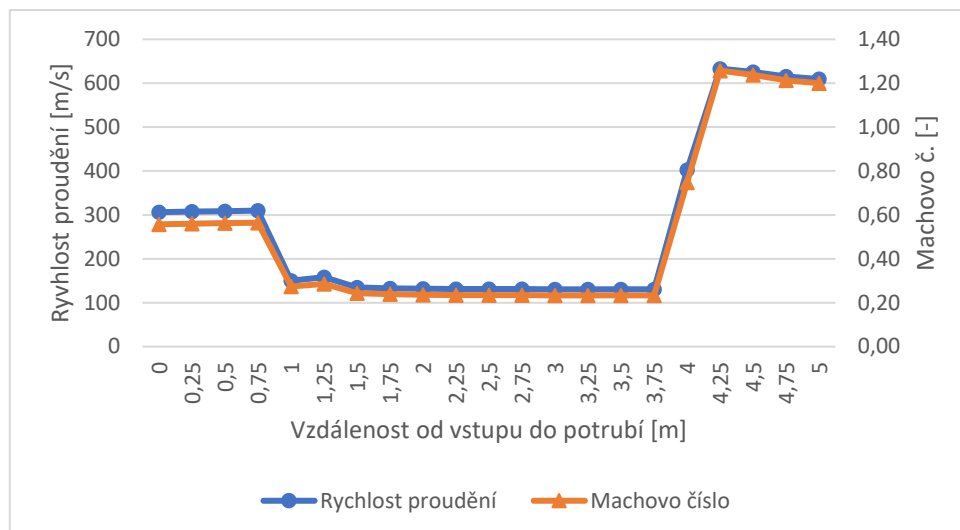
Tab. 13 Varianta 4 - vlastnosti výpočetní sítě



Obr. 34 Geometrie – Varianta 4

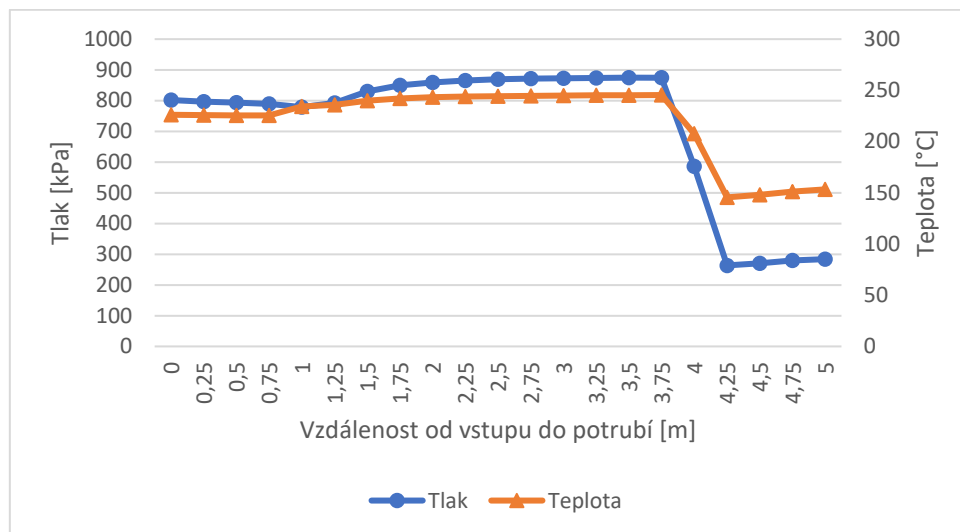
Stejně jako v předchozích případech byly jednotlivé hodnoty proměnných posuzovány vždy v průměrných hodnotách na řezu kolmém k ose potrubí ve vzdálenosti jednotlivých míst 0,25 [m]. Pro získání výsledků byly použity dvě metody průměrování, a to metoda průměru z plochy, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 7 a metoda průměrování hmotnostního toku, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Příloze B Tab. 8. Vývoj hodnot je popsán u grafů průběhu jednotlivých proměnných.

Průběhy hodnot rychlosti proudění a Machova čísla jsou znázorněny v Graf 20. Jsou zde patrné dvě místa skokových změn parametrů, a to ve vzdálenosti $0,75 \div 1$ [m], což odpovídá vzdálenosti rozšíření potrubní trasy, a ve vzdálenosti $3,75 \div 4,25$ [m], což odpovídá místě zúžení potrubní trasy. Lze vypořádat z grafu rozdíl mezi rozšířením, kde se hodnoty snižovaly na polovinu a místem zúžení potrubí, kde hodnoty vzrostly až na šestnásobek oproti hodnotám před zúžením. V ostatních částech potrubní trasy se hodnoty měnily jen v řádu procent. Vstupní hodnota rychlosti byla $306,038$ [$m \cdot s^{-1}$] a výstupní $609,938$ [$m \cdot s^{-1}$]. Pro hodnotu Machova č. platilo 0,56 na vstupu a 1,20 na výstupu, tedy nadzvuková rychlost při výstupu do atmosféry.



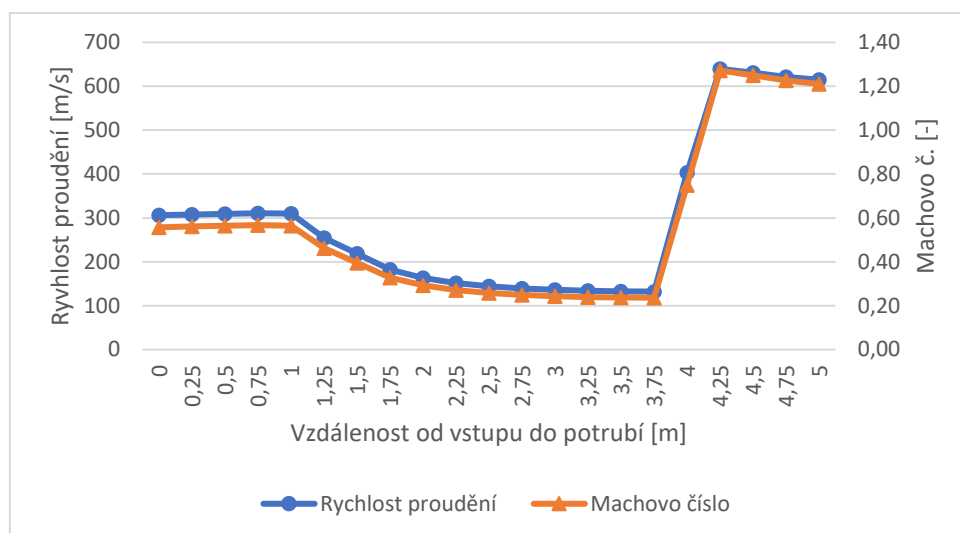
Graf 20 Varianta 4 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha

Jak je patrné z následujícího grafu (Graf 21), nedocházelo k výraznějším změnám hodnot teploty a tlaku ve vzdálenosti 0,75 ÷ 1 [m] od vstupu do potrubí, tedy oblasti rozšíření potrubí. Výrazné změny však nastaly v druhé oblasti změny průměru, a to zúžení ve vzdálenosti 3,75 ÷ 4,25 [m] od vstupu do potrubí, kde hodnota tlaku poklesla až na jednu třetinu a hodnota teploty na jednu polovinu původní hodnoty. Tlak na vstupu do potrubí odpovídal 801,626 [kPa] a 284,054 [kPa] na výstupu do atmosféry. Teplota nabývala hodnot 226,194 [°C] na vstupu a 153,19 [°C] na výstupu.



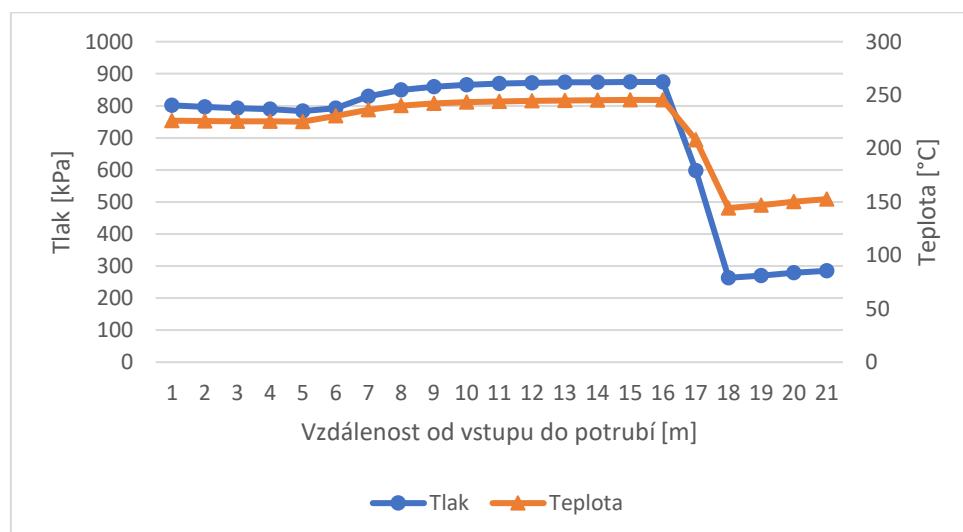
Graf 21 Varianta 4 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha

Při pohledu na průběh hodnot rychlosti proudění a Machova č. v Graf 22 při použití metody průměrování hodnot přes hmotnostní tok je patrná mírnější změna co se týče oblasti rozšíření potrubí. V druhé oblasti, oblasti zúžení, je již změna srovnatelná s předchozím způsobem průměrování hodnot. Rozdíl rychlosti proudění oproti průměrování hodnot přes plochu je v rámci rychlosti proudění o 0,002 [m · s⁻¹] na vstupu a o 4,871 [m · s⁻¹] na výstupu. V případě Machova č. se rozdíl vyskytuje pouze na výstupu do atmosféry a to 0,01.



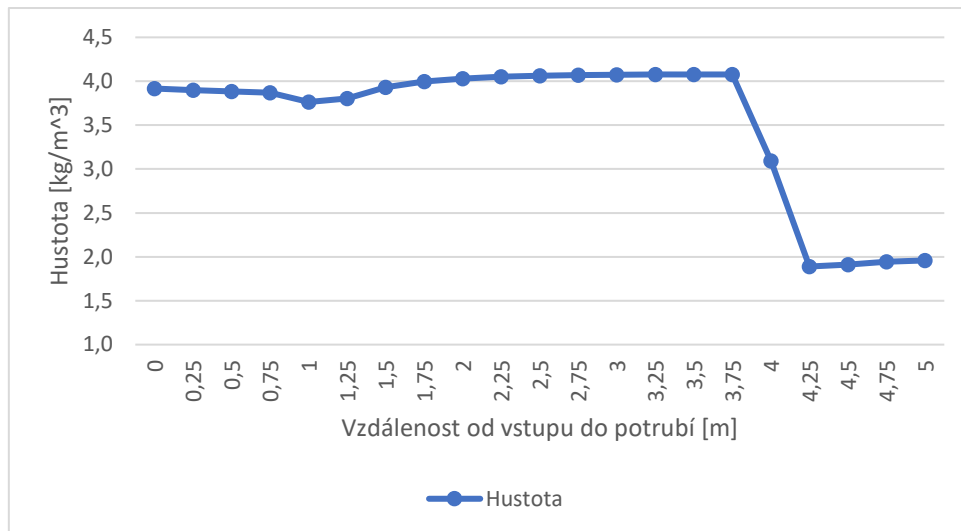
Graf 22 Varianta 4 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok

Pro průběh hodnot teploty a tlaku získaných průměrováním přes hmotnostní tok znázorněných v Graf 23 není patrný žádný velký rozdíl oproti předchozí metodě průměrování. Hodnoty tlaku jsou rozdílné v závislosti na metodě průměrování přes plochu pouze na výstupu a to o 872 [Pa]. Pro hodnoty teploty je rozdíl také pouze na výstupu a to sice 0,668 [°C]



Graf 23 Varianta 4 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok

Průběh hodnot hustoty v Graf 24 zobrazuje ve vzdálenostech rozšíření 0,75 ÷ 1,25 [m], kde hodnota poklesla ze vstupní hodnoty 3,918 [kg · m⁻³] na 3,760 [kg · m⁻³], a zúžení 3,75 ÷ 4,25 [m], kde hodnota klesla o 2,180 [kg · m⁻³] ke koncové hodnotě na výstupu do atmosféry 1,960 [kg · m⁻³].



Graf 24 Varianta 4 - Průběh hodnot hustoty – plocha

Průběhy hodnot hustoty získané průměrováním v rovině řezu přes hmotnostní tok jsou, z důvodu minimálního rozdílu oproti průměrování hodnot přes plochu, uvedeny v Příloze B Tab. 8.

Pro grafické znázornění pomocí kontur byla vybrána rovina řezu kolmá k ose potrubí a dále ke každému detail potrubí v rozšíření oblasti zachycující jednak rozšíření a jednak zúžení potrubí. Na prvních dvou obrázcích (Obr. 35 Obr. 36) jsou vyobrazeny kontury Machova č. Jak je možné na obou obrázcích vidět, v oblasti rozšíření hodnota klesá a v místě úplavu je takřka nulová, a naopak v místě zúžení potrubí se skokově mění až na hodnoty nadzvukového proudění okolo $M = 1,3$. Při výstupu do atmosféry dochází k expanzi a výraznému zvýšení hodnot neboli zvýšení rychlosti proudění, které vede až k vytvoření soustavy rázových vln, jako v předchozích variantách jednotlivých geometrií.



Obr. 35 Varianta 4 - Machovo číslo



Obr. 36 Varianta 4 - Machovo číslo – detail

Rychlost proudění vyobrazena na Obr. 37 a v detailu ještě na Obr. 38 odpovídá hodnotám Machova č. z předchozích obrázků. V oblasti rozšíření se rychlost snižuje až do místa zúžení potrubí, kde se naopak skokově mění na nadzvukové hodnoty okolo $630 [m \cdot s^{-1}]$. V místě výstupu do atmosféry se proud dále urychluje a vznikají skokové změny v soustavě rázových vln.



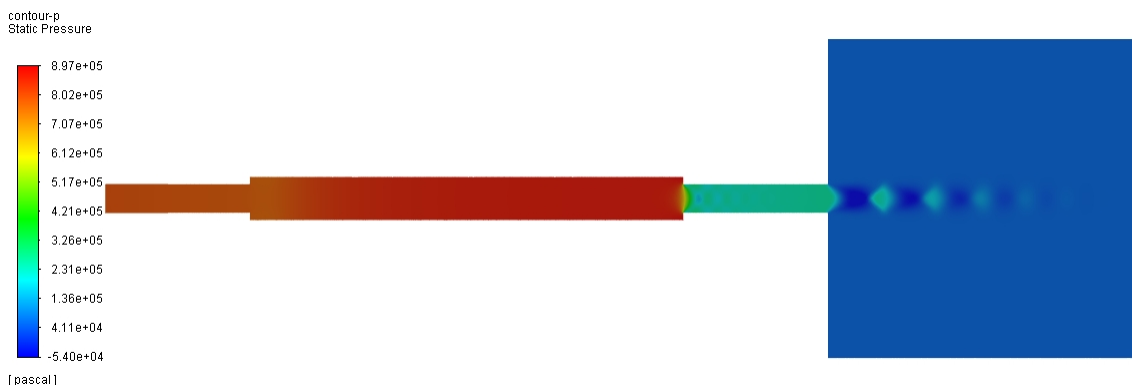
Obr. 37 Varianta 4 - Rychlost proudění



Obr. 38 Varianta 4 - Rychlost proudění – detail

Názornou představu o místě vytváření soustavy rázových vln poskytuje zobrazení tlaku na Obr. 39 a detailu na Obr. 40. Statický tlak vykazuje vysoké hodnoty až do míst druhé změny průměru potrubí, tedy do místa zúžení, kde se poté vytváří rázová vlna a statický tlak se skokově mění na hodnoty odpovídající nadzvukovému proudění. Na výstupu do atmosféry se vlivem expanze vytváří soustava rázových vln. Celkové rozložení tlaku v potrubní trase koresponduje s rozložením rychlosti a hodnot Machova č., kde se zvyšujícím se tlakem následující dvě hodnoty klesají. Oproti Variantě 3, která obsahovala pouze rozšíření potrubní trasy nedochází

v tomto případě k dosahování nadzvukových parametrů již v oblasti rozšířené potrubní trasy, ale naopak ke snížení rychlosti proudění a zvýšení statického tlaku. Překonání hranice rychlosti zvuku nastává až v místě zúžení potrubní trasy.



Obr. 39 Varianta 4 - Tlak



Obr. 40 Varianta 4 - Tlak – detail

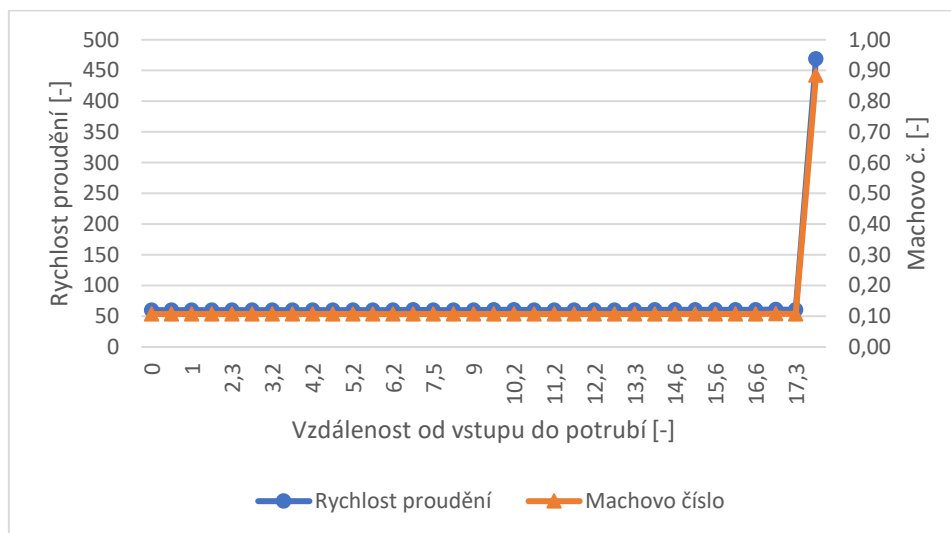
5.6. CFD analýza proudění v reálné trase parního profuku.

Pro poslední variantu geometrie, tedy reálnou geometrii byl získán od firmy Doosan Škoda Power technický výkres, který se nachází v Příloze D. Z důvodu rozdílné délky potrubní trasy oproti analytickému výpočtu pro porovnání s variantami 1 až 4 byl analytický výpočet proveden pro délku 17,6 [m], tedy délku reálné potrubní trasy a výpočetní místa byla upravena podle možností zjišťování hodnot z výsledků numerické simulace. Hodnoty získané teorií Fannova proudění jsou uvedeny v Příloze C Tab. 11. Jako u jednotlivých variant i pro reálnou geometrii byl v koncové části vytvořen reprezentanční objem atmosféry, který má zachytit změnu charakteristik proudění po výstupu z potrubí. Porovnání následných výsledků s ostatními geometriemi a Fannovo prouděním je uvedeno v Kapitole 6. Okrajové podmínky jsou uvedeny v Tab. 7 a vlastnosti výpočetní sítě v Tab. 12

Počet výpočetních buněk	5 664 932
Max. velikost buňky	0,05 [m]
Max. velikost buňky v Body of Influence	0,02 [m]
Velikost první buňky u stěny v potrubní trase	$5 \cdot 10^{-7}$ [m]
Velikost první buňky u stěny mimo potrubí	$1 \cdot 10^{-5}$ [m]
Čas generování sítě	38,5 [min]
Čas numerické simulace	76,8 [hod]

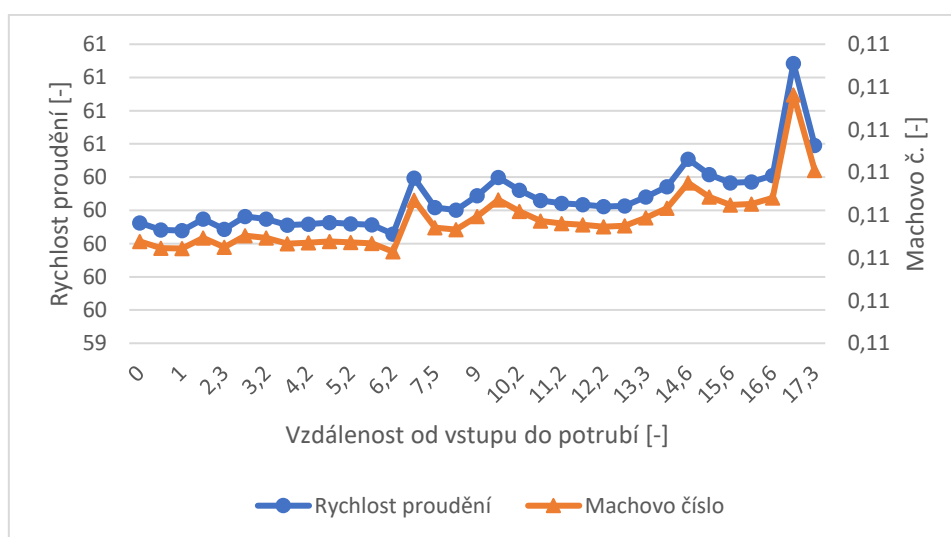
Tab. 14 Varianta R – vlastnosti výpočetní sítě

Při zkoumání průběhu hodnot v reálné geometrii docházelo k prudké změně parametrů proudění v koncové části potrubní trasy, která je v tomto místě zúžena. Jak znázorňuje Graf 25, při zobrazení včetně poslední hodnoty před vstupem do atmosféry, je nemožné získat představu o průběhu hodnot po délce potrubní trasy, protože změny po délce potrubní trasy jsou v porovnání se změnou v již zmiňované konvergentní části potrubí před vstupem do atmosféry minimální. Z tohoto důvodu byly z grafů vynechány poslední hodnoty, které jsou však stále uvedeny v Příloze B Tab. 10.



Graf 25 Varianta R – průběh hodnot po celé délce potrubní trasy

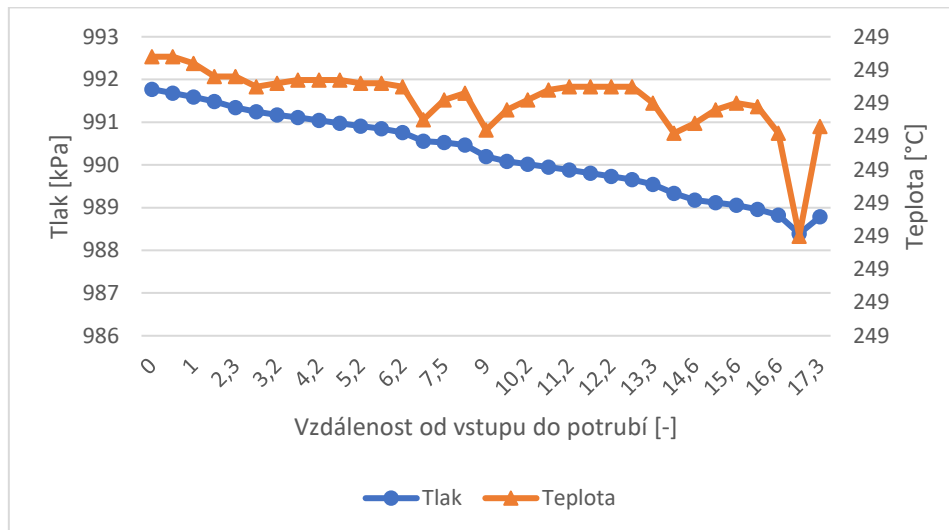
Průběh hodnot v prvním grafu obsahující hodnoty rychlosti proudění a Machova čísla Graf 26 nevykazuje žádné prudké změny mezi jednotlivými hodnotami. Důležitá je hodnota Machova čísla, která nepřesahuje po délce potrubní trasy až do vzdálenosti 17,3 [m] od vstupu hodnotu 0,12. Stejně tak rychlost proudění nevykazuje výchylky větší než $1 [m \cdot s^{-1}]$. Největší výchylky jsou v oblastech zakřivení potrubní trasy. Hodnota rychlosti je na vstupu do potrubí $60,125 [m \cdot s^{-1}]$ a na výstupu z potrubí $469,024 [m \cdot s^{-1}]$. Hodnoty Machova č na vstupu nabývají 0,11 a 0,88 na výstupu.



Graf 26 Varianta R – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha

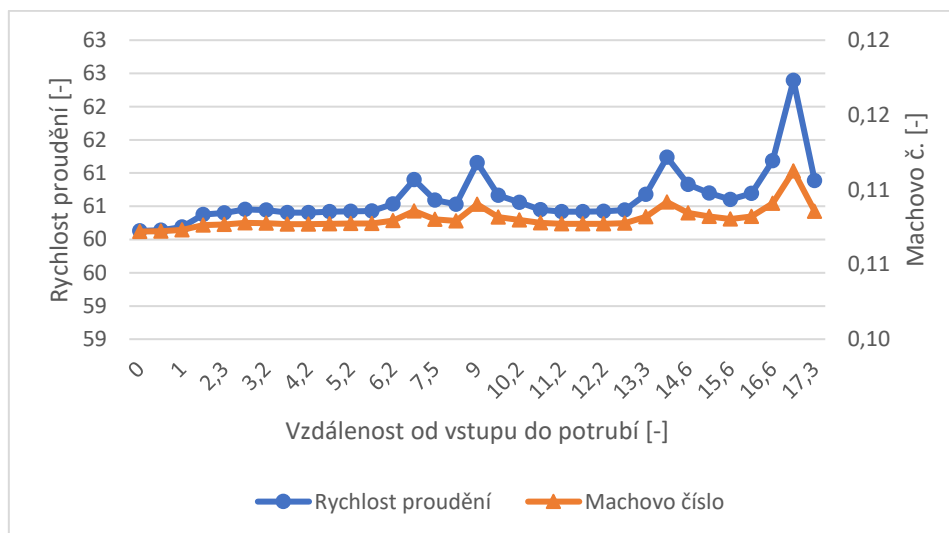
Graf 27 znázorňující průběhy hodnot tlaku a teploty. V případě teploty, která se rovná $249,084 [^{\circ}C]$ na vstupu do potrubní trasy nenastává výrazná změna po téměř celé délce potrubí

až do posledního bodu, kde se potrubní trasa zužuje a na výstupu do atmosféry nabývá teplota hodnoty 193,234 [°C]. Pozorovatelnou změnu je možno nalézt v hodnotách tlaku, který konstantně klesá od vstupní hodnoty 991,773 [kPa] až na hodnotu 988,791 [kPa] ve vzdálenosti 17,3 [m] a následuje prudký pokles na hodnotu 579,238 [kPa] na výstupu do atmosféry.



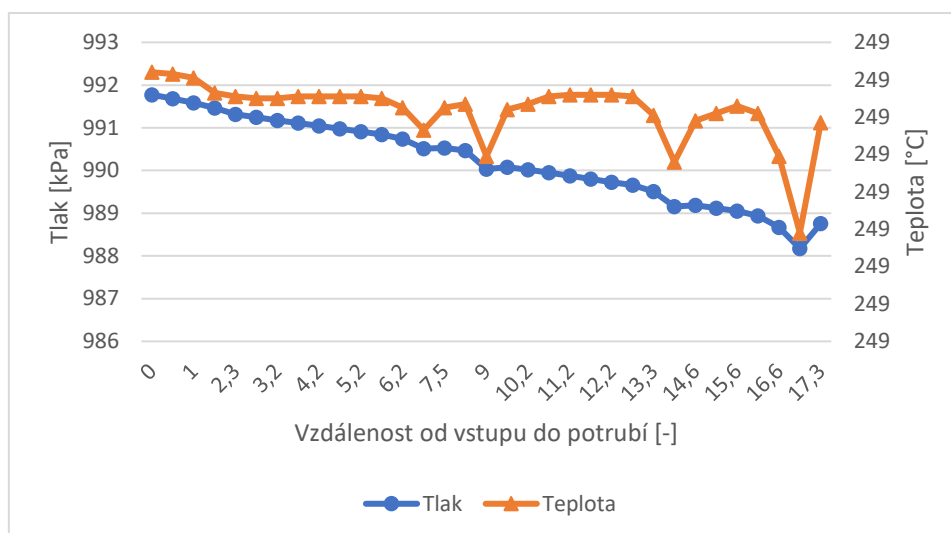
Graf 27 Varianta R – Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha

Pro případ hodnot získaných průměrováním přes hmotnostní tok nedochází k výrazným odchylkám mezi jednotlivými způsoby průměrování hodnot na vstupu do potrubní trasy. V případě rychlosti proudění činí rozdíl hodnot 0,05 [$m \cdot s^{-1}$] a hodnota Machova č. je totožná (Graf 28) a pro hodnoty na výstupu z potrubní trasy do atmosféry rozdíl činí 1,688 [$m \cdot s^{-1}$] pro rychlost a 0,01 pro hodnotu Machova č.



Graf 28 Varianta R – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č. – hmotnostní tok

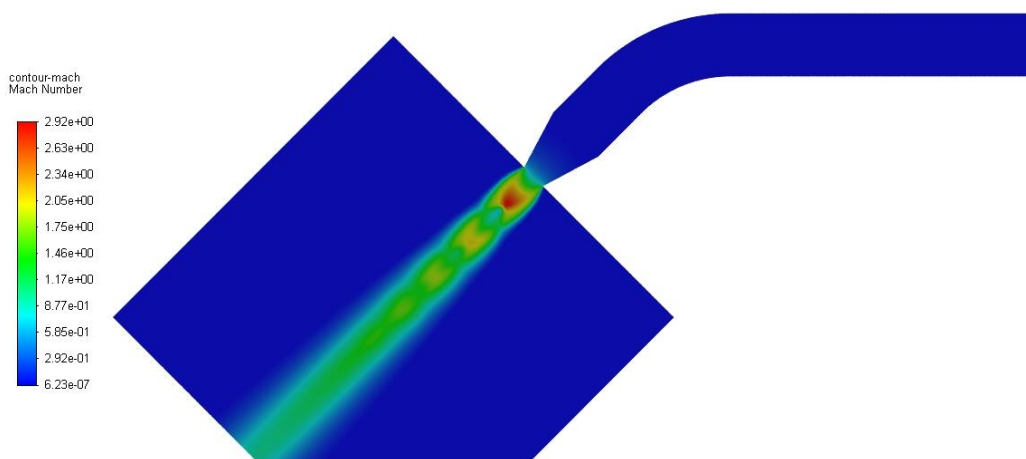
Jak znázorňuje Graf 29, jediným parametrem s výraznou změnou po délce potrubí až do místa zúžení potrubí je tlak, který postupně klesá z hodnoty 911,773 [kPa] na vstupu, stejně jako v případě Varianty 2 vykazuje rychlejší pokles v oblastech zakřivení potrubní trasy a mírné zvýšení před zúžením.



Graf 29 Varianta R – Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok

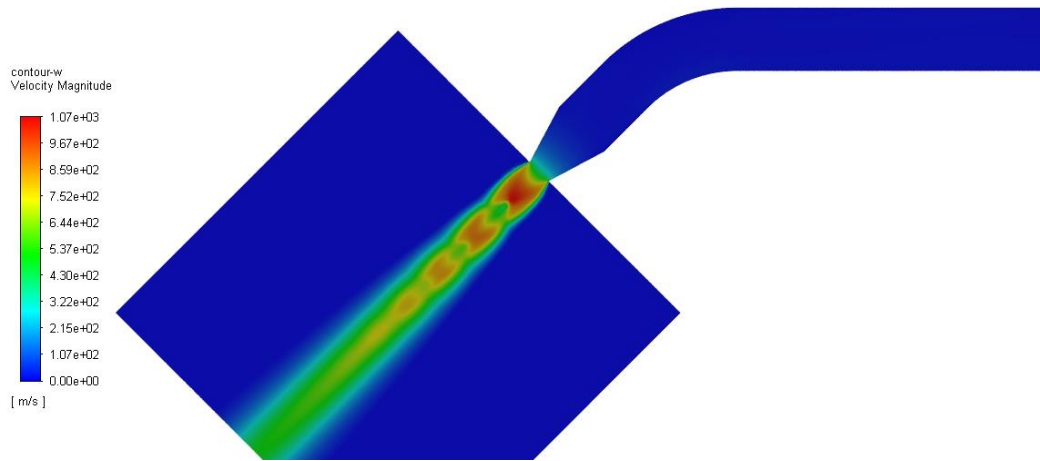
Pro grafické znázornění pomocí kontur byl vybrán konec potrubní trasy, pohled na rovinu řezu obsahující osu vyobrazené potrubní trasy u výstupu do atmosféry. Ostatní zakřivení na potrubní trase vykazovaly velmi podobné grafické výsledky jako v případě Varianty 2.

Rozložení Machova č. na Obr. 41 zobrazuje nízké hodnoty v oblasti potrubí až k výstupu do atmosféry. Za výstupem do atmosféry překračují hodnoty kritickou mez nadzvukového proudění a expanzí se proud dále urychluje, což má za následek vytvoření soustavy rázových vln jako tomu bylo u ostatních variant s vyššími hodnotami proudění uvnitř potrubní trasy. Maximální hodnota Machova č. na Obr. 41 odpovídá 2,92. Výrazné změny nejsou patrné v oblasti zakřivení potrubní trasy před zúžením.



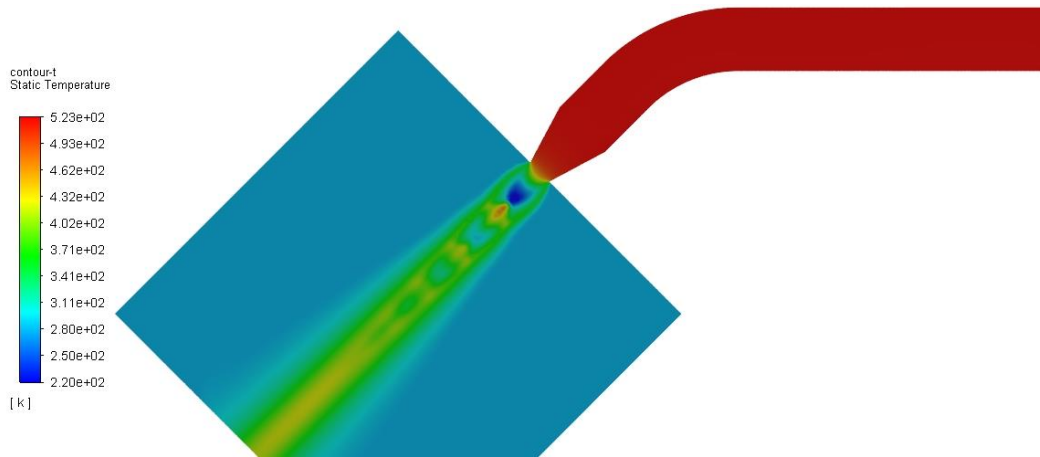
Obr. 41 Varianta R – Machovo číslo – detail

Při zkoumání rozložení rychlosti na Obr. 42 nejsou zaznamenány viditelné změny v potrubní trase až do místa zúžení, kde se rychlost zvyšuje a při výstupu do atmosféry své hodnoty skokově mění v oblasti rázových vln. Maximální hodnota rychlosti v oblasti výstupu do atmosféry dosahovala $1070 [m \cdot s^{-1}]$.



Obr. 42 Varianta R – Rychlost proudění – detail

Stejně tak pro hodnoty teploty na Obr. 43 lze pozorovat oblast potrubní trasy před změnou průměru bez viditelné změny. Ke snižování teploty dochází až v místě zúžení před vstupem do atmosféry a následně skokové změny v oblasti tlakových rázů, kde se objevují i nejnižší hodnoty (oblast na obrázku tmavě modrá).



Obr. 43 Varianta R – Teplota – detail

6. Porovnání výsledků zjištěných pomocí CFD a pomocí analytického modelu proudění

Porovnávání výsledků bylo rozděleno do dvou částí z důvodu různé délky potrubních tras, a tedy i různých hodnot analytického výpočtu podle teorie Fannova proudění.

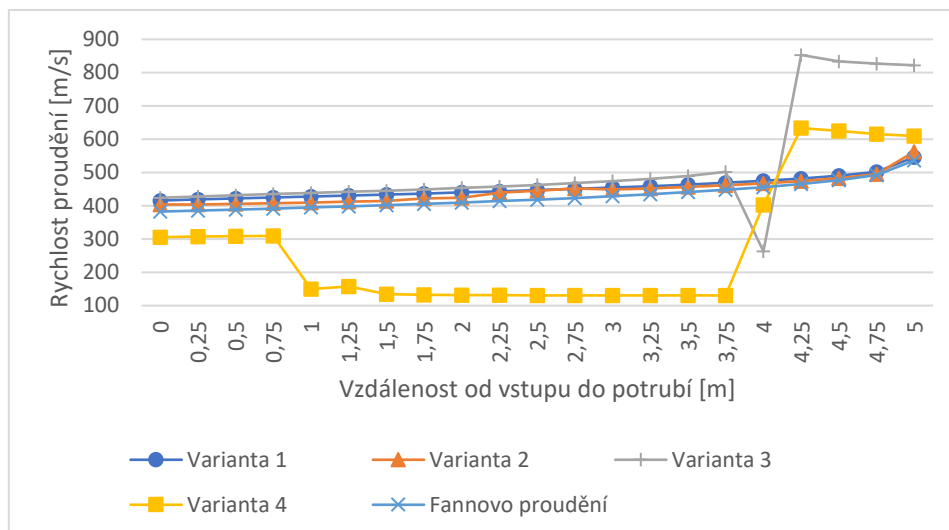
První část srovnává výsledky zjištěné pomocí numerických simulací variant 1 až 4 uvedených v kapitolách 5.2, 5.3, 5.4, a 5.5 mezi sebou společně s výsledky analytické části Fannova proudění uvedené v kapitole 4. Jak bylo již popisováno na grafech v jednotlivých kapitolách numerických simulací, jsou hodnoty porovnány nejdříve při použití metody průměrování přes plochu a následně pomocí metody průměrování přes hmotnostní tok z důvodu rozdílných průměrných hodnot v určitých situacích změny průtočného průřezu. Dále jsou v Tab. 15 uvedeny hodnoty pro porovnání hmotnostních toků získané průměrnou hodnotou na vstupu do potrubní trasy.

	Fannovo proudění (5m)	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Hmotnostní tok [kg · s ⁻¹]	38,79	44,70	45,04	45,03	37,63

Tab. 15 Hmotnostní tok – varianta 1 až 4

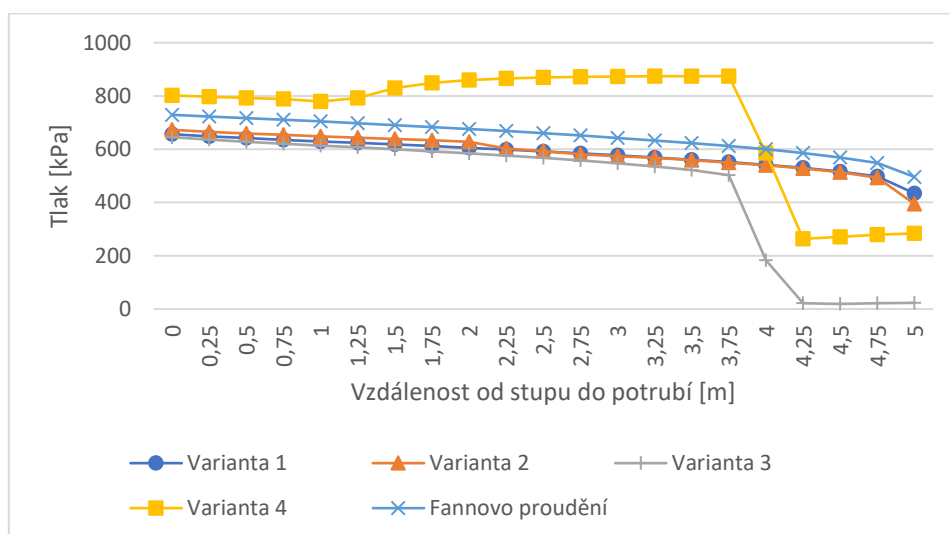
Hmotnostní tok pro případ varianty 1,2 a 3 vykazoval vyšší hodnoty než v případě Fannova proudění a v případě varianty 4 nižší.

Rychlost proudění znázorněna v Graf 30 zobrazuje porovnání variant 1 až 4 s analytickým výpočtem Fannova proudění. Varianta 1 společně s Variantou 2 se nejvíce podobá svým průběhem hodnot po délce potrubní trasy analytickým hodnotám. V případě varianty 2 dochází k urychlení proudu ve vzdálenosti 2,25 – 2,75 [m] oproti analytickému výpočtu a variantě 1. Jedná se o místo obybu potrubní trasy ve variantě 2. Celkově jsou hodnoty varianty 1 a 2 vyšší než při analytickém výpočtu a to o 33 [m · s⁻¹] na vstupu, pokračují s řádově stejným rozdílem po délce potrubí až do místa ohybu, kde se rozdíl mění pouze ve variantě 2 a konvergují ke stejným hodnotám na konci potrubní trasy. Naopak Varianta 3 a 4 vykazuje velké odchýlení od analytických hodnot. V případě varianty 3 se od vstupu do potrubí až do místa rozšíření ve vzdálenosti 4 [m] udržuje rychlost pro variantu 3 přibližně o 43 [m · s⁻¹] vyšší a následně v oblasti rozšíření klesá pod hodnoty analytického výpočtu na hodnotu o 190 [m · s⁻¹] nižší. V dalším sledovacím místě se rychlost varianty 3 opět vrací nad hodnoty analytického proudění o 380 [m · s⁻¹] vyšší a následuje mírný pokles do konce potrubí. Varianta 4 vykazuje nižší hodnoty rychlosti o 76 [m · s⁻¹] již na začátku potrubí. V rozšíření ve vzdálenosti 1 [m] zvyšuje rozdíl oproti analytickému výpočtu na 244 [m · s⁻¹]. Překročení analytických hodnot nastává ve vzdálenosti 4,25 [m · s⁻¹] za oblastí zúžení, kde je hodnota o 168 [m · s⁻¹] vyšší a následně lehce klesá na koncovou hodnotu vyšší o 73 [m · s⁻¹].



Graf 30 Porovnání rychlosti proudění – varianta 1 až 4 – plocha

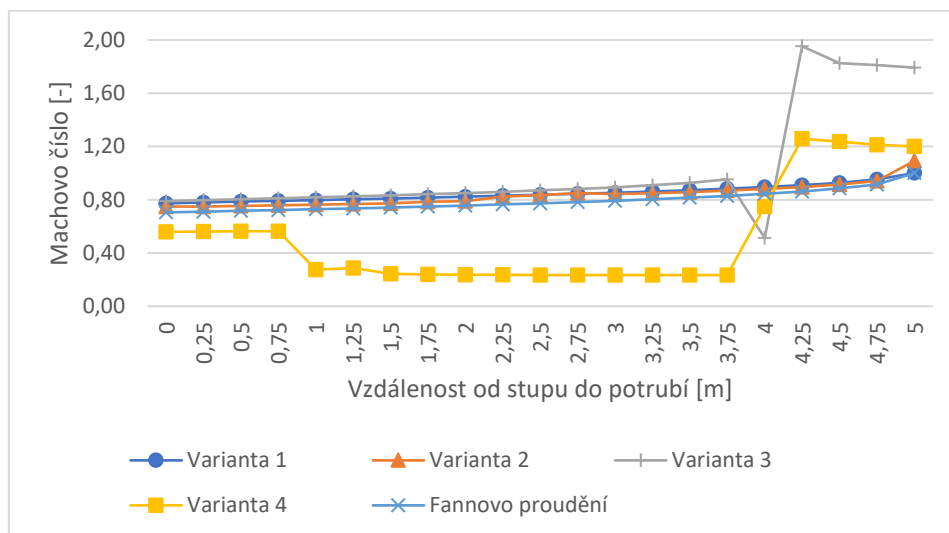
Průběhy hodnot Machova čísla jsou takřka totožné s rozdílem velikostí a jednotek rozdílů jednotlivých variant. Ve vztahu k analytickému výpočtu je Varianta 1 po délku potrubí vyšší přibližně o 0,07 a na konci potrubí se hodnota shoduje. Varianta 2 vykazuje vyšší hodnoty o 0,4 a v místě ohybu potrubí ve vzdálenosti 2,5 [m] o 0,62. Varianta 3 až do místa rozšíření nabývá hodnot vyšších o rozdíl přibližně 0,, následně v místě 4[m] o 0,3 nižších a v místě za rozšířením 1, následně mírně rozdíl klesá. Varianta 4 se pohybuje v rozmezí o 0,15 nižších hodnot před rozšířením potrubí, následuje navýšení rozdílu na 0,5 a v místě zúžení překračuje hodnotu analytického výpočtu a narůstá na hodnotu o 0,4 vyšší, následně mírně klesá.



Graf 31 Porovnání Machova č – varianta 1 až 4 - plocha

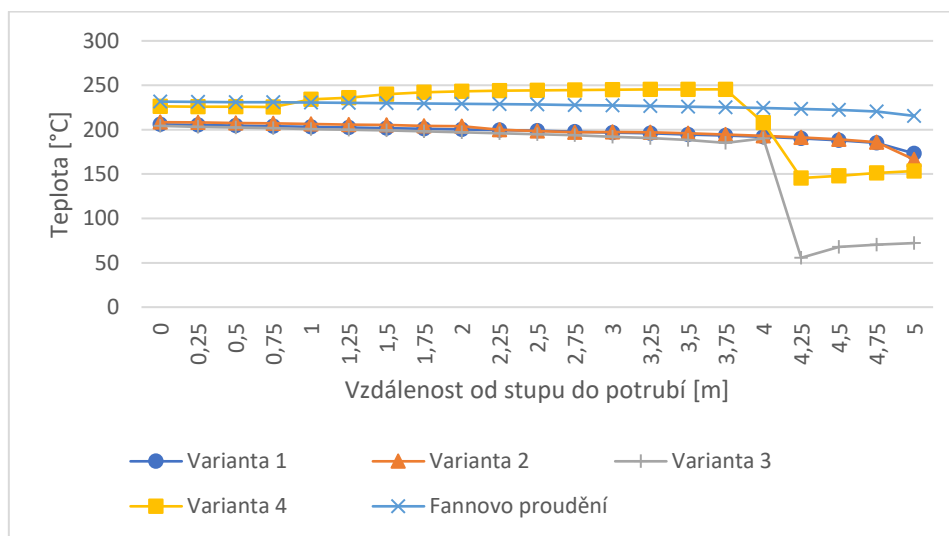
V případě tlaku Graf 32 jsou průběhy varianty 1 až 3 velmi podobné do vzdálenosti 4 [m], z toho varianta 1 se udržuje na hodnotách o 73 [kPa] nižších ve srovnání k analytickému výpočtu až do konce potrubní trasy, stejně tak varianta 2, která zaznamenává jen navýšení rozdílu v místě ohybu potrubí na 2.5 [m]. Výraznější pokles oproti analytickému výpočtu ve vzdálenosti 4 [m] nastává pro variantu 3, kde se rozdíl navýší na 560 [kPa] po hodnotou analytického výpočtu a zůstává dále téměř stejný do konce potrubní trasy. Varianta 4 vykazuje naopak vyšší hodnoty s rozdílem 75 [kPa] oproti analytickému výpočtu ve vzdálenosti 0 ÷ 0,75 [m] a dále navyšuje rozdíl na 1,65 ÷ 262 [kPa] až do vzdálenosti 3,75 [m].

Následuje pokles hodnot v oblasti zúžení až pod hodnoty analytického výpočtu s rozdílem $211 \div 320 [kPa]$ a dále statický tlak do konce potrubí mírně roste.

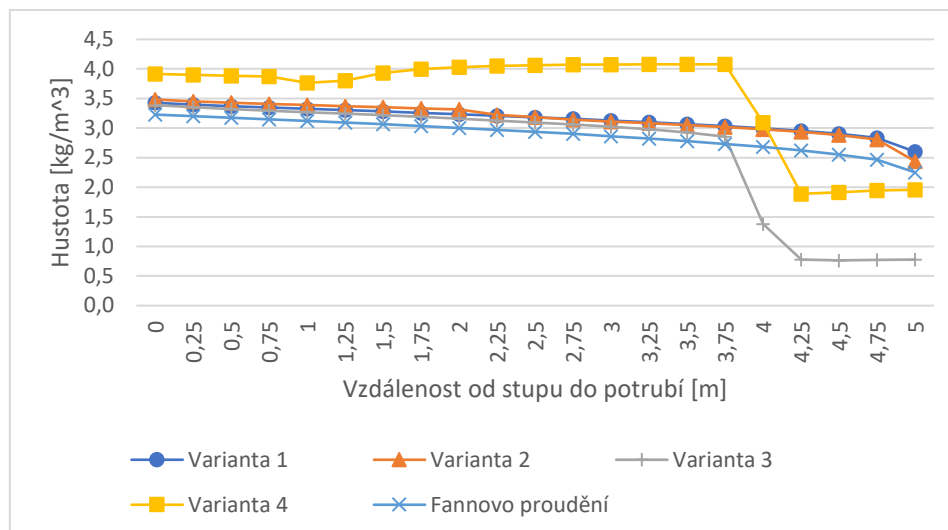


Graf 32 Porovnání tlaku – varianta 1 až 4 - plocha

Pro hodnocení teploty slouží Graf 33. V tomto případě hodnoty všech variant začínaly pod hodnotami analytického výpočtu. Varianta 1 a 2 svůj průběh udržovala pod průběhem analytického výpočtu s rozdílem $25 \div 40 [^{\circ}C]$ až do konce potrubí. Pro variantu 3 s rozdílem $27 \div 35 [^{\circ}C]$ nastal pokles ve vzdálenosti $4,25 [m]$ a navýšení rozdílu na $167 [^{\circ}C]$, následně pak při mírném nárůstu hodnot činil koncový rozdíl $143 [^{\circ}C]$.



Graf 33 Porovnání teploty – varianta 1 až 4 - plocha



Graf 34 Porovnání hustoty – varianta 1 až 4 – plocha

Porovnání hodnoty hustoty v Graf 31 zobrazuje vyšší hodnoty pro všechny varianty než byla hodnota analytického výpočtu ve vzdálenosti 0 ÷ 3,75 [m]. Následně pro varianty 1 a 2 se hodnoty dále držely o 0,25 ÷ 0,5 [kg · m⁻³] nad hodnotami Fannova proudění až do konce potrubních tras. Varianta 3 poklesla ve vzdálenosti 4 ÷ 5 [m] pod hodnoty Fannova proudění a výstupní hodnota byla nižší o 1,474 [kg · m⁻³]. Varianta 4 vykazovala nejvyšší hodnoty v rozmezí 0 ÷ 4 [m] o maximální rozdíl 1,345 [kg · m⁻³] a následně poklesla pod hodnoty Fannova proudění na koncovou hodnotu 1,960 [kg · m⁻³].

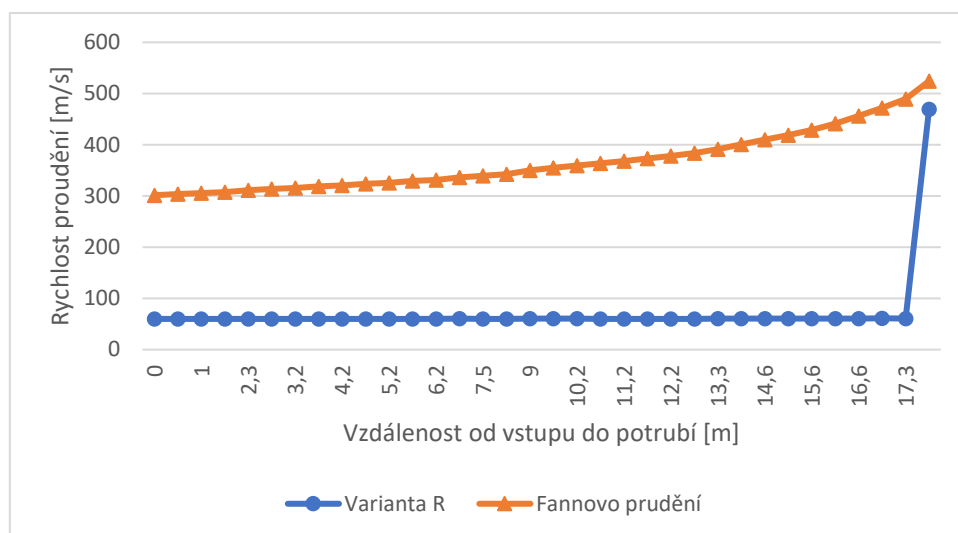
V druhé části jsou porovnány výsledky numerické simulace pro reálnou potrubní trasu uvedenou v kapitole 5.6 porovnané s analytickým výpočtem podle teorie Fannova proudění pro délku 17,6 [m]. Z důvodu velmi podobných průběhů hodnot při získávání hodnot pomocí průměrování přes plochu a průměrování přes hmotnostní tok jsou uvedeny pouze výsledky numerické simulace při průměrování hodnot přes plochu. V Tab. 16 jsou uvedeny hodnoty hmotnostních toků pro vzájemné porovnání.

	Fannovo proudění (17,6m)	Varianta R
Hmotnostní tok [kg · s ⁻¹]	36,92	26,20

Tab. 16 Hmotnostní tok – varianta R

Hmotnostní tok pro případ numerické simulace varianty R vykazoval hodnotu 1,4 krát menší, než tomu bylo dosaženo analytickým výpočtem Fannova proudění pro potrubí 17,6 [m].

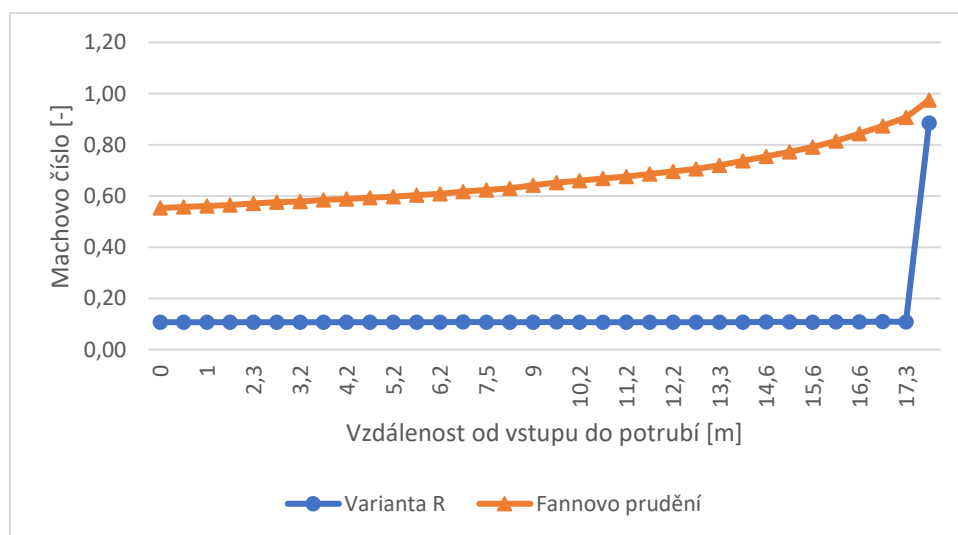
Průběhy hodnot rychlosti proudění varianty reálné geometrie a analytického výpočtu upraveného pro stejnou délku potrubní trasy zobrazuje Graf 35. Z grafu je zřejmé, že hodnoty pro reálnou trasu nejen že neodpovídají hodnotám analytického výpočtu, ale ani nemají podobný průběh. Fannovo proudění předpokládá konstantní průřez potrubí, což trasa reálné potrubní trasy splňuje téměř v celé délce s rozdílem koncovém úseku potrubí, kde je zakončena redukcí na potrubí menšího průřezu. Hodnoty se tedy ve vzdálenosti 0 ÷ 17,3 [m] neshodují o rozdíl 241 [m · s⁻¹] na začátku, postupně rozdíl narůstá, a o 429 [m · s⁻¹] na konci. K urychlení proudu a přiblížení k teoretickým hodnotám dochází až v posledním sledovaném úseku a koncový rozdíl hodnot na výstupu do atmosféry činí 55 [m · s⁻¹].



Graf 35 Porovnání rychlosti proudění – varianta R – plocha

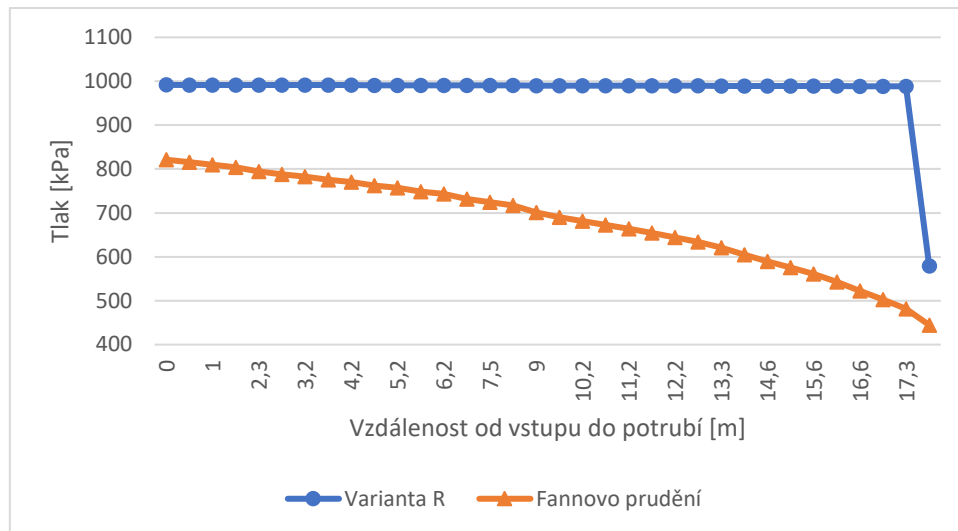
Stejný úkaz se vyskytoval i při porovnávání ostatních parametrů. Rychlost proudění nedosahovala takových hodnot, při kterých by se projevila stlačitelnost proudění, a se hodnoty příliš po délce potrubí nelišily.

Porovnání Machova č. na Graf 36 zobrazuje podobný průběh jako v případě rychlosti proudění. Machovo č. získané numerickou simulací po celé délce potrubní trasy nepřekročí hodnoty získané analytickým výpočtem. Od počátečního rozdílu $1,132 [kg \cdot m^{-3}]$ se postupně zvyšuje až do vzdálenosti $17,3 [m]$, kde rozdíl je roven $2,213 [kg \cdot m^{-3}]$. Následuje prudké zvýšení hodnoty Machova č. pro numerickou simulaci ve sledovaném úseku $17,3 \div 17,6 [m]$ je koncový rozdíl hodnot činí $0,945 [kg \cdot m^{-3}]$.



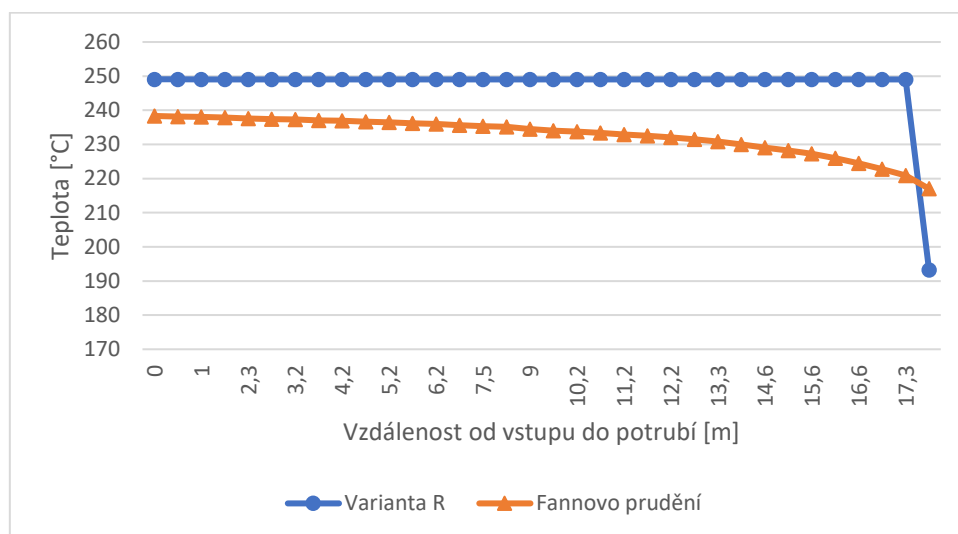
Graf 36 Porovnání Machova čísla – varianta R – plocha

Graf 37 zobrazuje rozdíl v průběhu hodnot pro statický tlak. Na vstupu do potrubní trasy rozdíl činí $170,551 [kPa]$, dále se zvyšuje až do vzdálenosti $17,3 [m]$ a v oblasti zúžení reálné geometrie se rozdíl snižuje na $134,613 [kPa]$. Po celé délce potrubní trasy však statický tlak pro reálnou potrubní trasu nabývá vyšších hodnot než pro teoretickou potrubní trasu Fannova proudění.

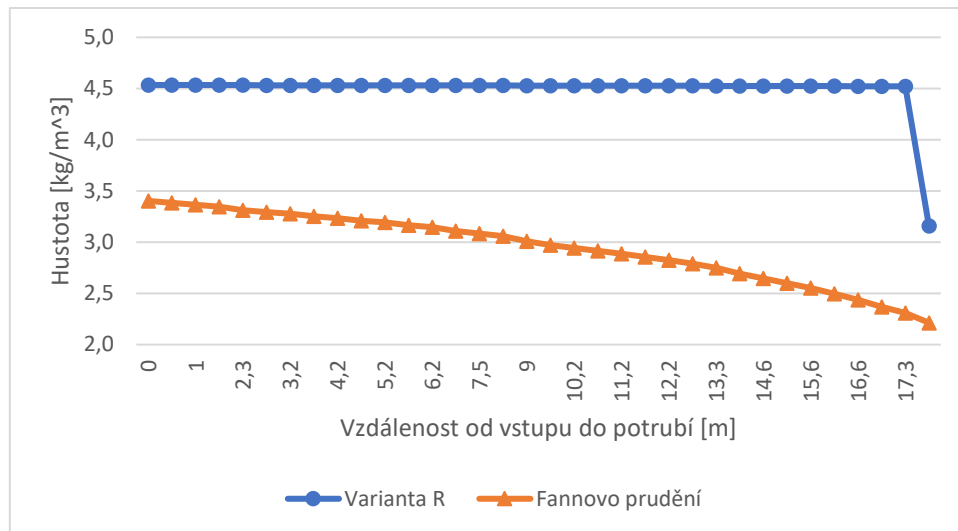


Graf 37 Porovnání tlaku – varianta R – plocha

Graf 38 zobrazuje porovnání průběhů hodnot pro teplotu. Změna teploty v případě analytického výpočtu dle teorie Fannova proudění se pohybuje na každém sledovaném místě přibližně o 0,2 [°C] vůči předchozímu sledovanému místu. V případě numerické simulace je teplota takřka konstantní až do vzdálenosti 17,3[m] a následuje prudký pokles pod hodnotu analytického výpočtu a tím celkový koncový rozdíl. Na vstupu do potrubní trasy rozdíl mezi analytickým výpočtem a numerickou simulací je 10,74 [°C] a na výstupu do atmosféry 23,79 [°C].



Graf 38 Porovnání teploty – varianta R – plocha



Graf 39 Porovnání hustoty – varianta R - plocha

Stejně tak jako u ostatních porovnání průběhů hodnot proměnných je i pro hustotu rozdíl na vstupu do potrubní trasy a dále se rozdíl zvyšuje až ke konci potrubní trasy. Rozdíl na vstupu činí $1,132 [kg \cdot m^{-3}]$ a v místě výstupu do atmosféry se hodnota hustoty pro numerickou simulaci skokově přibližuje k hodnotě analytického výpočtu a koncový rozdíl činí $0,945 [kg \cdot m^{-3}]$

7. Závěr a doporučení

Cílem práce bylo vymodelování teoretických geometrií a reálné geometrie potrubní trasy pro profukování parou a následné porovnání s analytickým výpočtem dle teorie Fannova proudění. V teoretické části byly popsány zásady a průběh parního profukování a dále odvozena rovnice Fannova proudění, které byly využity v praktické části práce při analytickém výpočtu potrubních tras celkové délky 5 [m] a 17,6 [m]. Numerické simulace praktické části byly provedeny ve výpočtovém prostředí Ansys Fluent Inc. Byly popsány jednotlivé geometrie a vlastnosti výpočetních sítí, na kterých byly následně provedeny simulace. Výsledky byly porovnány dle celkových délek potrubních tras, tedy varianty 1,2,3 a 4 byly porovnány mezi sebou a s výsledky Fannova proudění pro délku potrubí 5 [m]. Varianta R byla porovnána s výsledky Fannova proudění pro délku 17,6 [m].

Při vyhodnocování výsledků byly určeny výsledky Fannova proudění jako referenční hodnoty.

Nejmenší odchylky ve sledovaných hodnotách od hodnoty analytického výpočtu vykazovala Varianta 1, která měla stejnou geometrii, jaká byla uvažována pro případ analytického výpočtu. Celkově však hodnoty rychlosti proudění byly o $9 \div 33 [m \cdot s^{-1}]$ menší než analytický výpočet, hodnoty tlaku o $50 \div 75 [kPa]$ menší, teploty o $25 \div 42 [^{\circ}C]$ menší, Machova č. menší o $0,04 \div 0,07$ a hodnoty hustoty větší o $0,19 \div 0,35 [kg \cdot m^{-3}]$. Varianta 2 nabývala takřka stejných hodnot jako Varianta 1 jen v místě zakřivení potrubní trasy došlo k vychýlení a následnému vrácení na hodnoty takřka stejné Variantě 1. Z toho vyplývá, že sledované zakřivení potrubní trasy má minimální vliv na parametry proudění. Zakřivení potrubní trasy s menším poloměrem se nevyskytuje v parních potrubních trasách a lze tedy konstatovat vhodnost pro použití přímé trasy nebo trasy s poloměrem zakřivení alespoň 2,5 průměru potrubní trasy.

Varianta 3 s rozšířením v koncové části potrubní trasy vykazovala skokové změny všech parametrů proudění v daném místě. Koncové rozdíly oproti analytickému výpočtu činily $285,932 [m \cdot s^{-1}]$ vyšší pro případ rychlosti proudění, $0,79$ vyšší pro případ Machova č., $473,174 [kPa]$ nižší pro případ statického tlaku, $143 [^{\circ}C]$ nižší pro případ statické teploty a $1,474 [kg \cdot m^{-3}]$ nižší pro případ hustoty. Potrubní trasa pro variantu 3 obsahuje tedy jakýsi difuzor, který proudění urychluje namísto chtěného zpomalování. Tento případ byl vytvořen v praxi s domněním, že dojde ke snížení rychlosti a hladiny hluku. Na základě numerické simulace lze říci, že rozšíření v koncové části má právě opačný účinek.

Varianta 4 s rozšířením ve vzdálenosti 1 [m] a zúžením ve vzdálenosti 4 [m] nabývala nižších hodnot na začátku rozdíly oproti analytickému výpočtu tvořily $76,482 [m \cdot s^{-1}]$ pro rychlosti proudění, $0,15$ pro Machovo č. a vyšší hodnoty s rozdílem $5 [^{\circ}C]$ pro teplotu, $72,346 [kPa]$ pro statický tlak a $0,69 [kg \cdot m^{-3}]$ hustotu. Navzdory dalšímu zvyšování rozdílu v místě rozšíření byly po zúžení koncové hodnoty s menším rozdílem, než tomu bylo v případě varianty 3. Koncové rozdíly tvořily $73,613 [m \cdot s^{-1}]$ pro rychlost, $0,2$ pro Machovo č., $221,932 [kPa]$ pro tlak, $62 [^{\circ}C]$ pro teplotu a $0,292 [kg \cdot m^{-3}]$ pro hustotu.

Jako poslední byla vytvořena reálná geometrie se stejnými okrajovými podmínkami jako v případě teoretických geometrií a analytických výpočtů. V důsledku jediného zúžení, a to až v koncové části potrubí na výstupu do atmosféry nabývaly hodnoty Machova č. pouze $0,11$ a dle teorie se nejedná o stlačitelné proudění, což odpovídalo i hodnotám ostatních sledovaných veličin, které se po délce potrubí měnily jen minimálně až do vzdálenosti $17,3 [m]$. V oblasti

zúžení docházelo k urychlování proudění a změně všech parametrů proudění a hodnoty proměnných se přiblížily hodnotám analytického výpočtu koncový rozdíl jednotlivých parametrů byl $55,14 [m \cdot s^{-1}]$ pro rychlost, $0,09$ pro Machovo č., $134,612 [kPa]$ pro tlak, $23,79 [^{\circ}C]$ pro teplotu a $0,945 [kg \cdot m^{-3}]$ pro hustotu.

Po zhodnocení všech variant bylo dospěno k závěru, že v případě absence měřících míst v potrubních trasách při parním profukování lze pro získání jednotlivých hodnot tlaku, rychlosti, hustoty a teploty využít teorii Fannova proudění pouze v případě, kdy po celou délku potrubní trasy nedochází ke změně průřezu, pouze k zakřivení potrubní trasy s poloměrem 2,5 průměru potrubí. Pro případ změny průřezu potrubní trasy dochází ke skokovým změnám jednotlivých parametrů, které se významně liší od hodnot analytického výpočtu, a tedy není možnost v tomto případě považovat výpočet ani jako informativní.

Práce byla vypracována ve spolupráci s Doosan Škoda Power jako informační pro budoucí možné aplikování teorie Fannova proudění pro výpočet parametrů po délce reálných potrubních tras v praktických případech. Dalším rozšířením práce by mohlo za předpokladu zvýšení nákladů na výstavbu energetického zařízení doplnění výsledků pomocí měření na reálném díle.

Seznam použitých zdrojů

1. *Internal Cleaning of Water-Tube Steam Generating Plants and Associated Pipework*. Essen, Germany : VGB PowerTech e.V., 2015. ISBN 978-3-86878-766-8.
2. JARVIS, Julie, Paul BABEL a Allen VIEIRA. Advances in Power Plant Steam Blow Cleaning Analyses. In: *ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air*. 2004. DOI: 10.1115/GT2004-53161.
3. BORCHARDT, H.P. a T. VAN OS. Vencom Technical Bulletin: Steam blowing: Using the power and velocity of steam to remove impurities. *Vencom*. [Online] 2. 4 2020. <http://www.vecom.nl/english/documentation/tb/VecomTechnicalBulletin-Steam-blow-ENG.pdf>.
4. Reinigung des Wasser-Dampfkreislaufs in einem Zwangsdurchlaufdampferzeuger. *FPO*. [Online] 1996. [Citace: 09. 05 2020.] <http://www.freepatentsonline.com/DE19648642B4.html>.
5. Jstechnos silencer. In: Integrated Quality Services Co., Ltd.(IQS). [Online] [Citace: 02. 06 2020.] Dostupné z: <http://www.iqs.co.th/images/products/js-technos/jstechnos-silencer.jpg>.
6. *Praxis der Kraftwerks-Chemie. Zw.Au.* Deutschland : Vulkan-Verlag, 1997. ISBN 978-3802721793.
7. ZUCKER, Robert D. a Oscar Biblarz. *Fundamentals of Gas Dynamics. 3rd. ed.* Mew Jersey : Wiley, 2019. ISBN 9781119481706..
8. OOSTHUIZEN, Patrick H. a William CARSCALLEN. *Compressible Fluid Flow*. English Language : McGraw Hill, 1997. ISBN 0-07-048197-0..
9. Wikiwand: Fanno flow. [Online] Wikiwand, 2017. [Citace: 06. 15 2020.] https://www.wikiwand.com/en/Fanno_flow.
10. Ansys, Inc. Ansys Theoretical Guide. *Ansys 12*. [Online] Ansys, Inc., 2009. [Citace: 07. 06 2020.] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node239.htm>.
11. *Interní CFD výpočty Doosan Škoda Power*.

Seznam obrázků

Obr. 1 Vysokotlaká trasa pro profukování parou	12
Obr. 2 Trasa nízkoteplotního ohřevu pro profukování parou.....	13
Obr. 3 Trasa vysokoteplotního ohřevu pro profukování parou	14
Obr. 4 Vertikální tlumič hluku (5)	17
Obr. 5 Zařízení s kontrolní deskou.....	19
Obr. 6 Počet nárazů cizích těles v závislosti na počtu operací.....	22
Obr. 7 Vliv tření na hodnoty Machova čísla	24
Obr. 8 Vliv tření v různých úsecích potrubí.....	24
Obr. 9 Kontrolní objem pro analýzu proudění (7).....	25
Obr. 10 Hodnoty proměnných v přímém potrubí (7).....	30
Obr. 11 Poměr proměnných při Fannovo proudění (9).....	33
Obr. 12 Grafické znázornění řešeného příkladu.....	35
Obr. 13 Grafické znázornění výpočetního místa potrubí	36
Obr. 14 Geometrie pro analýzu výpočetní sítě.....	41
Obr. 15 Výpočetní síť – Body of Influence.....	42
Obr. 16 Geometrie – Varianta 1	43
Obr. 17 Varianta 1 - Machovo číslo	46
Obr. 18 Varianta 1 - Rychlost proudění	47
Obr. 19 Varianta 1 – Tlak.....	47
Obr. 20 Geometrie – Varianta 2	48
Obr. 21 Varianta 2 - Machovo číslo	51
Obr. 22 Varianta 2 - Machovo číslo – detail	52
Obr. 23 Varianta 2 – Rychlost proudění	52
Obr. 24 Varianta 2 – Rychlost proudění – detail.....	53
Obr. 25 Varianta 2 – Tlak.....	53
Obr. 26 Varianta 2 – Tlak – detail.....	54
Obr. 27 Geometrie – Varianta 3	55
Obr. 28 Varianta 3 - Machovo číslo	58
Obr. 29 Varianta 3 - Machovo číslo – detail	59
Obr. 30 Varianta 3 - Rychlost proudění	59
Obr. 31 Varianta 3 - Rychlost proudění – detail	59
Obr. 32 Varianta 3 – Tlak.....	60
Obr. 33 Varianta 3 – Tlak – detail.....	60
Obr. 34 Geometrie – Varianta 4	61
Obr. 35 Varianta 4 - Machovo číslo	64
Obr. 36 Varianta 4 - Machovo číslo – detail	65
Obr. 37 Varianta 4 - Rychlost proudění	65
Obr. 38 Varianta 4 - Rychlost proudění – detail	65
Obr. 39 Varianta 4 - Tlak	66
Obr. 40 Varianta 4 - Tlak – detail	66
Obr. 41 Varianta R – Machovo číslo – detail.....	69
Obr. 42 Varianta R – Rychlost proudění – detail	70
Obr. 43 Varianta R – Teplota – detail	70

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání metod kontinuálního a pulzačního profukování parou (3)	23
Tab. 2 Hodnoty proměnných v závislosti na Machově čísle (7)	30
Tab. 3 Výhody a nevýhody používání Fannova proudění	34
Tab. 4 Vstupní hodnoty příkladu Fannova proudění.....	35
Tab. 5 Hodnoty proměnných na vstupu a výstupu potrubí	36
Tab. 6 Hodnoty proměnných pro příklad Fannova proudění.....	38
Tab. 7 Okrajové podmínky výpočtu.....	40
Tab. 8 Proudící médium	40
Tab. 9 Analýza výpočetní sítě - hodnoty výpočetních sítí	41
Tab. 10 Varianta 1 - vlastnosti výpočetní sítě.....	43
Tab. 11 Varianta 2 - vlastnosti výpočetní sítě.....	47
Tab. 12 Varianta 3 - vlastnosti výpočetní sítě.....	54
Tab. 13 Varianta 4 - vlastnosti výpočetní sítě.....	60
Tab. 14 Varianta R – vlastnosti výpočetní sítě.....	66
Tab. 15 Hmotnostní tok – varianta 1 až 4	71
Tab. 16 Hmotnostní tok – varianta R	74

Seznam grafů

Graf 1 Průběh hodnot rychlosti proudění a Machova čísla Fannova proudění	38
Graf 2 Průběh hodnot hustoty a tlaku Fannova proudění.....	39
Graf 3 Průběh hodnot teploty čísla Fannova proudění.....	39
Graf 4 Analýza výpočetní sítě	42
Graf 5 Varianta 1 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha	44
Graf 6 Varianta 1 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha	44
Graf 7 Varianta 1 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok.....	45
Graf 8 Varianta 1 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok.....	45
Graf 9 Varianta 1 - Průběh hodnot hustoty – plocha.....	46
Graf 10 Varianta 2 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha	49
Graf 11 Varianta 2 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha	49
Graf 12 Varianta 2 - Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č. - hmotnostní tok	50
Graf 13 Varianta 2 - Průběh hodnot tlaku a teploty – hmotnostní tok.....	50
Graf 14 Varianta 2 - Průběh hodnot hustoty – plocha.....	51
Graf 15 Varianta 3 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha	56
Graf 16 Varianta 3 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha	56
Graf 17 Varianta 3 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok.....	57
Graf 18 Varianta 3 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok.....	57
Graf 19 Varianta 3 - Průběh hodnot hustoty – plocha.....	58
Graf 20 Varianta 4 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha	62
Graf 21 Varianta 4 - Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha	62
Graf 22 Varianta 4 – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok.....	63
Graf 23 Varianta 4 - Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok.....	63
Graf 24 Varianta 4 - Průběh hodnot hustoty – plocha.....	64
Graf 25 Varianta R – průběh hodnot po celé délce potrubní trasy.....	67
Graf 26 Varianta R – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – plocha.....	67

Graf 27 Varianta R – Průběh hodnot teploty a tlaku – plocha	68
Graf 28 Varianta R – Průběh hodnot rychlosti proudění a M. č – hmotnostní tok	68
Graf 29 Varianta R – Průběh hodnot teploty a tlaku – hmotnostní tok.....	69
Graf 30 Porovnání rychlosti proudění – varianta 1 až 4 – plocha.....	72
Graf 31 Porovnání Machova č – varianta 1 až 4 - plocha	72
Graf 32 Porovnání tlaku – varianta 1 až 4 - plocha.....	73
Graf 33 Porovnání teploty – varianta 1 až 4 – plocha	73
Graf 34 Porovnání hustoty – varianta 1 až 4 – plocha	74
Graf 35 Porovnání rychlosti proudění – varianta R – plocha.....	75
Graf 36 Porovnání Machova čísla – varianta R – plocha.....	75
Graf 37 Porovnání tlaku – varianta R – plocha	76
Graf 38 Porovnání teploty – varianta R – plocha.....	76
Graf 39 Porovnání hustoty – varianta R - plocha.....	77

PŘÍLOHA A

Poměrové hodnoty Fannova proudění

Příloha A

Poissonova konstanta pro následující hodnoty $\kappa = 1,32$

M	p/p_2	T/T_2	ρ/ρ_2	w/w_2	p_0/p_{02}	$4fl/D_H$
0,01	107,70243	1,15998	92,84841	0,01077	58,39356	7567,03648
0,02	53,84992	1,15993	46,42532	0,02154	29,20186	1886,43651
0,03	35,89851	1,15983	30,95145	0,03231	19,47355	834,96053
0,04	26,92238	1,15970	23,21489	0,04308	14,61110	467,20006
0,05	21,53635	1,15954	18,57325	0,05384	11,69498	297,13758
0,06	17,94538	1,15933	15,47907	0,06460	9,75203	204,86528
0,07	15,38016	1,15909	13,26915	0,07536	8,36518	149,30561
0,08	13,45602	1,15881	11,61190	0,08612	7,32590	113,30401
0,09	11,95929	1,15850	10,32309	0,09687	6,51833	88,66744
0,10	10,76172	1,15815	9,29219	0,10762	5,87296	71,08206
0,11	9,78174	1,15776	8,44886	0,11836	5,34555	58,10127
0,12	8,96495	1,15733	7,74621	0,12910	4,90661	48,25374
0,13	8,27369	1,15687	7,15178	0,13983	4,53573	40,61161
0,14	7,68106	1,15637	6,64237	0,15055	4,21834	34,56633
0,15	7,16733	1,15584	6,20098	0,16126	3,94372	29,70540
0,16	6,71771	1,15527	5,81485	0,17197	3,70386	25,74116
0,17	6,32089	1,15466	5,47424	0,18267	3,49264	22,46815
0,18	5,96807	1,15402	5,17156	0,19337	3,30527	19,73639
0,19	5,65229	1,15334	4,90081	0,20405	3,13800	17,43441
0,20	5,36801	1,15262	4,65722	0,21472	2,98781	15,47793
0,21	5,11073	1,15187	4,43689	0,22538	2,85226	13,80231
0,22	4,87676	1,15109	4,23666	0,23604	2,72937	12,35727
0,23	4,66306	1,15026	4,05390	0,24668	2,61747	11,10328
0,24	4,46710	1,14941	3,88644	0,25730	2,51519	10,00888
0,25	4,28675	1,14851	3,73243	0,26792	2,42139	9,04880
0,26	4,12021	1,14759	3,59032	0,27853	2,33509	8,20256
0,27	3,96595	1,14663	3,45880	0,28912	2,25545	7,45340
0,28	3,82265	1,14563	3,33672	0,29970	2,18176	6,78752
0,29	3,68917	1,14460	3,22311	0,31026	2,11341	6,19349
0,30	3,56454	1,14353	3,11713	0,32081	2,04987	5,66172
0,31	3,44789	1,14243	3,01802	0,33134	1,99068	5,18420
0,32	3,33849	1,14130	2,92516	0,34186	1,93542	4,75413
0,33	3,23567	1,14013	2,83797	0,35236	1,88374	4,36573
0,34	3,13885	1,13893	2,75595	0,36285	1,83533	4,01408
0,35	3,04752	1,13770	2,67866	0,37332	1,78990	3,69495
0,36	2,96121	1,13643	2,60570	0,38377	1,74722	3,40468
0,37	2,87953	1,13514	2,53673	0,39421	1,70706	3,14013
0,38	2,80211	1,13380	2,47142	0,40462	1,66923	2,89855
0,39	2,72862	1,13244	2,40950	0,41502	1,63354	2,67755
0,40	2,65877	1,13105	2,35072	0,42540	1,59983	2,47504
0,41	2,59228	1,12962	2,29483	0,43576	1,56798	2,28918
0,42	2,52892	1,12816	2,24164	0,44610	1,53783	2,11834
0,43	2,46848	1,12667	2,19095	0,45642	1,50928	1,96111
M	p/p_2	T/T_2	ρ/ρ_2	w/w_2	p_0/p_{02}	$4fl/D_H$

0,44	2,41075	1,12515	2,14261	0,46672	1,48222	1,81621
0,45	2,35555	1,12360	2,09644	0,47700	1,45655	1,68251
0,46	2,30272	1,12201	2,05231	0,48726	1,43219	1,55901
0,47	2,25211	1,12040	2,01009	0,49749	1,40904	1,44482
0,48	2,20357	1,11876	1,96966	0,50770	1,38704	1,33912
0,49	2,15699	1,11709	1,93090	0,51789	1,36612	1,24121
0,50	2,11224	1,11538	1,89373	0,52806	1,34622	1,15043
0,51	2,06921	1,11365	1,85804	0,53820	1,32727	1,06620
0,52	2,02782	1,11189	1,82375	0,54832	1,30923	0,98799
0,53	1,98796	1,11011	1,79078	0,55842	1,29204	0,91533
0,54	1,94954	1,10829	1,75905	0,56849	1,27566	0,84778
0,55	1,91251	1,10645	1,72851	0,57853	1,26005	0,78496
0,56	1,87677	1,10458	1,69908	0,58855	1,24516	0,72649
0,57	1,84225	1,10268	1,67071	0,59855	1,23097	0,67207
0,58	1,80891	1,10075	1,64334	0,60852	1,21744	0,62139
0,59	1,77667	1,09880	1,61692	0,61846	1,20453	0,57419
0,60	1,74549	1,09682	1,59140	0,62838	1,19221	0,53020
0,61	1,71530	1,09482	1,56675	0,63826	1,18047	0,48922
0,62	1,68607	1,09279	1,54291	0,64813	1,16927	0,45102
0,63	1,65775	1,09073	1,51985	0,65796	1,15859	0,41542
0,64	1,63029	1,08865	1,49753	0,66777	1,14840	0,38224
0,65	1,60366	1,08655	1,47592	0,67754	1,13870	0,35131
0,66	1,57781	1,08442	1,45498	0,68729	1,12944	0,32250
0,67	1,55272	1,08227	1,43469	0,69701	1,12063	0,29566
0,68	1,52834	1,08009	1,41501	0,70671	1,11224	0,27066
0,69	1,50466	1,07789	1,39593	0,71637	1,10425	0,24738
0,70	1,48163	1,07567	1,37741	0,72600	1,09665	0,22571
0,71	1,45924	1,07342	1,35943	0,73560	1,08943	0,20556
0,72	1,43745	1,07115	1,34197	0,74518	1,08257	0,18683
0,73	1,41625	1,06886	1,32500	0,75472	1,07605	0,16943
0,74	1,39560	1,06655	1,30851	0,76423	1,06987	0,15328
0,75	1,37548	1,06422	1,29248	0,77371	1,06402	0,13830
0,76	1,35588	1,06187	1,27688	0,78316	1,05848	0,12443
0,77	1,33677	1,05949	1,26171	0,79257	1,05325	0,11159
0,78	1,31814	1,05710	1,24695	0,80196	1,04831	0,09972
0,79	1,29997	1,05468	1,23257	0,81131	1,04365	0,08878
0,80	1,28224	1,05225	1,21857	0,82063	1,03927	0,07870
0,81	1,26493	1,04980	1,20493	0,82992	1,03516	0,06944
0,82	1,24804	1,04732	1,19164	0,83918	1,03132	0,06094
0,83	1,23153	1,04483	1,17869	0,84840	1,02772	0,05317
0,84	1,21541	1,04233	1,16605	0,85759	1,02437	0,04608
0,85	1,19965	1,03980	1,15374	0,86675	1,02127	0,03963
0,86	1,18425	1,03726	1,14172	0,87587	1,01839	0,03379
0,87	1,16919	1,03469	1,12999	0,88496	1,01575	0,02853
0,88	1,15447	1,03212	1,11854	0,89402	1,01333	0,02380
0,89	1,14006	1,02952	1,10737	0,90304	1,01113	0,01959
0,90	1,12596	1,02691	1,09646	0,91203	1,00913	0,01586
<i>M</i>	p/p_2	T/T_2	ρ/ρ_2	w/w_2	p_0/p_{02}	$4fl/D_H$

0,91	1,11217	1,02429	1,08580	0,92098	1,00735	0,01259
0,92	1,09866	1,02164	1,07538	0,92990	1,00577	0,00975
0,93	1,08543	1,01899	1,06520	0,93879	1,00439	0,00732
0,94	1,07247	1,01632	1,05526	0,94764	1,00321	0,00527
0,95	1,05978	1,01363	1,04553	0,95645	1,00221	0,00359
0,96	1,04734	1,01093	1,03602	0,96523	1,00141	0,00225
0,97	1,03516	1,00822	1,02672	0,97398	1,00079	0,00124
0,98	1,02321	1,00549	1,01762	0,98269	1,00035	0,00054
0,99	1,01149	1,00275	1,00871	0,99136	1,00009	0,00013
1,00	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,00000

PŘÍLOHA B

Tabulky výsledků numerických simulací

Příloha B – Varianta 1

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,427	415,590	656532	205,983	0,77
0,25	3,396	419,170	648399	205,146	0,78
0,5	3,371	422,170	641792	204,462	0,79
0,75	3,347	425,074	635343	203,769	0,79
1	3,325	427,837	629518	203,104	0,80
1,25	3,304	430,589	623926	202,463	0,80
1,5	3,281	433,777	617631	201,719	0,81
1,75	3,258	436,720	611560	201,036	0,82
2	3,233	440,007	604991	200,255	0,82
2,25	3,209	443,336	598501	199,472	0,83
2,5	3,183	446,893	591679	198,633	0,84
2,75	3,156	450,716	584539	197,728	0,84
3	3,128	454,680	577129	196,781	0,85
3,25	3,099	458,898	569253	195,754	0,86
3,5	3,068	463,646	560928	194,622	0,87
3,75	3,033	468,824	551639	193,335	0,88
4	2,996	474,713	541586	191,887	0,90
4,25	2,953	481,580	530059	190,179	0,91
4,5	2,903	489,940	516481	188,064	0,93
4,75	2,835	501,561	498215	185,078	0,95
5	2,601	546,133	434236	173,129	1,00

Tab. 1 Varianta 1 - vztažené na plochu

Příloha B – Varianta 1

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
l [m]	$[\text{kg} \cdot \text{m}^3]$	w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	p [bar]	T [$^{\circ}\text{C}$]	[–]
0	3,427	415,612	656532	205,981	0,77
0,25	3,397	419,651	648397	205,087	0,78
0,5	3,372	422,938	641792	204,352	0,79
0,75	3,348	426,203	635344	203,606	0,79
1	3,326	429,145	629522	202,936	0,80
1,25	3,305	431,956	623922	202,306	0,81
1,5	3,282	435,267	617636	201,555	0,81
1,75	3,259	438,346	611554	200,855	0,82
2	3,234	441,792	604988	200,054	0,83
2,25	3,210	445,254	598499	199,253	0,83
2,5	3,185	448,930	591679	198,396	0,84
2,75	3,158	452,862	584542	197,474	0,85
3	3,130	456,952	577126	196,507	0,86
3,25	3,101	461,297	569252	195,462	0,87
3,5	3,070	466,115	560923	194,315	0,88
3,75	3,035	471,423	551644	193,008	0,89
4	2,998	477,394	541585	191,545	0,90
4,25	2,955	484,331	530057	189,822	0,92
4,5	2,905	492,736	516479	187,699	0,93
4,75	2,838	504,371	498206	184,702	0,96
5	2,605	547,930	434795	172,909	1,05

Tab. 2 Varianta 1 - vztažené na hmotnostní tok

Příloha B – Varianta 2

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,483	404,056	672979	208,402	0,75
0,25	3,451	403,678	665223	208,096	0,75
0,5	3,428	405,619	659078	207,499	0,75
0,75	3,408	407,758	653662	206,960	0,76
1	3,390	409,995	648733	206,349	0,76
1,25	3,371	412,412	643749	205,746	0,77
1,5	3,352	414,696	638599	205,166	0,77
1,75	3,334	421,725	633329	204,345	0,79
2	3,314	424,277	628071	203,758	0,79
2,25	3,222	439,676	603094	199,818	0,82
2,5	3,185	445,502	593055	198,571	0,84
2,75	3,140	452,231	581261	197,127	0,85
3	3,108	449,060	573585	197,451	0,84
3,25	3,083	452,065	567248	196,830	0,85
3,5	3,052	456,370	559152	195,791	0,86
3,75	3,017	461,242	549786	194,480	0,87
4	2,980	467,123	539863	193,076	0,88
4,25	2,935	474,177	527793	191,298	0,89
4,5	2,881	483,018	513217	189,085	0,91
4,75	2,808	495,430	493516	185,884	0,94
5	2,439	562,438	394394	166,219	1,09

Tab. 3 Varianta 2 - vztažené na plochu

Příloha B – Varianta 2

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,483	404,098	672936	208,397	0,75
0,25	3,453	405,286	665222	207,907	0,75
0,5	3,430	407,947	659078	207,250	0,76
0,75	3,410	410,444	653661	206,665	0,76
1	3,391	412,867	648729	206,069	0,77
1,25	3,373	415,373	643745	205,484	0,77
1,5	3,354	417,856	638598	204,900	0,78
1,75	3,335	423,377	633328	204,167	0,79
2	3,315	426,049	628071	203,567	0,79
2,25	3,217	442,903	601194	199,305	0,83
2,5	3,183	448,053	592203	198,204	0,84
2,75	3,143	454,053	581553	196,906	0,85
3	3,112	453,153	573711	196,925	0,85
3,25	3,086	455,612	567304	196,367	0,86
3,5	3,055	459,811	559178	195,369	0,86
3,75	3,020	464,828	549791	194,096	0,87
4	2,982	470,517	539860	192,728	0,89
4,25	2,937	477,596	527790	190,962	0,90
4,5	2,883	486,428	513212	188,751	0,92
4,75	2,810	498,940	493505	185,546	0,95
5	2,455	564,349	398070	166,642	1,09

Tab. 4 Varianta 2 - vztažené na hmotnostní tok

Příloha B – Varianta 3

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,388	423,536	645161	204,273	0,79
0,25	3,352	427,832	635739	203,270	0,80
0,5	3,323	431,465	627963	202,422	0,80
0,75	3,295	435,044	620520	201,565	0,81
1	3,270	438,405	613736	200,749	0,82
1,25	3,244	441,820	606954	199,928	0,83
1,5	3,217	445,494	599794	199,055	0,83
1,75	3,189	449,384	592256	198,124	0,84
2	3,159	453,525	584233	197,119	0,85
2,25	3,128	458,048	576071	196,036	0,86
2,5	3,096	462,832	567386	194,875	0,87
2,75	3,061	468,099	558006	193,588	0,88
3	3,022	474,157	547454	192,086	0,89
3,25	2,978	481,046	535745	190,366	0,91
3,5	2,927	489,569	521757	188,216	0,93
3,75	2,857	501,464	502932	185,162	0,95
4	1,380	262,934	182891	190,098	0,51
4,25	0,778	853,074	22130	55,603	1,95
4,5	0,764	833,318	18800	68,046	1,83
4,75	0,773	827,084	21711	70,353	1,81
5	0,777	822,257	22813	72,371	1,79

Tab. 5 Varianta 3 - vztažené na plochu

Příloha B – Varianta 3

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,388	423,558	645161	204,272	0,79
0,25	3,353	428,291	635741	203,207	0,80
0,5	3,324	432,289	627959	202,295	0,81
0,75	3,296	436,222	620519	201,387	0,81
1	3,271	439,777	613737	200,566	0,82
1,25	3,245	443,288	606955	199,751	0,83
1,5	3,219	447,093	599794	198,868	0,84
1,75	3,190	451,142	592254	197,919	0,85
2	3,160	455,453	584236	196,889	0,85
2,25	3,130	460,114	576071	195,788	0,86
2,5	3,098	465,003	567382	194,609	0,87
2,75	3,063	470,388	558005	193,303	0,89
3	3,024	476,532	547467	191,789	0,90
3,25	2,980	483,519	535747	190,049	0,91
3,5	2,929	492,103	521758	187,885	0,93
3,75	2,859	504,014	502936	184,821	0,96
4	2,459	582,349	393369	162,175	1,13
4,25	0,840	835,569	33320	65,958	1,86
4,5	0,771	838,786	19483	66,867	1,84
4,75	0,779	829,897	22641	70,170	1,82
5	0,783	826,530	23547	71,754	1,80

Tab. 6 Varianta 3 - vztažené na hmotnostní tok

Příloha B – Varianta 4

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,918	306,038	801626	226,194	0,56
0,25	3,899	307,381	796831	225,917	0,56
0,5	3,884	308,524	792969	225,693	0,56
0,75	3,870	309,567	789365	225,490	0,56
1	3,763	150,249	779364	234,183	0,27
1,25	3,804	157,849	792034	235,854	0,29
1,5	3,932	134,847	829696	240,002	0,24
1,75	3,998	132,702	849275	242,109	0,24
2	4,032	131,751	859460	243,227	0,24
2,25	4,051	131,210	865341	243,887	0,24
2,5	4,063	131,037	869067	244,338	0,23
2,75	4,070	130,902	871491	244,691	0,23
3	4,075	130,730	873044	244,980	0,23
3,25	4,077	130,677	873906	245,197	0,23
3,5	4,077	130,648	874292	245,342	0,23
3,75	4,077	130,684	874370	245,434	0,23
4	3,092	402,756	586276	207,812	0,75
4,25	1,890	633,189	263687	145,545	1,26
4,5	1,913	625,330	270361	148,111	1,24
4,75	1,944	615,305	279376	151,278	1,21
5	1,960	609,938	284054	153,190	1,20

Tab. 7 Varianta 4 - vztažené na plochu

Příloha B – Varianta 4

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	3,918	306,040	801626	226,194	0,56
0,25	3,900	307,946	796832	225,861	0,56
0,5	3,885	309,472	792970	225,600	0,56
0,75	3,871	310,854	789365	225,366	0,57
1	3,851	309,623	784046	225,058	0,56
1,25	3,844	254,111	792427	230,688	0,46
1,5	3,960	218,431	829752	236,365	0,39
1,75	4,013	182,474	849291	240,116	0,33
2	4,040	163,029	859470	242,174	0,29
2,25	4,055	151,627	865346	243,397	0,27
2,5	4,064	144,444	869073	244,196	0,26
2,75	4,070	139,567	871492	244,738	0,25
3	4,074	136,162	873041	245,101	0,24
3,25	4,076	134,061	873905	245,321	0,24
3,5	4,076	132,836	874291	245,446	0,24
3,75	4,076	132,220	874358	245,514	0,24
4	3,143	403,282	597849	207,952	0,75
4,25	1,894	639,456	263396	144,271	1,27
4,5	1,916	631,122	270213	147,083	1,25
4,75	1,948	621,134	279342	150,338	1,23
5	1,967	614,809	284926	152,522	1,21

Tab. 8 Varianta 4 - vztažené na hmotnostní tok

Příloha B – Varianta R

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	4,535	60,125	991773	249,084	0,11
0,5	4,535	60,083	991678	249,084	0,11
1	4,535	60,079	991587	249,082	0,11
1,5	4,534	60,149	991482	249,078	0,11
2,3	4,534	60,087	991345	249,078	0,11
2,8	4,533	60,163	991244	249,075	0,11
3,2	4,533	60,148	991174	249,076	0,11
3,8	4,533	60,111	991110	249,077	0,11
4,2	4,532	60,118	991042	249,077	0,11
4,8	4,532	60,126	990976	249,077	0,11
5,2	4,532	60,119	990910	249,076	0,11
5,8	4,531	60,113	990845	249,076	0,11
6,2	4,531	60,058	990762	249,075	0,11
7	4,530	60,395	990556	249,065	0,11
7,5	4,530	60,217	990528	249,071	0,11
8	4,530	60,202	990468	249,073	0,11
9	4,529	60,288	990200	249,062	0,11
9,7	4,528	60,399	990086	249,068	0,11
10,2	4,528	60,322	990014	249,071	0,11
10,7	4,528	60,260	989951	249,074	0,11
11,2	4,527	60,242	989879	249,075	0,11
11,7	4,527	60,235	989804	249,075	0,11
12,2	4,527	60,222	989729	249,075	0,11
12,7	4,527	60,228	989656	249,075	0,11
13,3	4,526	60,280	989542	249,070	0,11
14	4,525	60,343	989331	249,061	0,11
14,6	4,525	60,508	989180	249,064	0,11
15,1	4,524	60,417	989116	249,068	0,11
15,6	4,524	60,365	989054	249,070	0,11
16,1	4,524	60,371	988959	249,069	0,11
16,6	4,523	60,410	988824	249,061	0,11
17	4,522	61,085	988389	249,030	0,11
17,3	4,523	60,591	988791	249,063	0,11
17,6	3,158	469,204	579238	193,234	0,88

tab. 9 Varianta R – vztažené na plochu

Příloha B – Varianta R

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
$l [m]$	$[kg \cdot m^3]$	$w [m \cdot s^{-1}]$	$p [Pa]$	$T [^{\circ}C]$	$[-]$
0	4,535	60,130	991773	249,084	0,11
0,5	4,535	60,139	991678	249,083	0,11
1	4,535	60,187	991587	249,081	0,11
1,5	4,534	60,373	991461	249,073	0,11
2,3	4,533	60,400	991317	249,071	0,11
2,8	4,533	60,455	991244	249,070	0,11
3,2	4,533	60,445	991174	249,070	0,11
3,8	4,533	60,404	991110	249,071	0,11
4,2	4,532	60,405	991042	249,071	0,11
4,8	4,532	60,419	990976	249,071	0,11
5,2	4,532	60,424	990910	249,071	0,11
5,8	4,532	60,427	990845	249,070	0,11
6,2	4,531	60,536	990735	249,065	0,11
7	4,530	60,901	990511	249,053	0,11
7,5	4,530	60,592	990528	249,065	0,11
8	4,530	60,530	990468	249,067	0,11
9	4,528	61,154	990031	249,039	0,11
9,7	4,528	60,666	990080	249,064	0,11
10,2	4,528	60,558	990014	249,067	0,11
10,7	4,528	60,449	989951	249,071	0,11
11,2	4,527	60,417	989878	249,072	0,11
11,7	4,527	60,419	989804	249,072	0,11
12,2	4,527	60,423	989729	249,072	0,11
12,7	4,527	60,445	989655	249,071	0,11
13,3	4,526	60,679	989510	249,061	0,11
14	4,525	61,238	989157	249,036	0,11
14,6	4,525	60,830	989185	249,058	0,11
15,1	4,524	60,700	989117	249,062	0,11
15,6	4,524	60,602	989054	249,066	0,11
16,1	4,524	60,691	988939	249,062	0,11
16,6	4,523	61,186	988665	249,039	0,11
17	4,521	62,395	988173	248,998	0,11
17,3	4,523	60,884	988758	249,057	0,11
17,6	3,154	470,892	577868	192,787	0,89

Tab. 10 Varianta R – vztažené na hmotnostní tok

PŘÍLOHA C

Fannovo proudění pro délku potrubní trasy 17,6 m

Příloha C – Fannovo proudění pro délku potrubní trasy 17,6 [m]

Vzdálenost od vstupu do potrubí	Hustota	Rychlost proudění	Tlak	Teplota	Machovo číslo
l [m]	$[\text{kg} \cdot \text{m}^3]$	w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	p [Pa]	T [°C]	[–]
0	3,403	345,095	773002,217	234,873	0,63
0,5	3,384	346,657	768663,159	234,721	0,64
1	3,365	348,549	764184,059	234,563	0,64
1,5	3,346	350,488	759642,494	234,400	0,64
2,3	3,314	353,691	752239,402	234,128	0,65
2,8	3,294	355,762	747522,650	233,952	0,65
3,2	3,277	357,458	743696,985	233,806	0,66
3,8	3,253	360,072	737867,373	233,582	0,66
4,2	3,236	361,863	733917,583	233,427	0,67
4,8	3,210	364,629	727892,929	233,186	0,67
5,2	3,193	366,528	723806,808	233,020	0,67
5,8	3,166	369,463	717567,447	232,762	0,68
6,2	3,146	371,716	712842,156	232,563	0,68
7	3,109	375,983	704037,622	232,183	0,69
7,5	3,084	378,777	698374,057	231,932	0,70
8	3,060	381,678	692576,111	231,670	0,70
9	3,009	387,839	680534,891	231,108	0,71
9,7	2,971	392,476	671709,426	230,681	0,72
10,2	2,944	395,973	665179,481	230,356	0,73
10,7	2,915	399,645	658440,985	230,012	0,74
11,2	2,886	403,510	651473,077	229,647	0,74
11,7	2,855	407,590	644251,451	229,259	0,75
12,2	2,824	411,913	636747,579	228,844	0,76
12,7	2,791	416,510	628927,695	228,400	0,77
13,3	2,750	422,445	619069,347	227,820	0,78
14	2,695	430,587	605959,775	227,014	0,80
14,6	2,645	438,131	594223,025	226,257	0,81
15,1	2,601	445,188	583580,599	225,540	0,82
15,6	2,552	453,165	571924,359	224,718	0,84
16,1	2,498	462,384	558923,663	223,756	0,86
16,6	2,436	473,371	544049,595	222,590	0,88
17	2,369	485,988	527744,748	221,227	0,90
17,3	2,310	497,466	513584,558	219,965	0,92
17,6	2,213	517,615	490144,373	217,701	0,96

Tab. 11 Fannovo proudění – délka potrubí 17,6 m