ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

JAKUB
SUCHÝ

Oficiální zadání

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne…… ……

podpis

Anotační list

Jméno autora	Bc. Jakub Suchý
Název DP	Mařič tlakové energie
Anglický název:	Multi-stage Restriction Orifice Assembly
Akademický rok:	2016 / 2017
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP/DP:	doc. Ing. Michal Kolovratník CSc.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 81
	Počet obrázků: 28
	Počet tabulek: 25
	Počet příloh: 0

Klíčová slova: tlaková ztráta, tlakový mařič energie, clona, CFD analýza

Keywords: pressure loss, Multi-stage Restriction Orifice Assembly, orifice, CFD analysis

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá metodikou výpočtu tlakových ztrát pro tlakový mařič energie. Práce je rozdělena na část teoretickou a výpočetní. Teoretická část popisuje princip funkce mařiče a obsahuje rešerši komerčně využívaných mařičů tlakové energie. Ve výpočetní části byly počítány tlakové ztráty v mařiči pomocí analytického výpočtu a pomocí CFD analýzy. Práce obsahuje obecný rozbor analytického výpočtu tlakových ztrát, který je poté aplikován na jednotlivé clony tlakového mařiče. Výsledky z tohoto výpočtu jsou poté srovnány s výsledky z CFD. Závěrem práce je porovnání výsledků z reálné zkoušky mařiče s výsledky ze simulace mařiče pomocí CFD. Výsledky práce ukazují, že analýza CFD je v kombinaci s analytickým výpočtem vhodným nástrojem pro řešení návrhu tlakového mařiče.

Abstract:

This thesis deals with methodology of pressure losses calculation for restriction orifice assembly. The thesis is divided into theoretical and calculation part. The theoretical part describes the principles of restriction orifice assembly functioning and it also contains a research of commercially used restriction orifice assemblies. In the calculation part, pressure losses in restriction orifice assembly are calculated by analytical calculations and by CFD analysis. The thesis contains a general description of pressure losses analytical calculation that is then applied to individual orifices of restriction orifice assembly. Results of this calculation are subsequently compared to the results from CFD. At the end of this thesis, a comparison of a real experiment results and CFD simulation of restriction orifice assembly is made. The results show that using CFD analysis in combination with analytical calculation is a suitable way how to resolve the restriction orifice assembly design.

Poděkování

Za připomínky a věnovaný čas děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Michalu Kolovratníkovi, CSc. Za pomoc a rady v programech ANSYS a s řešením CFD analýzy děkuji Ing. Petrovi Pečenému.

Za možnost zúčastnit se zkoušky mařiče a za poskytnutá data děkuji Ing. Martinovi Pulcovi ze ŠKODA JS.

Za podporu při psaní této práce i během celého mého studia děkuji své rodině a přítelkyni JUDr. Ing. Zuzaně Smrčinové.

Obsah

Oficiální zadání **2**

Čestné prohlášení **3**

Anotační list **4**

Poděkování **6**

Obsah **7**

Seznam zkratek **9**

Seznam symbolů **9**

Seznam indexů **11**

Úvod **12**

1. Mařič energie *13*

1.1. Technická realizace mařiče 13

1.2. Clony 14

1.3. Parametry mařičů 16

1.4. Materiály pro výrobu mařiče 17

1.5. Upevnění clon v tělese 17

1.6. Instalace mařiče v potrubí 18

2. Princip funkce mařiče *19*

2.1. Škrcení na cloně 19

2.2. Změna teploty reálného plynu při škrcení, Joule Thompsonův efekt 21

2.3. Kritické proudění na cloně 22

2.4. Hugoniotova věta 23

3. Identifikace mařiče pro výpočet *24*

3.1. Mařič pro odvod vodíku z primárního okruhu jaderné elektrárny 24

3.2. Vodík v primární zóně jaderné elektrárny 25

4. Výpočtová část – analytický výpočet a numerické modelování *27*

4.1. Rozbor analytického výpočtu 27

4.2. rozbor CFD výpočtu 28

4.2.1 postup analytického výpočtu 29

4.2.2 postup při vytváření sítě pro výpočet v CFD 37

5. Srovnání výsledků analytického výpočtu s hodnotami z CFX 42

5.1. Srovnání analytického výpočtu s výpočtem z CFX pro 2 různá media 42

5.2. Srovnání analytického výpočtu s hodnotami z CFX při rozdílné tlakové diferenci 45

5.3. Vliv délky clony na průtok media 47

5.4. Vliv délky rozšířeného potrubí před clonou 48

6. Interakce dvou a více clon 50

6.1. Vzájemná interakce dvou clon při konstantní tlakové diferenci 50

6.2. Interakce dvou clon při zachování konstantního průtoku 52

6.3. Použití více clon za sebou, vliv a význam dalších úprav 53

6.3.1 Použití více clon za sebou při konstantní tlakové diferenci 54

6.3.2 Použití více clon za sebou při konstantním průtoku 55

7. Srovnání výpočtu mařiče v CFD s reálnou zkouškou mařiče na páře 66

7.1. Zkouška mařiče 66

7.2. Provedení zkoušky 67

7.3. Porovnání vypočtené tlakové ztráty s výsledky reálné zkoušky zvoleného mařiče 69

Závěr 75

Seznam použité literatury 77

Seznam tabulek 79

Seznam obrázků 80

Seznam zkratek

BAP	budova aktivních provozů
CFD	Computational Fluid Dynamic
ČSN	české technické normy
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	jmenovitá světlost potrubí
JE	jaderná elektrárna
PN	tlaková řada potrubí
PP	polypropylen
PTFE	polytetrafluorethen
PVC	polyvinylchlorid

Seznam symbolů

A	průřez potrubí	[m^2]
a	rychlost zvuku	[m/s]
C_i	index kavitace	[-]
c_p	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	[J/kg·K]
c	absolutní rychlost tekutiny	[m/s]
d	průměr	[m]

Ek_1	kinetická energie	[J]
e_z	měrná ztrátová energie	[J/kg]
h	entalpie	[J/kg]
l	délka	[m]
M	molární hmotnost	[kg/kmol]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok	[kg/s]
Ma	Machovo číslo	[-]
p*	kritický tlak	[Pa]
p	tlak	[Pa]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
p_v	tlak nasycených par kapaliny	[Pa]
Q	objemový průtok	[m^3/s]
R	univerzální plynová konstanta	[J/kmol·K]
r	měrná plynová konstanta	[J/kg·K]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
T	termodynamická teplota	[K]
t	teplota	[°C]
U_1	vnitřní energie	[J]
β	tlakový poměr	[-]
β^2	součinitel kontrakce	[-]

μ	dynamická viskozita	[Pa·s]
ν	kinematická viskozita	[m^2/s]
ρ	hustota	[kg/m^3]
ζ	ztrátový součinitel tření na délce l	[-]
λ	součinitel tření	[-]
ξ	ztrátový součinitel pro místní odpor	[-]

Seznam indexů

1-9	označení termodynamického stavu dané veličiny
ztř1-4	měrná třecí ztrátová energie v jednotlivých úsecích potrubí
tř1-4	tlaková ztráta třením v jednotlivých úsecích potrubí
zcelk1-4	celková měrná třecí a místní ztráta v jednotlivých úsecích potrubí
4-7-10ref	referenční tlak spočítaný v rovině A,B,C zároveň odečtený v rovině A,B,C v CFX
3-1	průměr d_3, pozice clony v soustavě -1

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku mařičů tlakové energie, konkrétně na mařič 2POT14638/A od společnosti Škoda JS. Mařič tlakové energie je potrubní komponenta, ve které dochází k redukovanému průtoku při vysokých tlakových spádech před a za mařičem. Účel tohoto konkrétního mařiče je tedy zajistit požadovaný průtok při známých tlakových a teplotních spádech.

Cílem práce je provést výpočet a rozbor tlakové ztráty na tomto konkrétním mařiči s využitím analýzy CFD.

Impulzem pro sepsání této práce byla nabídka společnosti Škoda JS a.s. podílet se na řešení úprav jejich mařiče energie. Tento mařič je instalován na jaderné elektrárně Temelín, kde slouží k odvodu vodíku a nezkondenzovaných plynů z primárního okruhu jaderné elektrárny. Od Škoda JS jsem získal informace a podklady geometrie mařiče.

Práce je rozdělena podle zadání na část teoretickou a výpočtovou.

1) Teoretická část popisuje princip funkce mařiče a obsahuje rešerši komerčně využívaných mařičů tlakové energie.

2) Ve výpočtové části je obecný rozbor výpočtu pro tlakové ztráty, který je následně aplikován na jednotlivé clony mařiče. Cílem rozboru je určit tlakovou ztrátu na základním elementu mařiče, tedy na cloně. Tlaková ztráta je řešena pomocí analytického výpočtu a pomocí CFD. CFD je matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin a v této práci pomocí CFD simuluji proudění na cloně. Obě varianty výpočtu jsou pak porovnány. Pomocí CFD jsou počítány různé varianty clon a je analyzován vliv geometrických úprav na změnu parametrů mařiče. Dále je pomocí CFD řešena vzájemná interakce sériově uspořádaných clon tak, jak jsou navrhovány a používány v tlakových mařičích.

3) Závěrem práce je popis průběhu reálné zkoušky mařiče na páře, které jsem se zúčastnil. Výsledky z této zkoušky jsou pak porovnány s výsledky výpočtu celého mařiče v CFD. Následuje zhodnocení vypočtených výsledků.

1. Mařič energie

Mařič energie je potrubní komponenta, ve které dochází k redukovanému průtoku při vysokých tlakových spádech před a za mařičem. Provozní látkou může být voda, kapalina nebo směs plynů. Základním prvkem v mařiči je clona, případně soustava clon. Clona je deska s kruhovým otvorem uprostřed, která je vložena do potrubí. Na cloně dochází k redukci tlaku.

1.1. Technická realizace mařiče

Jednostupňový mařič je složen z jedné clony. V případě, že jednou clonou nelze dosáhnout požadované tlakové ztráty, jsou mařiče navrhovány jako vícestupňové. Jedná se o soustavu za sebou sériově uspořádaných clon. Mařiče pro redukci tlaku se mohou používat pro kapaliny a plyny. Pokud mařič slouží pro redukci tlaku v kapalině, jsou průměry clon stejně velké, protože se nepředpokládá výrazná změna měrných objemů. U kapalin se vícestupňovým uspořádáním zabraňuje kavitaci na clonách. K zabránění kavitace se volí index kavitace pod hodnotu 2 na každé cloně. [1]

index kavitace $C_i = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2}$

p_1 = tlak před clonou

p_2= tlak za clonou

p_v = tlak nasycených par kapaliny

Italská společnost TM Tecnomatic Srl, která se zabývá výrobou zařízení pro měření průtoku a teploty, uvádí, že použití vícestupňové clony je doporučeno od tlakové diference 300psi (2,068 MPa). Kromě zabránění kavitace firma uvádí i další důvody pro zvolení vícestupňového provedení. Jde o snížení opotřebení jednotlivých otvorů a omezení hluku a vibrací. Tyto konkrétní mařiče slouží k redukci tlaku u napájecí vody. TM Tecnomatic Srl tyto mařiče instaluje do obtokového potrubí pro napájecí vodu do kotle. [2]

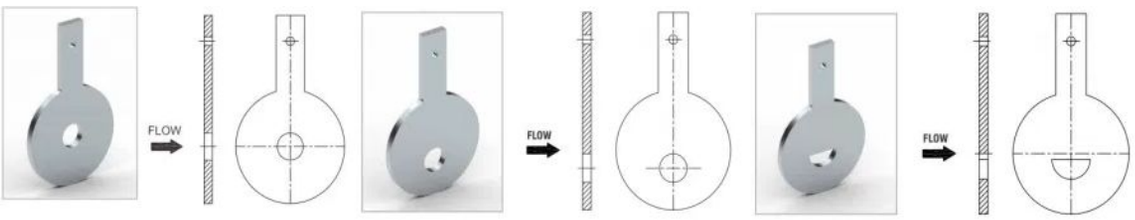
U mařiče určeného pro plyny dochází při expanzi plynu ke zvětšení měrného objemu. Zvětší se tak i objemový průtok, a proto jsou průměry clon zvětšovány. Jedním z technických důvodů pro realizaci vícestupňového mařiče je snaha o dosažení podkritického proudění ve clonách viz kapitola 2.4 Hugoinitova věta.

1.2. Clony

Clona jako zařízení slouží v technické praxi nejen k redukci tlakových spádů, ale častěji se využívá k měření průtoku tekutin. Technická praxe tedy rozlišuje měřící clony a omezovací clony.

Jednotlivé clony jsou různých tvarů a typů:

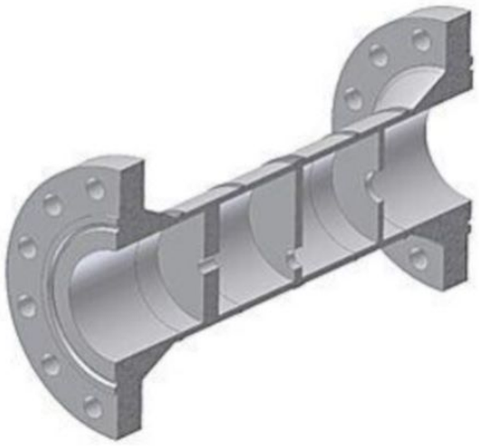
- Centrické
- Excentrické
- Kruhové
- Segmentové
- Obdélníkové



Obrázek 1: ukázka centrické, excentrické a segmentové clony z nabídky indické společnosti Fabri-Tek Equipments Pvt. Ltd. [3]

Různých tvarů a typů se využívá u clon sloužících k měření průtoku. K měření průtoku se používá jedna clona nebo dvojclona (dvě clony těsně za sebou).

S vícestupňovým uspořádáním clon se často setkáváme u omezovacích clon sloužících k redukci tlaku. Omezovací clony jsou určeny k tomu, abychom mohli realizovat velký pokles tlaku. Jsou konstruovány odlišně od měřících clon. Clona musí být s ostrými hranami a válcovou dírou, bez zkosení na zadní hraně, jak to bývá u clon na měření průtoku. [4]



Obrázek 2: řez vícestupňovým mařičem s různou konfigurací jednotlivých clon, 1. a 3. clona centrická, 2. excentrická [5]

Pro vícestupňové mařiče určené k redukci tlaku se používají kruhové centrické a kruhové excentrické clony. Existují i clony (tzv. Multi-hole) s různým počtem otvorů, jak je vidět na obrázku 3. Hlavní výhodou je snížení hluku, který vzniká při průtoku přes clonu. Francouzská společnost Deltafluid uvádí v propagačních materiálech, že při dodržení úrovně hluku u zařízení <85 dB volí clony Multi-hole. [6]

Úroveň hluku ale nemusí být vždy hlídaná veličina, neboť v mnoha průmyslových aplikacích s mařiči hraje zanedbatelnou roli.

Obrázek 3: clony s více otvory z produkce dánské společnosti EmcoControls [7]

1.3. Parametry mařičů

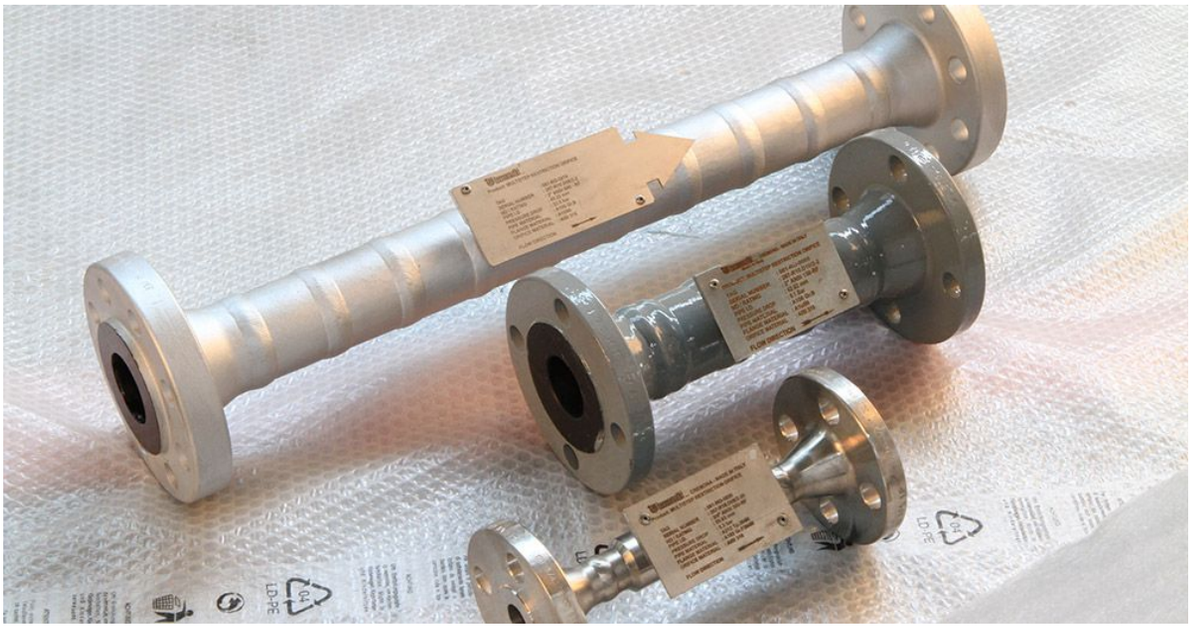
Tlakové mařiče, určené pro kapaliny nebo pro plyny, se vyrábí pro různé parametry média. Podle dostupných údajů jsou tlakové mařiče obvykle vyráběny pro jednotlivé případy, kde se parametry mařiče přizpůsobují požadavkům zákazníka. Ucelenou řadu mařičů firmy nenabízí. Pro výrobu konkrétního mařiče je nutné výrobci upřesnit vstupní a výstupní tlaky a požadovaný průtok. Dále pak je třeba specifikovat pracovní teplotu media, PN, DN, min. velikost sestavy, připojovací rozměry a případné další technické požadavky (maximální hmotnost atd.).

Tabulka 1: ukázka nabízených teplotních a tlakových rozsahů pro materiál P250GH, ze kterého je vyroben mařič M25 na vodu a neagresivní kapaliny od společnosti Trival [8]

Materiál	PN	Dovolený pracovní tlak PS [bar] pro maximální pracovní teplotu TS [°C]										
		-10	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
P250GH (C22.8) (1.0460)	160	160	160	160	148	141	133	122	110	103	95	53
	250	250	250	250	232	220	208	190	173	161	149	82
	400	400	400	400	371	352	333	305	276	257	238	131

Přivařovací a přírubové připojení, pomocí nichž lze mařič připojit do potrubního systému, nabízí většina výrobců zahraničních i českých. V České

republice se úprava konců armatury pro přivaření řídí normou ČSN 13 1075 a DIN 2559. Připojovací rozměry příruby jsou dány normou ČSN 13 1060 a DIN 2501.



Obrázek 4: reálné provedení mařičů s přírubovým připojením výrobce TM Tecnomatic Srl [2]

1.4. Materiály pro výrobu mařiče

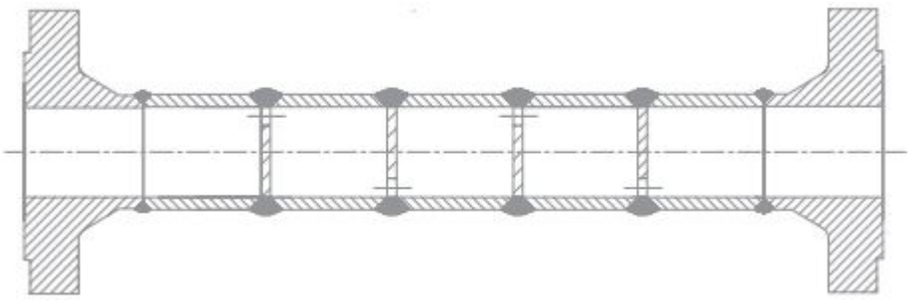
V závislosti na druhu a pracovních parametrech media je možnost použít velké množství materiálů. Většinou jsou to materiály kovové. V nabídce jsou uhlíkové oceli, nerezové oceli, slitiny titanu, inconel atd. Někteří výrobci nabízí i mařiče z PP, PVC a PTFE. [9] [10]

Výrobci často nabízí provedení, kdy těleso není ze stejného materiálu jako clony. Z ekonomických důvodů může těleso například být z méně ušlechtilé uhlíkové oceli a clony z nerezové oceli. Na clony, z důvodu většího opotřebení materiálu, je vždy použit kvalitnější materiál než na těleso mařiče.

1.5. Upevnění clon v tělese

Mařič může být v rozebíratelném provedení nebo v nerozebíratelném. Výhoda rozebíratelného mařiče je v jednoduché demontáži a výměně jednotlivých clon.

Výroba je však složitější a nákladnější. Clony jsou vsunuty do tělesa mařiče a odděleny od sebe například rozpěrnými pouzdry, nebo jsou clony natolik široké, že není nutné použití rozpěrných trubek. Rozebíratelný mařič je předmětem této práce a jeho detailní výkres je uveden v kapitole 7. U nerozebíratelného mařiče jsou clony navařeny do tělesa a výměna jednotlivých clon není možná. Jedná se o levnější, jednodušší a komerčně častěji nabízené řešení. Reálné provedení je vidět na obrázku 4 a 5.



Obrázek 5: příklad mařiče s navařenými 4 clonami v tělese a s přivařenými připojovacími přírubami, výrobek společnosti Prisma Instruments & Gauge Bourdon France [11]

1.6. Instalace mařiče v potrubí

Výrobou mařičů energie se zabývá velké množství výrobců po celém světě. Pro správnou funkci mařiče shodně uvádějí několik zásad a doporučení.

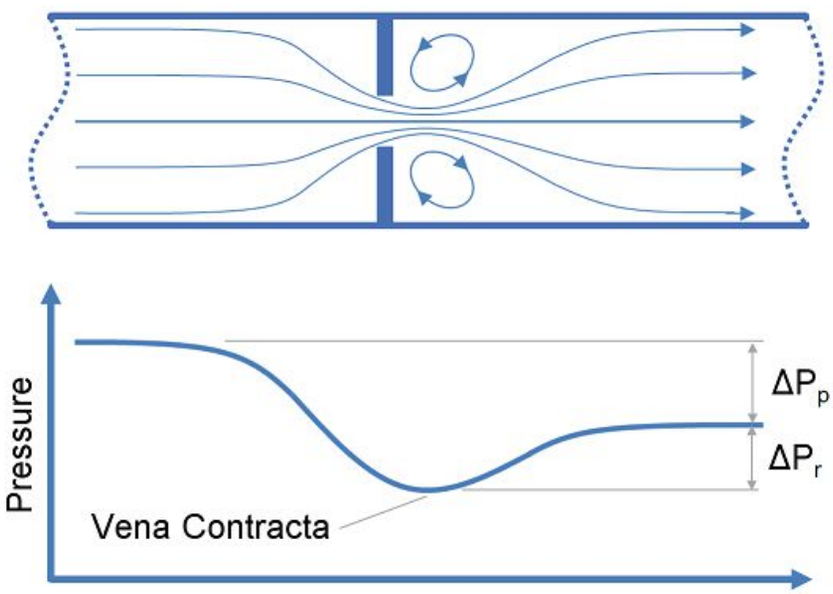
Pro správnou funkci mařiče je především potřeba, aby potrubí za ním bylo rovné v minimální délce 20 D. Mařič může být instalován v libovolné poloze, ale je nutné zachovat správné napojení vstupu a výstupu do mařiče, které není záměnné. Správná funkce mařiče a jeho životnost je závislá na druhu media a jeho parametrech. Provozní parametry musí odpovídat navrhovaným parametrům a nesmí být překračovány. Důležitá je i čistota media, tak aby nedošlo k ucpání mařiče. K záchytu nečistot se doporučují filtry či sítka.

2. Princip funkce mařiče

2.1. Škrcení na cloně

Na jednotlivých clonách mařiče probíhá škrcení proudící tekutiny. Škrcení je děj, kdy vzniká trvalá tlaková ztráta a roste entropie. Entalpie zůstává konstantní. Ke škrcení dochází při proudění tekutiny v kanálu při náhlé výrazné změně průtočného průřezu. V místě zúžení vzrůstá rychlost proudícího plynu, a tím i jeho kinetická energie. Předpokládáme adiabatický děj, kdy nedochází k přívodu ani odvodu tepla pracovní látky. K nárůstu kinetické energie tedy dochází na úkor snížení tepelné a tlakové energie plynu. Za změnou průtočného průřezu dochází k víření a vzájemnému narážení proudů plynu a dochází k vzniku tlakové ztráty. Tento proces je nevratný a zde dochází k nárůstu entropie.

Průběh statického tlaku je znázorněn na obrázku 6, kde je vidět nejdříve pokles statického tlaku před clonou. Dochází k expanzi plynu až do nejužšího místa clony. Zde se dosažená maximální rychlost c_{max} začne zmenšovat a díky zvětšení průtočného průřezu dochází ke kompresi plynu. Ovšem již není dosaženo původní hodnoty statického tlaku a ΔP_p je vzniklá tlaková ztráta.



Obrázek 6: vznik trvalé tlakové ztráty na cloně ΔP_p [12]

Základní chování plynu při škrcení vychází ze známých popisů z termomechaniky. Tento popis je zde pro doplnění uveden:

„Před škrcením má plyn vnitřní energii U_1, po škrcení U_2.

Plyn proudí před škrcením rychlostí c_1 a za zúženým místem rychlostí c_2, takže kinetická energie proudu pro m=1 kg je

$$Ek_1 = \frac{c_1^2}{2} \quad ; \quad Ek_2 = \frac{c_2^2}{2}$$

Poněvadž expanzí plynu při škrcení není konána žádná vnější práce, je celková energie proudícího plynu před škrcením i po něm stejná.

Pro hmotnost plynu m=1 kg při ustáleném proudu je podle zákona o zachování energie

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{c_1^2}{2} = u_2 + p_2 v_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

Dosadíme-li za součet vnitřní energie u a tlakové energie pv entalpii u + pv = h,

bude

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

Zanedbáním kinetických energií (při rychlostech proudu před clonkou i za ní menších než c=40 m/s) bude

$$h_1 = h_2$$

Entalpie před škrcením i po škrcení je tudíž stejná. Rovnost entalpií před škrcením a po něm v určité vzdálenosti před clonkou a za ní neznamená, že mezi těmito místy je

$$h_1 = h_2 = \text{konst.}$$

a tedy dh = 0. Ve skutečnosti v místě škrcení a v jeho blízkosti entalpie plynu nejdříve klesá a pak stoupá. Poněvadž v technické praxi mají význam stavy před místem škrcení a za ním, činíme zjednodušující předpoklad, že během celého procesu škrcení se entalpie nemění, a že tudíž platí obecně $h_1 = h_2$ = konst. a též dh = 0. To, že se entalpie se škrcením nemění, je vlastnost, nikoliv definice škrcení, jelikož např. izotermická expanze ideálního plynu je také děj při h = konst.

Dosavadní poznatky o škrcení můžeme shrnout ve větu: „škrcení je expanze plynu z vyššího tlaku na nižší, při níž se nekoná vnější práce a entalpie plynu se nemění."

Jak se mění teplota ideálního plynu škrcením, vyplývá z podmínky, že $h_1 = h_2$, a tudíž $c_pT_1 = c_pT_2$.

Protože pro ideální plyny platí c_p = konst., je $T_1 = T_2$. Teplota ideálního plynu se škrcením nemění." [13]

Tlaková ztráta, kterou jsme škrcením dosáhli, může být různě veliká a v technické praxi je buď žádaná, nebo je naopak snaha o co možná nejmenší hodnotu tlakové ztráty. Žádaná je například právě u mařiče, který je k tomuto účelu určen. Nežádoucí je například u uzavíracích ventilů, šoupátek atd.

2.2. Změna teploty reálného plynu při škrcení, Joule Thompsonův efekt

Neměnnost teploty při škrcení platí jen u ideálního plynu. Ideální plyny dokonale vyhovují rovnici stavu odvozené z Boyle - Mariotova a Gay - Lussacova zákona.

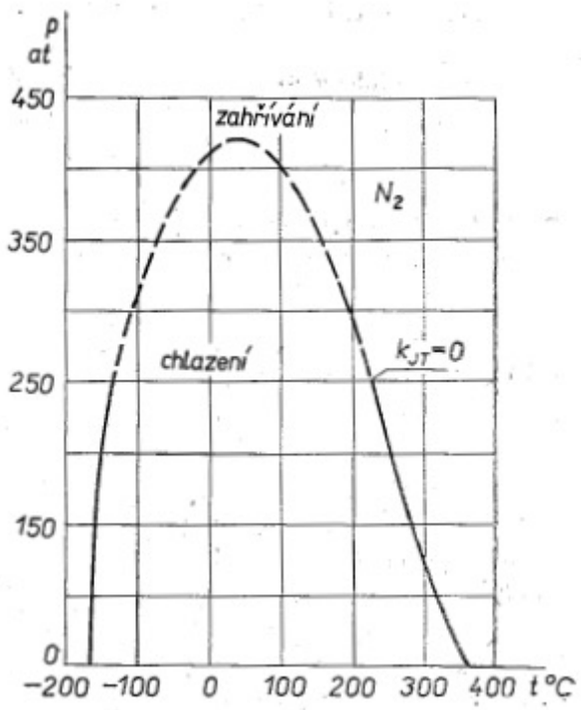
$$pV = nRT$$

Měrná tepla ideálních plynů jsou stálá. Naproti tomu u reálných plynů je měrná tepelná kapacita c_p funkcí tlaku a teploty.

Joule Thompsonův pokus ukázal, že při expanzi za konstantní entalpie dochází ke změně teploty. Dochází tedy k ochlazení plynu při expanzi, pokud je teplota při

expanzi nižší než inverzní teplota. Pokud je teplota vyšší, dochází naopak při expanzi k ohřevu plynu.

Každý plyn má svou specifickou inverzní teplotu. V p-t diagramu inverzní křivka odděluje oblast, kde se plyn ohřívá a kde ochlazuje. Na inverzní křivce vykazuje plyn při škrcení stejné chování jako ideální plyn. Na obrázku 7 je jako příklad inverzní křivky zobrazen průběh inverzní křivky pro dusík.



Obrázek 7: inverzní křivka vynesená v p-t diagramu [13]

2.3. Kritické proudění na cloně

Rozlišujeme podkritické, kritické a nadkritické proudění. Je-li tlakový poměr větší než kritický, jedná se o podkritické proudění. Kritické proudění nastává, pokud je hodnota $\beta = \beta^*$. Dosáhne-li tlakový poměr β menší hodnoty než β^*, nastává nadkritické proudění.

$$\beta = \frac{p_{vyst}}{p_{vst}} \tag{1}$$

kritický tlakový poměr $\beta^* = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$ (2) [14]

p_{vst} – tlak na vstupu do zužujícího průřezu

p_{vyst} – tlak za zužujícím průřezem

Pokud je hodnota β nižší nebo totožná s kritickým tlakovým poměrem, je rychlost proudění v nejužším místě průřezu rovna rychlosti šíření zvuku a v daném prostředí a nastává kritická rychlost. Rychlost zvuku a je definována jako rychlost šíření slabého tlakového rozruchu ve stlačitelném prostředí.

$a=\sqrt{\kappa rT}$ [m/s] (3)

Ze vztahu (3) vyplývá, že rychlost zvuku je přímo závislá na lokální teplotě. Při kritickém proudění dochází k zásadní změně průtokové charakteristiky. V kritickém bodu, který odpovídá kritickému tlaku p*, elementární tlakový rozruch, který je nositelem informace o změně průtokových poměrů, přestává pronikat proti proudu. Pokud neproniká informace o změně proudové charakteristiky, vznikají tak odlišné vlastnosti proudění v místě před kritickým bodem a v místě za kritickým prouděním.

Machovo číslo Ma, které porovnává lokální rychlost proudu s rychlostí zvuku v daném prostředí, je pak < 1 při podkritickém proudění.

$$Ma = \frac{c}{a} \quad (4)$$

2.4. Hugoniotova věta

$$\frac{dA}{A} = \frac{dc}{c}\left(\frac{c^2}{a^2} - 1\right) \quad (5)$$

Po dosazení (4) pak lze Hugoniotovu větu zapsat jako

$$\frac{dA}{A} = \frac{dc}{c}\left(Ma^2 - 1\right) \quad (6)$$

Pokud se proud urychluje $\frac{dc}{c} > 0$ při podzvukovém Ma, tj. při Ma< 1, tak se zmenšuje plocha $\frac{dA}{A} < 0$.

Jedná se tedy o trysku, která se v podzvukovém proudění zužuje. V trysce dochází ke zvýšení rychlosti a snížení tlaku.

Pokud by bylo Ma> 1, jednalo by se o nadzvukové proudění a dle (6) by se tryska rozšiřovala.

Trubice, kde rychlost klesá ($\frac{dc}{c} < 0$), se dle (6) v podkritickém proudění musí rozšiřovat. Nazývá se difuzor. V difuzoru dochází k transformaci kinetické energie z rychlosti proudu v energii tlakovou.

Pokud by bylo Ma> 1, jednalo by se o nadzvukové proudění a dle (6) by se difuzor zužoval.

Vzhledem k závěrům z Hugonitovy věty je u mařiče 2POT14638/A, který je předmětem této práce použito pro zpracování velkého tlakového spádu více clon, aby se zamezilo kritickému proudění. Počet clonek v mařiči a jejich průměr je zohledňován při návrhu mařiče tak, aby bylo proudění podkritické. Při nadkritickém proudění je nebezpečí rychlého vyšlehání jednotlivých clonek.

3. Identifikace mařiče pro výpočet

V rámci této diplomové práce byl proveden rozbor a výpočet reálného mařiče tlakové energie, který je dále stručně popsán. V dalších kapitolách je pak tento mařič použit pro dílčí i celkové výpočty.

3.1. Mařič pro odvod vodíku z primárního okruhu jaderné elektrárny

Mařič 2POT14638/A, na který je zaměřena tato práce, bude v blízké době v pozměněné konfiguraci instalován na jaderné elektrárně Temelín. Výrobcem mařiče je společnost Škoda JS a.s. Tento konkrétní mařič slouží pro redukci tlaku a průtoku

směsi vodíku, nekondenzujících plynů a vodní páry, odebírané z primárního okruhu jaderné elektrárny Temelín. Odebírané medium má parametry 15,7 MPa a 346 °C. Obdobný mařič je již instalován na JE Mochovce. Dále jsou mařiče starší a jednodušší konstrukce nainstalovány pro odvod vodíku před hlavními pojistnými ventily v rámci systému kompenzace objemu na JE Dukovany a JE Jaslovské Bohunice. U těchto starších typů ale dochází k rychlému vyšlehávání otvorů clonek, takže dochází k výraznému postupnému nárůstu průtoku.

3.2. Vodík v primární zóně jaderné elektrárny

V předešlých kapitolách je zmiňováno využití mařiče 2POT14638/A pro odvod vodíku z primárního okruhu u JE Temelín. Proto tato kapitola v krátkosti pojednává o problematice a vzniku vodíku v primární zóně JE.

Vodík vzniká při radiolýze vody v aktivní zóně reaktoru. Kromě vodíku vzniká při radiolýze také kyslík. Do chladiva v primárním okruhu je přidáván amoniak, který se při radiolýze rozkládá na vodík a dusík. Amoniak je přidáván z důvodu korozní agresivity samotného kyslíku. Vodík vzniklý při rozkladu amoniaku se slučuje s kyslíkem a dusík není pro kovové součásti nebezpečný. Vyšší koncentrace vodíku je tedy proto žádaná, aby byla snížena koncentrace rozpuštěného korozně agresivního kyslíku. Zároveň je ale potřeba upravovat a udržovat hladinu koncentrace vodíku na určitých mezích z důvodu výbušnosti vodíku při vyšších koncentracích. Proto je nutné upravovat koncentraci vodíku pomocí odběrů. Koncentrace nesmí překročit mez, kdy by nebyl systém pro spalování vodíku schopen zpracovat množství vodíku ve všech provozních stavech.

Následující text je v plném rozsahu převzat z protokolů o měření poskytnutých společnosti Škoda JS:

„Neodvádění nezkondenzovaných plynů s vodíkem může způsobit v primárním okruhu jaderné elektrárny dva zásadní problémy.

Zaprvé, při hromadění vodíku nad hladinou v kompenzátoru objemu vnikne při otevření hlavního pojistného ventilu směs nezkondenzovaných plynů do barbotážní nádrže. Tím dochází k prasknutí membrán v barbotážní nádrži a k vniku

třaskavého plynu do boxu PG, což může mít za následek výbuch a požár zařízení, nebo minimálně nadlimitní koncentraci vodíku před systémem pro spalování vodíku v BAP (budova aktivních provozů).

Zadruhé, nahromaděním nezkondenzovaných plynů před hlavním pojistným ventilem a odlehčovacím ventilem vznikne před oběma ventily tepelná izolace, která způsobí vychlazení ventilů. Tím dochází k provoznímu stavu, na který nejsou ventily kvalifikovány.

Z důvodu odstranění těchto nedostatků byl navržen systém kontinuálního odvodu vodíku z primárního okruhu z místa nad hladinou kompenzátoru objemu. Tento systém nahradil původní systémy, které byly založeny na periodickém odvodu vodíku. Systém odvodu je složen z potrubních tras, samotného mařiče a uzavíracích armatur. Uzavírací armatury slouží pouze pro případné odstavení systému. V uzavíracích armaturách nedochází ke škrcení, neboť vzhledem k vysokým parametrům škrceného media by došlo k rychlému vyšlehání kuželky v armatuře. Ke škrcení dochází tedy pouze v mařiči, který je tvořen soustavou několika clon a svým návrhem je pro tento účel uzpůsoben. Dříve se používala k seškrcení odebraného vodíku pouze jedna clona. Toto řešení vypadalo tak, že byla mezi přívodní potrubí před hlavní pojistný ventil a výfukové potrubí doplněna přepouštěcí trasa s vloženou malou jednoduchou clonou na každém obtoku. Tato clona musela mít průměr otvoru daleko menší, než mají clony v mařiči tak, aby byla schopna dosáhnout požadovaného tlakového spádu. V praxi se pak projevilo několik zásadních nevýhod tohoto řešení oproti řešení se soustavou několika po sobě jdoucích clon:

- otvor ve cloně se může při provozu ucpávat nebo se naopak vyšlehávat a v důsledku toho se zbytečně odpouští s vodíkem příliš velké množství páry
- neexistuje žádný mechanizmus kontroly zanesení nebo naopak neúměrného vyšlehání na jednotlivých větvích – v barbotážní nádrži kondenzuje stále větší množství páry a vzniklý aktivní kondenzát je třeba odvádět

- clonky nemají dlouhou životnost a je nutno je postupně při odstávkách vyměňovat.“ [15]

V praxi pak soustava těchto problémů vedla k návrhu a použití vícestupňových mařičů.

4. Výpočtová část – analytický výpočet a numerické modelování

Výpočet je proveden ve dvou rovinách. Jedna část je řešena klasickým analytickým způsobem jako výpočet místních tlakových odporů s využitím experimentálních vzorců. Jedná se o výpočet tlakové ztráty základního elementu na daném mařiči. Základním elementem je jedna clona včetně potrubí před a za clonou, jak je vidět na obrázku 8 níže. Paralelně je proveden výpočet stejné geometrie pomocí analýzy CFD. Výsledky z CFD a analytického výpočtu pro jednotlivé konfigurace clon jsou srovnávány v dalších podkapitolách. Následně je provedena simulace pomocí CFD na za sebou jdoucích dvou clonách a je řešena jejich vzájemná interakce. Část výsledků ze simulace bude porovnána s analytickým výpočtem. Závěrem je celý mařič pomocí simulace CFD porovnán s reálným měřením mařiče. Při simulaci byly uvažovány dvě varianty popisu termodynamických vlastností pracovního media. Jedno jako reálná vodní pára a druhé jako ideální plyn s vlastnostmi páry.

Cílem výpočtové části je ukázat, nakolik jednotlivé změny parametrů a geometrické konfigurace ovlivňují výstupní parametry na cloně, případně na soustavě clon.

4.1. Rozbor analytického výpočtu

Analytický výpočet pro clonu byl počítán jako série tlakových ztrát v potrubí. Dostupné nalezené výpočtové postupy a vzorce pro řešení tlakové ztráty na cloně slouží pouze pro výpočet tlakové diference na měřící cloně. Vzhledem ke konkrétní geometrii mnou počítané clony v poměru průměru potrubí k průměru clony nejsou v materiálech pro výpočet měřících clon uvedeny podklady pro výpočet. Nelze z podkladů stanovit průtokový součinitel ani součinitel kontrakce $\beta^2 = d^2/D^2$ a od toho

odvozené další veličiny, protože u měřících clon jsem hodnotou průměrů potrubí a clony mimo rozsah uváděných nomogramů. Pokud jsem se pokusil aproximací zjistit průtokový součinitel, součinitel kontrakce a jiné hodnoty, dospěl jsem stejně ve výsledku k velmi malé tlakové diferenci na cloně, která neodpovídá realitě. V důsledku, že nebylo možno použít dostupné materiály pro výpočet tlakové ztráty tak, jak je použito u měřících clon a malého množství informací o této problematice, jsem zvolil postup níže uvedený. Tedy představa, že clona je počítána jako sériově řazené hydraulické odpory a vzhledem k charakteru proudění je nutno uvažovat i třecí ztráty, nejen ztráty místními odpory. Výpočet se ale chová, jako když počítáme 3 nezávislé hydraulické odpory. Výpočet nerespektuje vzdálenost hydraulických odporů. Ve skutečnosti se ale odpory vzájemně ovlivňují díky tomu, jak blízko jsou u sebe. Proto se vypočtené hodnoty pomocí analytického výpočtu musí trochu lišit od skutečných hodnot na cloně. Více je daná problematika výpočtu popsána dále v kapitole 4.2.1 postup analytického výpočtu.

4.2. rozbor CFD výpočtu

Pro simulaci proudění byla použita CFD analýza (Computational Fluid Dynamic). Jedná se o výpočetní analýzu, která umožňuje modelovat proudění kapalin a plynů. Numerická simulace v CFD vychází z fyzikálního popisu tekutiny. Fyzikální zákony, které se uplatňují při výpočtu, jsou zákon zachování energie, zákon zachování hybnosti a zákon zachování hmoty. Matematicky pak lze tyto zákony vyjádřit rovnicí kontinuity, rovnicí přenosu hybnosti a rovnicí přenosu energie (Navier – Stokesovy rovnice). Ve výpočetní analýze CFD je pak tedy řešena soustava nelineárních parciálních diferenciálních rovnic.

Před simulací je nutné si stanovit, jak bude vypadat model, co vše bude zahrnuto do průtočné plochy, určit nastavení výpočtového modelu a stanovit a definovat si okrajové podmínky výpočtu.

Program k výpočtu potřebuje model (geometrii inverzního objemu průtočné plochy), na kterém se vytvoří síť buněk. Pomocí sítě se model rozdělí na malé úseky, kde program metodou konečných objemů zkoumá objemy v jednotlivých elementech sítě a vypočítává fyzikální změny, které v jednotlivých objemech nastávají.

Postup tvorby sítě a výpočtu je dále popsán v kapitole 4.2.2 Postup při vytváření sítě pro výpočet v CFD.

4.2.1 postup analytického výpočtu

Jako medium pro analytický výpočet byl zvolen ideální plyn s vlastnostmi vodní páry. Aby byl výpočet porovnatelný s výsledky z programu CFX, musely být zvoleny stejné látkové vlastnosti pro medium z CFX i pro medium do analytického výpočtu. Ideální plyn je v CFX identifikován pomocí měrné tepelné kapacity c_p [J/kg·K] a molární hmotnosti M [kg/kmol].

Výchozí hodnoty pro vstupní stav do clony jsem uvažoval z již reálně naměřeného pokusu se skutečným mařičem (viz kapitola 7.1 Provedení zkoušky mařiče).

Počáteční stav syté páry při zkoušce byl:

p_1 = 14 MPa t_1 = 336,67 °C

a tyto hodnoty jsou tedy brány jako počáteční stav pro analytický výpočet.

Dle programu XSteam odpovídají tomuto stavu hodnoty molární hmotnosti M = 18,01528 [kg/kmol] a c_p = 11259,769 [J/kg·K].

Tyto hodnoty M a c_p jsou použity pro analytický výpočet. V CFX je pomocí nich nadefinován ideální plyn tak, aby se chování co nejvíce přibližovalo reálné páře. Proto pak dále je takto nadefinované medium nazýváno jako „ideální plyn s vlastnostmi páry“ v analytickém i v CFX výpočtu.

1) Stanovení hustoty media v počátečním stavu ze stavové rovnice

$$r = \frac{R}{M} = \frac{8314{,}41}{18{,}01528} = 461{,}52 \text{ J/kg·K}$$

$$pv = \frac{p}{\rho} = r \cdot T$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{r \cdot T_1}$$

$$\rho_1 = \frac{14\ 000\ 000}{461{,}52 \cdot 609{,}82} = 49{,}743\ \text{kg/m}^3$$

2) <u>Volba geometrie elementu a určení veličin, které jsou známé na počátku výpočtu</u>

<u>Dáno:</u> p_1 = 14 MPa t_1= 336,67 °C p_2 = 13 MPa

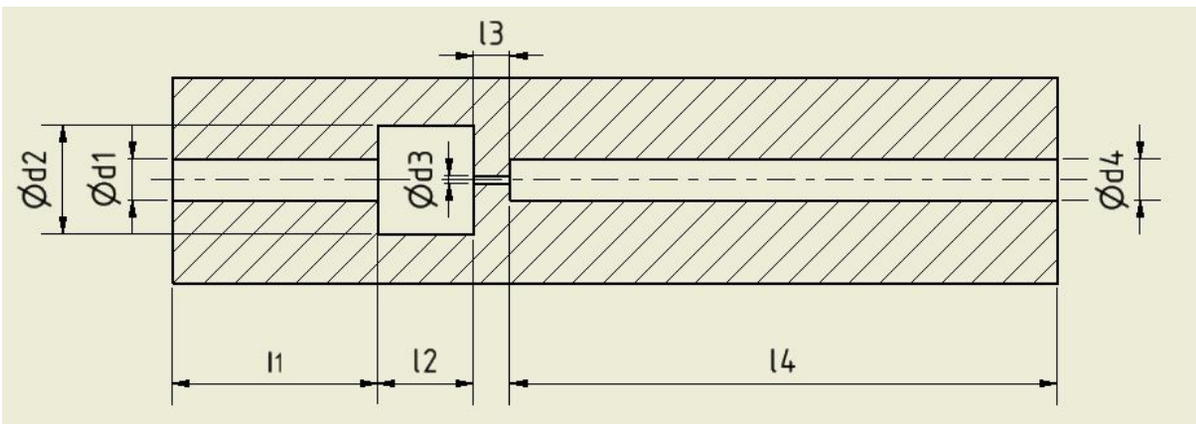
Geometrie clony pro výpočet totožná s obrázkem 8

l_1 = 0,0300 m l_2 = 0,0140 m l_3 = 0,0053 m l_4 = 0,0800 m

d_1 = 0,0060 m d_2 = 0,0160 m d_3 = 0,0010 m d_4 = 0,0060 m

$\dot{m}$ = hodnoty hmotnostního průtoku elementem je dosaženo iterací mnou níže popsaného výpočtu pomocí nástrojů v Microsoft Excel tak, aby tlaková ztráta při daném průtoku byla právě 1 MPa. Stejným způsobem je to nastaveno v CFX pro stejný srovnávací výpočet, neboť v CFX nelze zadat průtok, ale jen protitlak. Průtok vychází v CFX jako proměnná.

$\dot{m}$ = 0,006935 kg/s iterovaný průtok, který je dosazen do výpočtu, aby vyšla celková ztráta 1 MPa.



Obrázek 8: kótovaný nákres 1 clony použité v analytickém výpočtu

Objemový průtok na začátku elementu:

$Q_1 = \dot{m} / \rho_1$

$Q_1 = 0{,}006846 / 49{,}743$

$Q_1 = 0{,}000138\ m^3/s$

Rychlost v jednotlivých průměrech lze přesně určit jen na vstupu do clony c_1. V dalších úsecích se díky tlakovým ztrátám bude měnit hustota a s ní i objemový průtok, ze kterého jsou rychlosti počítány. Proto je nutné poté v každém úseku spočítat pro aktuální hustotu novou rychlost. Přibližně určené rychlosti c_2, c_3 a c_4 jsou ale pro další výpočet nezbytné, jinak by nebylo možno iterovat nové hodnoty rychlostí.

$c_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{0{,}000138}{0.003^2 \cdot \pi} = 4{,}933$ m/s

$c_2 = \frac{Q_1}{A_2} = \frac{0{,}000138}{0.008^2 \cdot \pi} = 0{,}693$ m/s

$c_3 = 177{,}599$ m/s

$c_4 = 4{,}933$ m/s

Bernouliho rovnice, podle které jsem počítal změny jednotlivých veličin. [16]

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} + e_z$$

e_z = měrná ztrátová energie

$$e_z = \zeta \cdot \frac{c^2}{2} \quad \text{[J/kg]} \quad [16]$$

tlaková ztráta

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \quad \text{[Pa]} \quad [16]$$

3) <u>Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_1</u>

Počítáno podle Darcy – Weisbachova vztahu:

$$e_{ztř1} = \lambda \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{c_1^2}{2}$$

Jediná neznámá je součinitel tření λ

Pro určení λ nutno určit Reynoldsovo číslo. $Re = \frac{c_1 \cdot d_1}{\nu_1}$

Určení kinematické viskozity ν_1: kinematickou viskozitu určím pomocí dynamické viskozity a vypočítané hustoty ρ_1

Dynamická viskozita $\mu = 0{,}00002221\ Pa \cdot s$ - odečteno z XSteam f = (14 MPa, 336,67 °C)

$\nu_1 = \frac{\mu}{\rho_1} = 0{,}000000446491\ m^2/s$

$Re = \frac{c_1 \cdot d_1}{\nu_1} = 65441$ Součinitel λ se stanovuje dle empirických vztahů podle rozsahu Reynoldsova čísla. Pro Reynoldsovo číslo větší než 40000 lze součinitel λ určit jen dle Colebrookovy rovnice. [17]

Colebrookova rovnice:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot log\left[\frac{2{,}51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71 \cdot d}\right]$$

výpočet Colebrookovy rovnice dle [18] a pro ověření správnosti i podle [19]

nutno zadat do [18] i do [19] hodnoty Re, d_1 a k

drsnost potrubí k = 0,01, hodnota volena pro nové bezešvé ocelové trubky [20]

$\lambda = 0{,}0251$

$e_{ztř1} = \lambda \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{c_1^2}{2}$

$e_{ztř1}$ = 1,52 J/kg

$\Delta p_{tř1}$ = 75,77 Pa

4) <u>náhlé rozšíření průřezu potrubí z d_1 na d_2</u>

Počítáno podle rovnice pro určení místní ztráty při náhlém rozšíření potrubí:

$e_z = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \cdot \frac{{c_1}^2}{2}$ [20]

$e_{zcelk1} = 0{,}738525 \cdot \frac{4{,}933^2}{2} + ez_{tř1} = 10{,}51$ J/kg

e_{zcelk1} = celková ztráta měrné energie včetně třecí ztráty z potrubí l_1 ($ez_{tř1}$ = 1,5233 J/kg). Tuto ztrátu nutno započítat, neboť při průtoku media přes rozšiřující se úsek potrubí již je počáteční stav media změněn právě díky $ez_{tř1}$.

Δp_1 = 522,82 Pa

e_{zcelk1} dosazeno do Bernouliho rovnice a odtud dopočítáno ρ_2, které neznám a potřebuji ho do dalšího výpočtu

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} + e_z$$

$$\rho_2 = \frac{c_2^2 \cdot \frac{1}{2} + \mathrm{ez} + p_2}{\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{{c_1}^2}{2}} = 49{,}741 \ \ kg/m^3$$

Rychlost c_2 dosazuji spočítanou z původní hustoty ρ_1, reálná rychlost se počítá z hustoty ρ_2, proto je nutné přepočítat Q_2 s novou hustotou a určit správnou c_2.

Q_2= 0,006935 / 49,741 = 0,000139 m^3/s

$c_2 = \frac{Q_2}{A_2} = 0{,}693$ m/s

V tomto případě je změna hustoty malá a na změně objemového průtoku ani rychlosti se ve sledovaném rozsahu nic nemění.

Celkový tlak je tedy před vstupem do clony:

$p_2 = p_1 - \Delta p_1 = 13\ 999\ 477$ Pa

5) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_2

Vzhledem k malé rychlosti c_2 a velmi malé tlakové ztrátě je tento výpočet možno zanedbat.

6) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_3

Výpočet totožný s postupem v 1) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_1.

Re = 392646

výpočet Colebrookovy rovnice dle [18] a pro ověření správnosti i podle [19]

$\lambda = 0{,}0381$

$ez_{tř3} = 3199{,}62$ J/kg

$\Delta p_{tř3} = 159\ 153{,}51$ Pa

7) Náhlé zúžení potrubí z d_2 na d_3

výpočet koeficientu pro náhlé zúžení [20]

$$\varepsilon = 0{,}57 + \frac{0{,}043}{1{,}1 - \frac{A_2}{A_1}} = 0{,}57 + \frac{0{,}043}{1{,}1 - \frac{d_2^{\,2}}{d_1^{\,2}}}$$

$$\varepsilon = 0{,}641415$$

$$\xi = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 = \left(\frac{1}{0{,}641415} - 1\right)^2 = 0{,}4114$$

$$e_{zcelk3} = \xi \cdot \frac{{c_3}^2}{2} + e_{ztř3} = \xi \cdot \frac{177{,}599^2}{2} + e_{ztř3} = 9688{,}47\ J/\ kg$$

e_{zcelk3} dosazeno do Bernouliho rovnice a odtud dopočítáno ρ_3. Tuto hodnotu neznám, a proto je nutné ji doiterovat, jedná se o hustotu ve cloně.

$$\rho_3 = \frac{p_3}{\left(\frac{p_2}{\rho_2} + \frac{{c_2}^2}{2} - \frac{{c_3}^2}{2} - e_z\right)}$$

iterace:

ρ_3= 53,427 kg/m^3

z nové hustoty přepočten průtok Q_3 a rychlost c_3 podle změněné hustoty ρ_3

Q_3= 0,006935 / 53,427 = 0,000129 m^3/s

$c_3 = \frac{Q_3}{A_3} = \frac{0{,}000129}{0.0005^2 \cdot \pi} = 165{,}352$ m^3/s

přepočtena celková měrná ztrátová energie a z ní opět získána nová hustota. Iterace pokračuje až do chvíle, dokud nejsou hustoty stejné na tři desetinná místa.

$$e_{zcelk3} = \xi \cdot \frac{(c_3)^2}{2} + e_{ztř3} = 8823{,}92\ J/\ kg$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{\left(\frac{p_2}{\rho_2} + \frac{{c_2}^2}{2} - \frac{{c_3}^2}{2} - e_z\right)}$$

ρ_3= 52,901 kg/m^3

Takto 4x iterováno, než se hustota ρ_3 nemění.

Konečné hodnoty po iteraci:

ρ_3= 52,962 kg/m^3

Q_3= 0,006935 / 52,962 = 0,000131 m^3/s

$c_3 = \frac{Q_3}{A_3} = \frac{0{,}000131}{0.0005^2 \cdot \pi} = 166{,}81$ m/s

e_{zcelk3} = 8923,6299 J/kg

Δp_3 = 303145,75 Pa

$p_3 = p_2 - \Delta p_3$ = 13 696 331 Pa

Pokud by se nová hodnota rychlosti c_3 dosadila zpětně do 6) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l3 (*c_3 = 166,81 m/s*), vyjde *Δp = 144 141 Pa* oproti původní *Δp = 159 153 Pa*. Rozdíl e_{zcelk3} činí 3,8 %, což je zanedbatelné, a proto nejsou původní třecí ztráty iterovány na novou rychlost c_3.

8) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_4

Výpočet totožný s postupem v 1) Výpočet třecí ztráty v potrubí na délce l_1

Re = 70510

výpočet Colebrookovy rovnice dle [18] a pro ověření správnosti i podle [19]

λ = 0,0388081

$e_{ztř4}$ = 6,29 J/kg

$\Delta p_{tř4}$ = 333,13 Pa

9) Náhlé rozšíření průřezu potrubí z d_3 na d_4

$e_z = \left(1 - \frac{A_3}{A_4}\right)^2 \cdot \frac{{c_3}^2}{2}$ [20]

$e_{zcelk4} = 0{,}945216 \cdot \frac{169{,}01^2}{2} + ez_{tř4} = 13152{,}75$ *J/kg*

Δp_4 = 696241,68 Pa

e_{zcelk4} = dosazeno do Bernouliho rovnice a odtud dopočítáno ρ_4, které neznám a potřebuji ho do dalšího výpočtu

$$\frac{c_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_3} = \frac{c_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho_4} + e_z$$

$$\rho_4 = \frac{c_4^2 \frac{1}{2} + e_z + p_4}{\frac{p_3}{\rho_3} + \frac{c_3{}^2}{2}} = 50{,}143\ kg/m3$$

Rychlost c_4 dosazuji spočítanou z původní hustoty ρ_1, ve skutečnosti rychlost vychází z hustoty ρ_4, proto je nutné přepočítat Q_4 s novou hustotou a určit správnou c_4.

Q_4= 0,006935 / 50,123 = 0,000138 m^3/s

$c_4 = \frac{Q_4}{A_4} = 4{,}89$ m/s

ρ_4 = 50,124 kg/m^3

$p_4 = p_3 - \Delta p_4$ = 13 000 140 Pa

Z p_4 je vidět, že omezovací clona se zvolenou geometrií má po sečtení dílčích tlakových ztrát požadovanou celkovou ztrátu 1 MPa, jak bylo vysvětleno v úvodu výpočtu. Pro danou geometrii jsem schopen stanovit průtok při zvoleném tlakovém rozdílů, nebo lze při zadaném průtoku stanovit celkovou ztrátu.

Dvojclona nebo více clon se počítá stejnou metodikou a výstupní stav z dané clony je vždy zároveň vstupním stavem do clony následující.

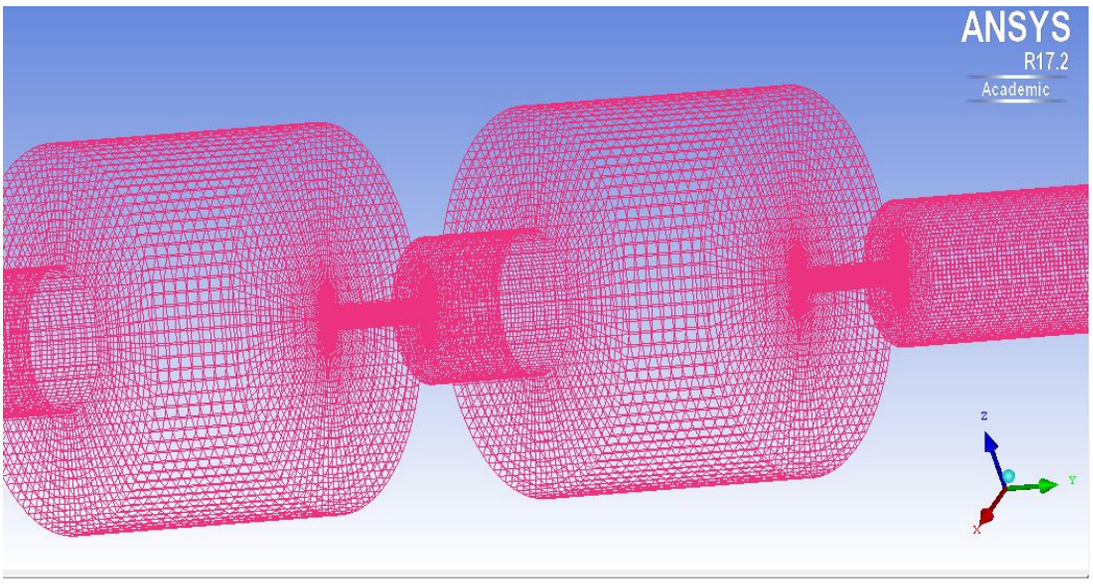
Dále je popsán základní postup k výpočtu s CFD. Výsledky obou výpočtů jsou porovnávány v různých konfiguracích v kapitole 5. Srovnání analytického výpočtu s hodnotami z CFX.

4.2.2 postup při vytváření sítě pro výpočet v CFD

Jednotlivé geometrie a konfigurace clon jsem vytvořil ve 3D softwaru Autodesk Inventor Professional. Výpočetní síť byla vytvořena v programu ANSYS ICEM CFD 17.2. Pro každou variantu geometrie clony se musí provést nové

zasíťování modelu. Zasíťování jedné clony trvá přibližně 4 hodiny. Výpočet zasíťovaného modelu probíhá v programu ANSYS CFX 17.2. Vypočtené hodnoty a grafické výstupy jsem odečítal z programu ANSYS CFD-Post 17.2. Verze 17.2 u všech programů ANSYS byla použita proto, že v době začátku práce nebyla dostupná novější studentská verze programů ANSYS.

Při tvoření sítě je velmi důležité zvolit vhodný kompromis kvality sítě. Pokud je sít málo hustá - nekvalitní, nemusí výpočet zachytit všechny děje, které reálně probíhají při proudění. Nebo je výpočet zachytí nepřesně. V případě příliš husté sítě se dostáváme do problému, kdy neúměrně narůstá počet buněk v síti, a s tím i hardwarová náročnost a doba výpočtu. V místech se skokovou změnou průřezu dochází k urychlení proudu a zde jsou kritická místa v síti. Největší změna rychlosti proudění a dalších s tím souvisejících veličin se očekává ve cloně, tj. v nejužším místě naší zkoumané součásti a v jejím okolí. Proto je zde síť nejhustší, jak je vidět na obrázku 9, tak aby byly zachyceny všechny děje, které nastávají při proudění.

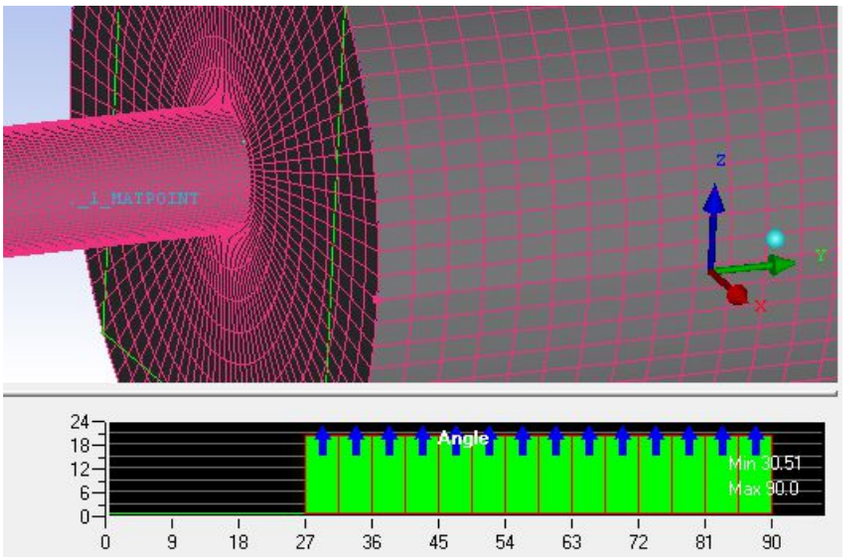


Obrázek 9: ukázka zasíťované dvojclony

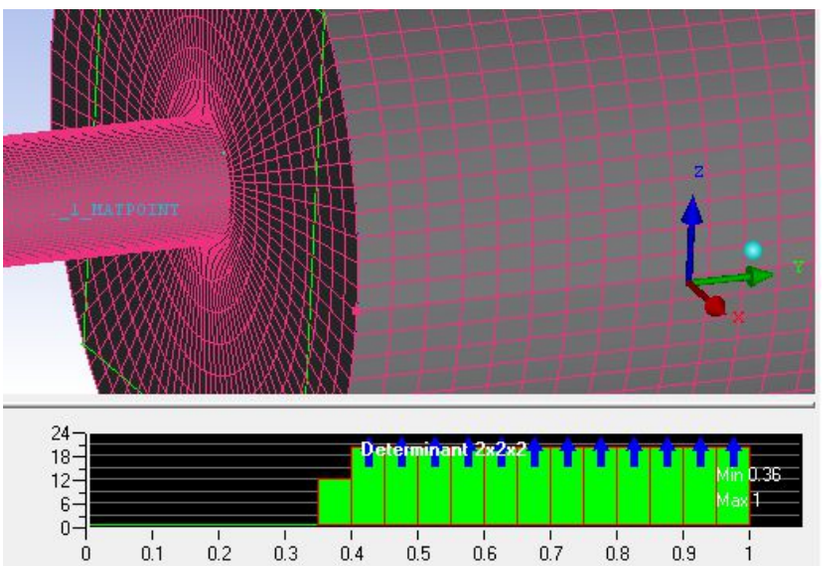
Kvalita sítě se řídí i dalšími parametry než jen hustotou zasíťování. V materiálech k programu ANSYS ICEM CFD 17.2 od společnosti ANSYS se uvádí jako další kritéria kvality sítě, parametr determinant 2x2x2 a parametr angle. V materiálech ANSYS se jako podmínka dobré sítě doporučuje nulový počet buněk

s hodnotou angle pod 18 °. Jako dobrá síť se uvažuje síť s hodnotami determinantů 2x2x2 minimálně v rozmezí hodnot 0,2 – 0,3. Jako vynikající síť je pak popsána síť s determinanty 2x2x2 okolo hodnoty 0,6.

Hodnoty těchto dvou kriterií (angle a determinant 2x2x2) jsem různými úpravami sítě měnil, než jsem dospěl k mojí minimální požadované kvalitě sítě. Sítě použité v této práci měly hodnoty angle vždy větší než 30°. U determinantu 2x2x2 jsem se pohyboval s minimální hodnotou v rozmezí 0,35 – 0,4.



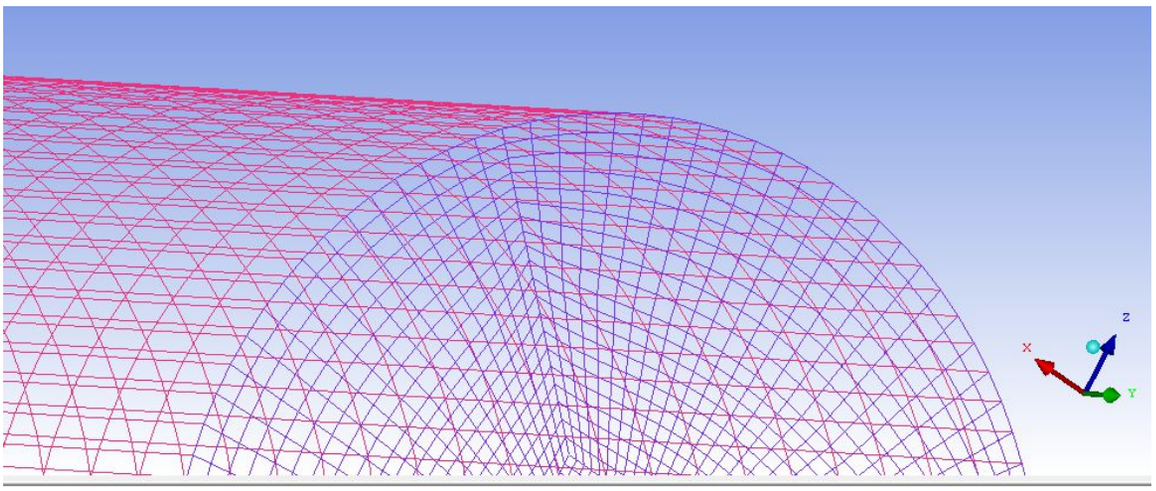
Obrázek 10: ukazatel parametru angle



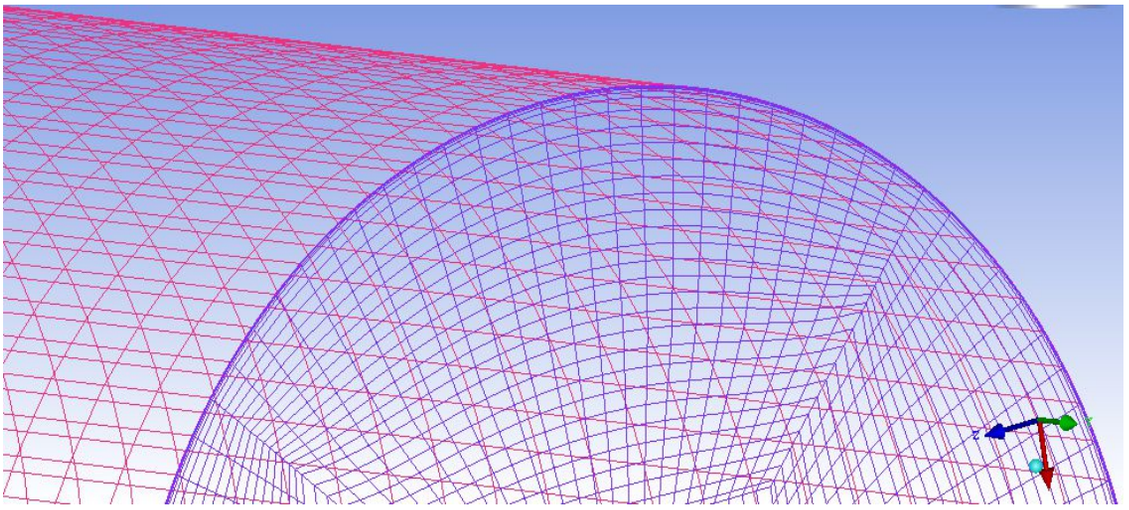
Obrázek 11: ukazatel parametru determinant 2x2x2

Dalším identifikačním znakem kvality sítě je celkové množství buněk, ze kterých je síť složena. Pohybuji se v rozmezí 1 500 000 – 2 200 000 buněk, v závislosti na konfiguraci clon-y.

Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje počet buněk, a tím i délku výpočtu, je mezní vrstva. Mezní vrstva zohledňuje rozdílné chování proudícího media u stěny a rozdílné chování media v určité vzdálenosti od stěny. Mezní vrstva respektuje nerozvinuté turbulentní proudění u stěny potrubí. Konkrétně v naší aplikaci s mařičem je zohlednění mezní vrstvy velmi důležitým faktorem. Pokud bychom ji zanedbali ve výpočtech, dostávali bychom velmi odlišné a nepřesné výsledky. Síť jsem navhrl tak, abych dostal hodnotu parametru y^+ větší než 30, a proto jsem pak použil pro řešení turbulentního proudění dvourovnicové nastavení k-epsilon. Stěnová funkce byla nastavena jako scalable wall function, neboli škálování stěn. Funkce škálovatelných stěn překonávají jeden z hlavních nedostatků standardního přístupu ke stěně, protože mohou být použity na libovolně jemných sítích.



Obrázek 12: síť bez mezní vrstvy



Obrázek 13: síť s mezní vrstvou

Po vytvoření sítě a ověření kvality sítě se již do řešiče Ansys CFX zadávají okrajové podmínky našeho výpočtu. Pro řešení výpočtu byl zvolen program ANSYS CFX 17.2 z důvodu možnosti modelovat proudící medium jako reálnou páru podle specifikace IAPWS97. Pro některé konfigurace bude nutné vyzkoušet chování clony na reálné páře a například další program na řešení této problematiky ANSYS Fluent neumožňuje výpočet na páře. V programu ANSYS CFX 17.2 zadávám podmínky pro vstup a výstup na modelu clony. Vstupní podmínky jsou počáteční absolutní tlak, vstupní teplota media, referenční tlak (0kPa) a nastavení podzvukového proudění. Výstupní podmínky definuji pomocí výstupního statického tlaku, který očekávám za clonou. Proudění je opět nastaveno jako podzvukové. Stěny jsou brány jako adiabatické, čili nesdílí se s okolím žádné teplo. Výslednou hodnotou je vypočtená hodnota průtoku na mnou zadané tlakové diferenci. Pro úspěšný výpočet je nutné sledovat konvergenci imbalancí, než zkonvergují na nule. S vyšším počtem iterací výpočtu imbalance obvykle klesají blíže k nule. Pak sleduji průtok, který vždy osciluje s nějakou odchylkou. Výpočet ukončím ve chvíli, kdy průtok osciluje ve zvoleném malém rozmezí a již je provedeno dostatečné množství iterací. Úloha byla řešena jako 3D, neboť zpočátku bylo zamýšleno, že bude řešeno i výstupní potrubí z mařiče, které je kolmé na ose mařiče viz výkres mařiče obrázek 28.

5. Srovnání výsledků analytického výpočtu s hodnotami z CFX

Tato kapitola se věnuje porovnání vypočtených analytických výsledků s výsledky z programu CFX. Každá podkapitola je doplněna grafem a tabulkou, ze kterých je patrný vliv jednotlivých konfigurací na výsledné parametry clony.

5.1. Srovnání analytického výpočtu s výpočtem z CFX pro 2 různá media

Smyslem tohoto srovnání je vyjádřit rozdíly v průtocích na jedné cloně v závislosti na zvolených termodynamických vlastnostech media (2 druhy media v CFX) a porovnat výsledky s analytickým výpočtem. Geometrie clony je totožná s geometrií v 4.2.1 postup analytického výpočtu a s obrázkem 8. Jako proměnná je zde průměr clony d_3, který je v rozmezí 0,7 – 1,1 mm. Tlaková diference byla zvolena mezi vstupem a výstupem (13-14 MPa) a (10-14 MPa).

Z výsledků uvedených v Tabulce 2 a 3 a v Grafu 1 a 2, je viditelný stejný trend nárůstu průtoku u hodnot z CFX i analytického výpočtu v závislosti na zvětšujícím se průměru clony. Čím větší je průměr clony, tím větší je průtok media skrze ni. Dochází tedy k větší tlakové ztrátě se zmenšujícím se průměrem. Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 2 a 3 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (CFX·100 / analytický výpočet).

Ze třech závislostí, které jsou uvedeny v Tabulce 2 a Grafu 1, je vidět, že poměrný odstup analytického výpočtu a ideálního plynu s vlastnostmi páry v CFX je konstantní. Červeně je v grafu 1 vyznačena reálná pára, jejíž průběh se v oblasti nižších průměrů přibližuje hodnotám ideálního plynu s vlastnostmi páry v CFX. V oblastech vyšších průměrů se naopak přibližuje analytickému výpočtu ideálního plynu s vlastnostmi páry. Toto srovnání ukázalo, že nahradit reálnou páru ve výpočtech lze ideálním plynem s látkovými vlastnostmi páry. Proto je v dalších konfiguracích již počítáno s ideálním plynem s vlastnostmi páry, který nahrazuje reálnou páru ve výpočtech. Páru lze tudíž odpovídajícím způsobem nahradit a pro úvahy o chování media v jednotlivých konfiguracích je výpočet s ideálním plynem

s vlastnostmi páry dostačující. Pro větší tlakovou diferenci 8-14 MPa je již vidět velký rozdíl průtoků mezi analytickým výpočtem a výpočty z CFX. Tato velká tlaková diference byla zvolena na základě výsledků z počítání celého mařiče z kapitoly 7.3 Porovnání vypočtené tlakové ztráty s výsledky reálné zkoušky zvoleného mařiče. Zde jsem analyticky zjistil, že při výpočtu celého mařiče je tlak za první clonou 10,03 MPa a dle CFX je tlak za první clonou 11,70 MPa. Proto byly zpětně doplněny výpočty o větší tlakovou diferenci. Tlaková diference byla brána maximální možná (10-14 MPa), která z několika výpočtů vycházela tak, aby byl pokryt celý interval změny tlaku, který je teoreticky možné u počítané clony dosáhnout.

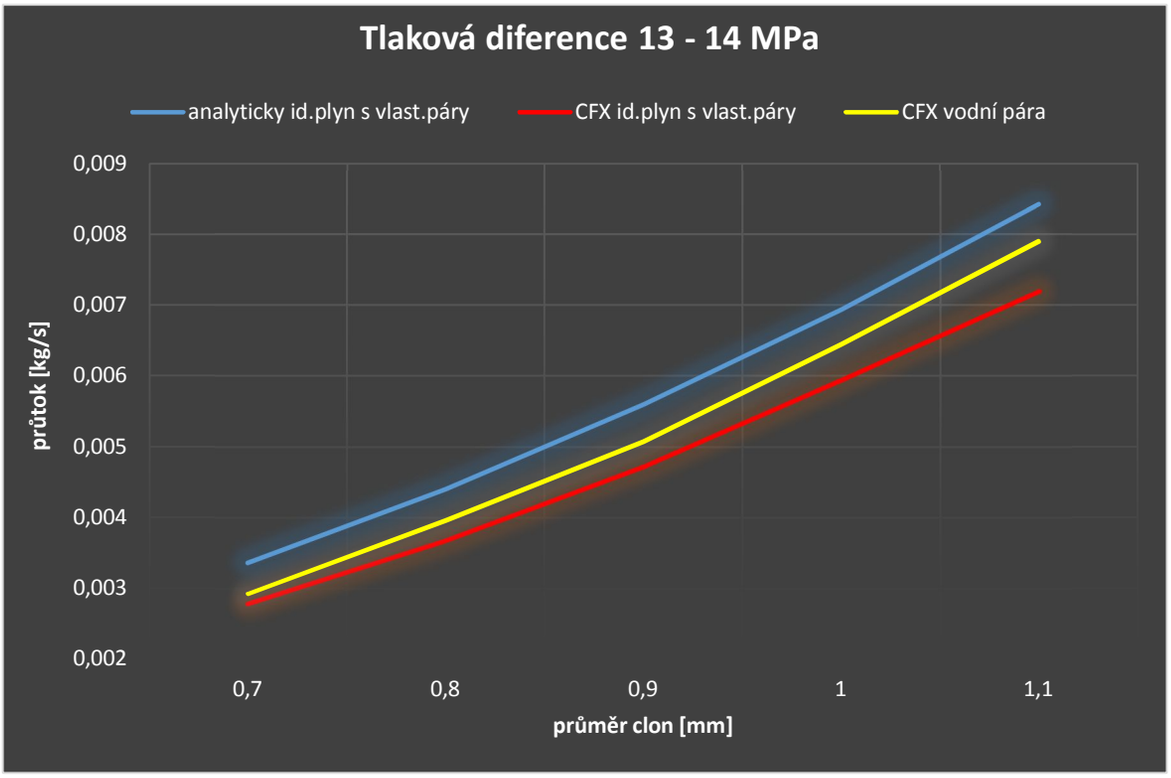
Rozbor media: Pro páru nahrazenou ideálním plynem byly brány v úvahu vždy látkové vlastnosti M = 18,01528 kg/kmol a c_p = 11 259,769 J/kg·K odpovídající vstupním parametrům, viz 4.2.1 postup analytického výpočtu. Při výstupním tlaku 13 MPa je hodnota c_p = 9907,153 J/kg·K. Pokud tuto hodnotu uvedu jako vstupní údaj do výpočtu v CFX namísto c_p = 11 259,769 J/kg·K rozdíl v získaných průtocích ve výsledku je 0,1 %. Proto ani neuvažuji při výpočtu o střední hodnotě c_p, ale počítám pro všechny výpočty s počáteční hodnotou c_p = 11 259,769 J/kg·K při tlakové diferenci 13 – 14 MPa. Při tlakové diferenci 10 – 14 MPa je c_p = 7147,226 J/kg·K pro 10 MPa, proto v případě větší tlakové diference již používám střední hodnoty c_p = (11259,769 + 7147,226) / 2 = 9203,497 J/kg·K. Tuto skutečnost je třeba brát v úvahu hlavně při větších tlakových diferencích.

Tabulka 2:porovnání rozdílů průtoku při použití 2 druhů media v CFX s analytickým výpočtem při tlakové diferenci 13-14 MPa

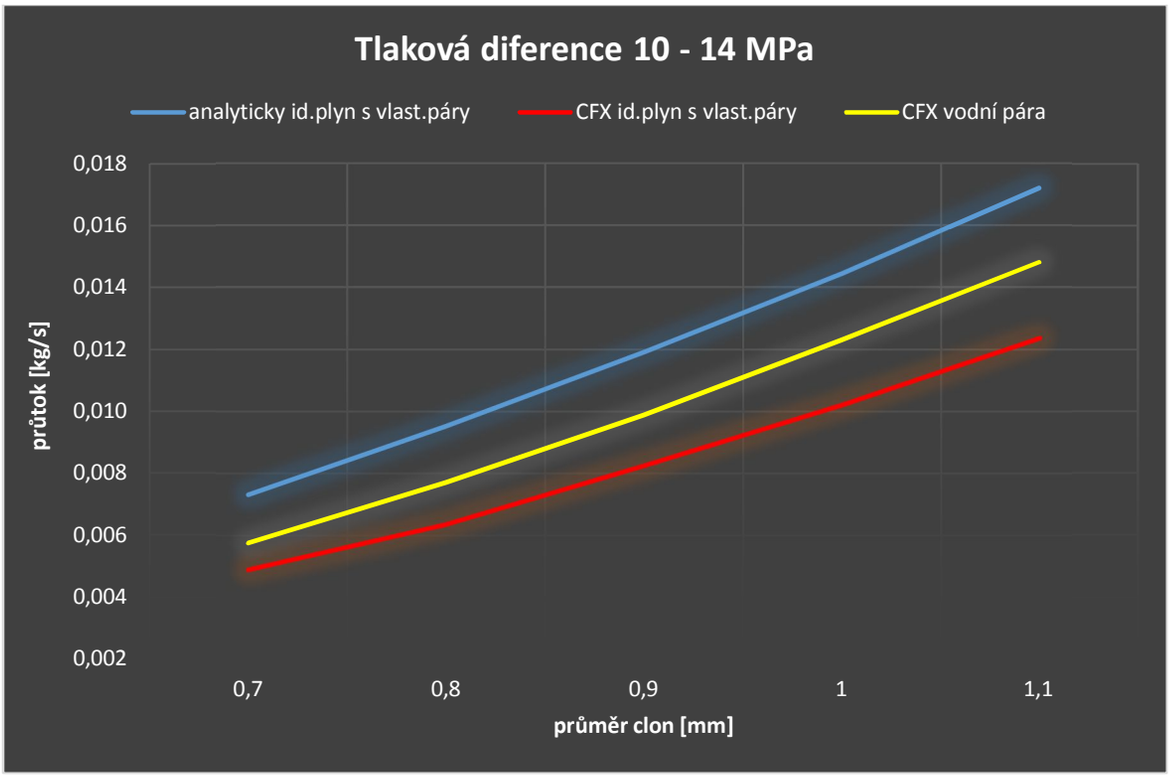
průměr clon [mm]	CFX id.plyn s vlastnostmi páry [kg/s]	CFX vodní pára [kg/s]	analytický výpočet s vlastnostmi páry [kg/s]	rozdíl id.plynu s vlast. páry a analyt.výpočtu [%]	rozdíl páry a analyt.výpočtu [%]
0,7	0,002782	0,002914	0,003362	17,26	13,34
0,8	0,003676	0,003951	0,004406	16,56	10,32
0,9	0,004716	0,005067	0,005596	15,72	9,45
1	0,005941	0,006445	0,006935	14,33	7,07
1,1	0,007194	0,007901	0,008429	14,65	6,26

Tabulka 3: porovnání rozdílů průtoku při použití 2 druhů media v CFX s analytickým výpočtem při tlakové diferenci 10-14 MPa

průměr clon [mm]	CFX id.plyn s vlastnostmi páry [kg/s]	CFX vodní pára [kg/s]	analytický výpočet s vlastnostmi páry [kg/s]	rozdíl id.plynu s vlast. páry a analyt.výpočtu [%]	rozdíl páry a analyt.výpočtu [%]
0,7	0,004900	0,005732	0,007318	33,04	21,67
0,8	0,006350	0,007696	0,009518	33,28	19,14
0,9	0,008247	0,009870	0,011901	30,70	17,06
1	0,010200	0,012310	0,014447	29,40	14,79
1,1	0,012360	0,014820	0,017220	28,22	13,94



Graf 1: porovnání průtoků pro tlakovou diferenci 13-14 MPa



Graf 2: porovnání průtoků pro tlakovou diferenci 10 - 14 MPa

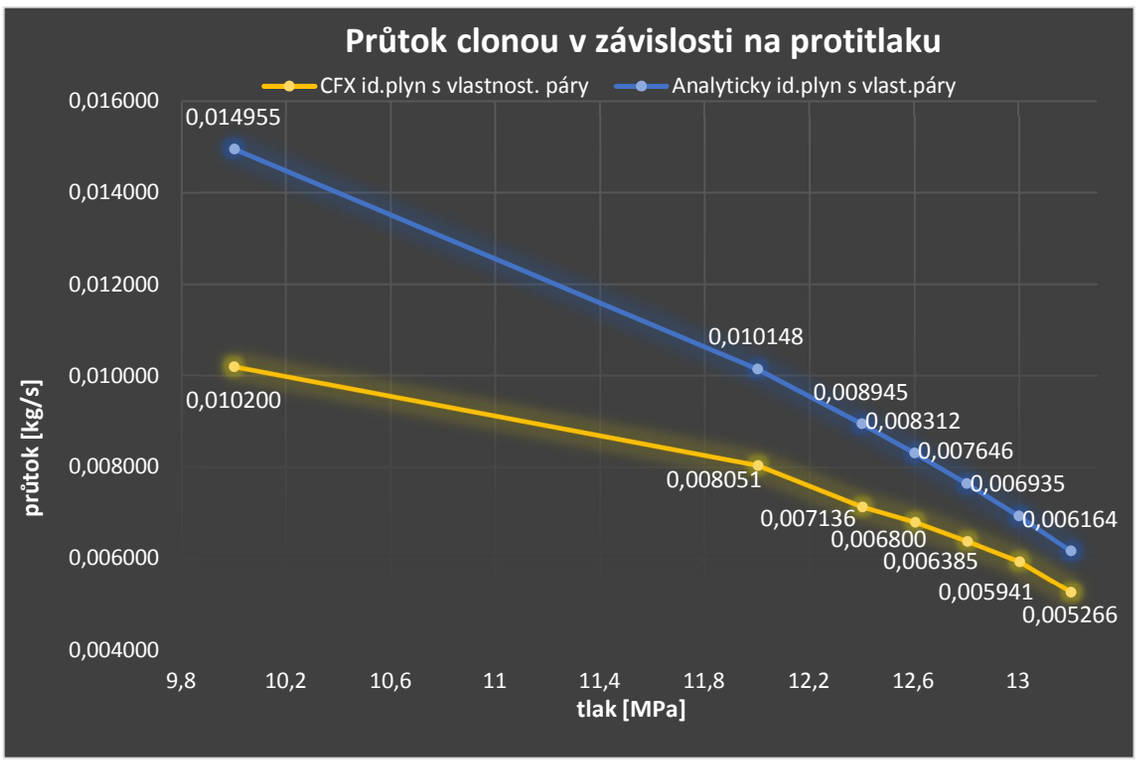
5.2. Srovnání analytického výpočtu s hodnotami z CFX při rozdílné tlakové diferenci

Cílem této kapitoly je ukázat rozdíl hodnot průtoku vypočtených z analytického výpočtu a CFX výpočtu. Pro analytický výpočet bylo uvažováno medium ideální plyn s vlastnostmi páry a pro CFX bylo použito také ideálního plynu s vlastnostmi páry. V tomto srovnání je opět totožná geometrie s 4.2.1. postup analytického výpočtu a s obrázkem 8. Průměr clony je nezměněn, tj. d_3 = 1 mm, vstupní parametry jsou konstantní. Proměnou jsou nastavené protitlaky v rozsahu 10 – 13,2 MPa.

Tabulka 4: analytický výpočet v porovnání s výpočtem z CFX pro rozdílné protitlaky

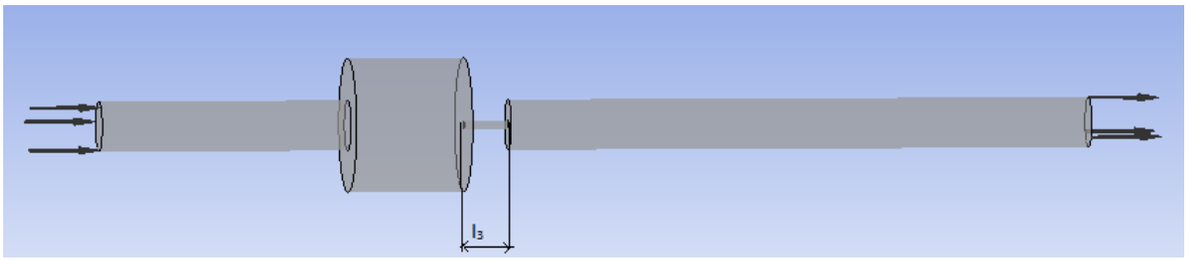
protitlak [MPa]	CFX id.plyn s vlastnostmi páry [kg/s]	analytický výpočet id.plynu s vlastnostmi páry [kg/s]	Poměrný rozdíl analyt.výpočtu oproti id.plyn s vlastnostmi páry [%]
10	0,010205	0,014345	33,04
12	0,008051	0,010148	20,67
12,4	0,007136	0,008756	18,50
12,6	0,006800	0,008160	16,67
12,8	0,006385	0,007526	15,16
13	0,005941	0,006846	13,22
13,2	0,005267	0,006102	13,69

Výsledky zpracované v Tabulce 4 a v Grafu 3 jasně ukazují, že s nastavením nižšího protitlaku se rozdíl mezi analytickým výpočtem a CFX výpočtem zvětšuje. S menším protitlakem tedy roste odchylka od analytického výpočtu a počítat takovou úlohu pouze analyticky je nepřesné. Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 4 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (CFX·100 / analytický výpočet).



Graf 3: Průtok clonou v závislosti na protitlaku

5.3. Vliv délky clony na průtok media



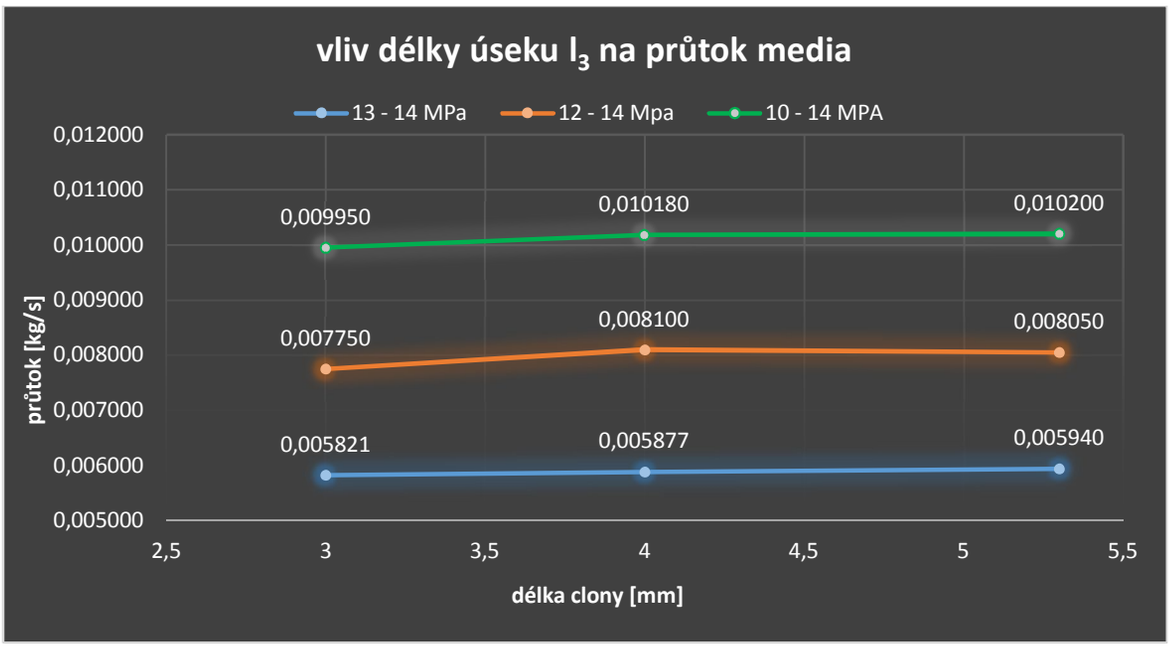
Obrázek 14: pohled na základní počítaný element

Práce vychází z řešení konkrétního mařiče 2POT14638/A, proto je zpracován i vliv délky clony, protože v reálném provedení mařiče se vyskytují tři různé délky clon l_3 = 3, 4 a 5,3 mm. Geometrie clony je totožná s geometrií v 4.2.1 postup analytického výpočtu a s obrázkem 8. Jako proměnná je zde délka clony l_3, která je počítaná ve výše uvedených hodnotách. Tlaková diference byla zvolena mezi vstupem a výstupem 13 - 14 MPa. Tato diference je zobrazena v grafu 4 a současně byl výpočet opakován pro tlakovou diferenci 10 – 14 MPa. Výsledky jsou zobrazeny taktéž v grafu 4.

Rozdíl v délce clony tak, jak je navržen u mařiče 2POT14638/A, nemá prakticky žádný vliv na průtok media ve cloně. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 5. Průtok nepatrně roste s prodlužující se délkou clony, jak je vidět v grafu 4.

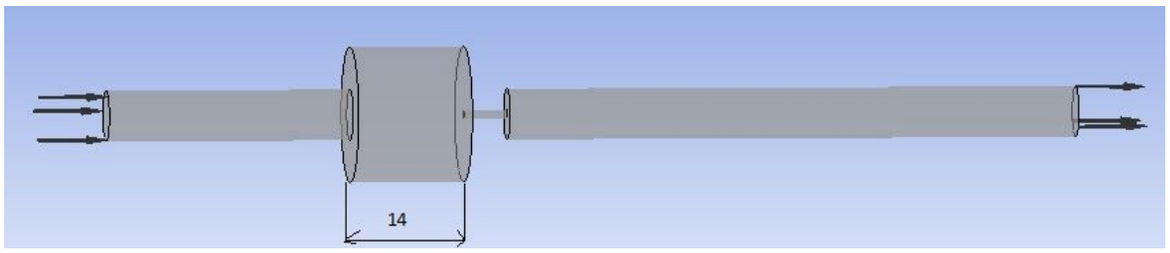
Tabulka 5: vliv délky clony na průtok media

délka clony [mm]	průtok při tlakové diferenci 13-14 MPa [kg/s]	průtok při tlakové diferenci 12-14 MPa [kg/s]	průtok při tlakové diferenci 10-14 MPa [kg/s]
3	0,005821	0,007750	0,009950
4	0,005877	0,008100	0,010180
5,3	0,005940	0,008050	0,010200



Graf 4: vliv délky úseku l_3 na průtok media

5.4. Vliv délky rozšířeného potrubí před clonou



Obrázek 15: maximální délka l_2

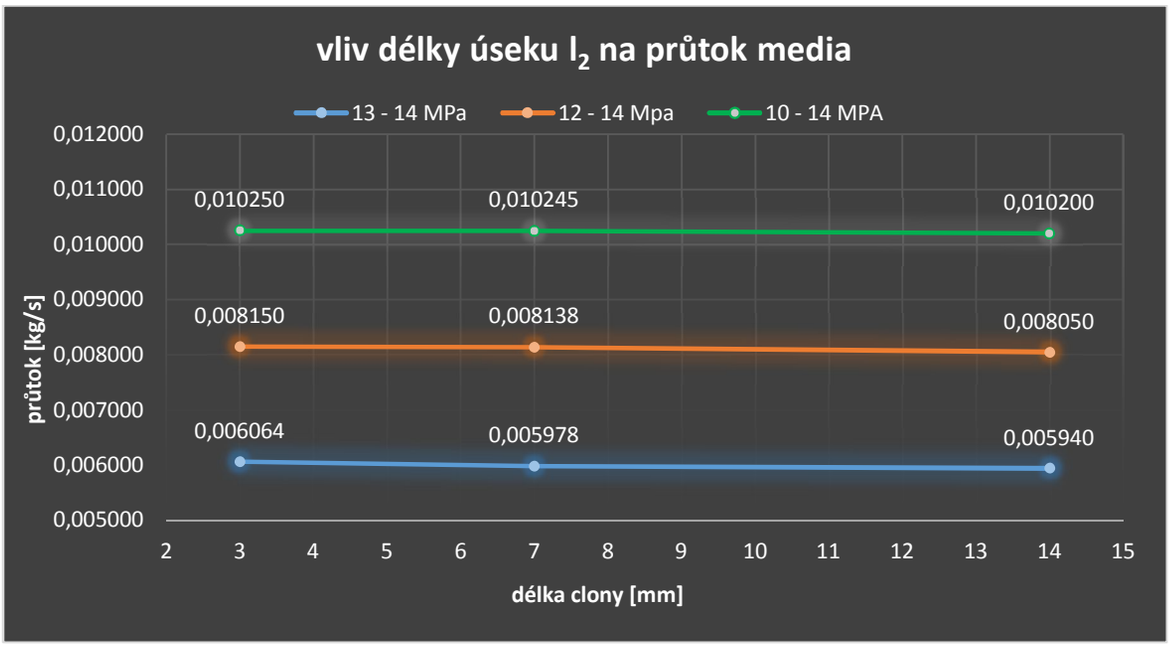
Obrázek 16: minimální délka l_2

Mařič 2POT14638/A má různé délky rozšířeného potrubí l_2 před clonou. Geometrie clony je totožná s geometrií v 4.2.1 postup analytického výpočtu a

s obrázkem 8. Jako proměnná je zde délka potrubí l_2. Tlaková diference byla zvolena mezi vstupem a výstupem 13 - 14 MPa a 10 – 14 MPa. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 5. Podobně jako v případě prodlužování clon se i zde projeví vliv prodlužování potrubí l_2. Dopad na změnu průtoku je dokumentován v tabulce 6 a na grafu 5. Trend křivky průtoku je obrácený oproti grafu 4. To znamená, že čím delší je vzdálenost l_2, tím je průtok nepatrně menší, jak je vidět v grafu 5.

Tabulka 6: vliv délky rozšířeného potrubí před clonou

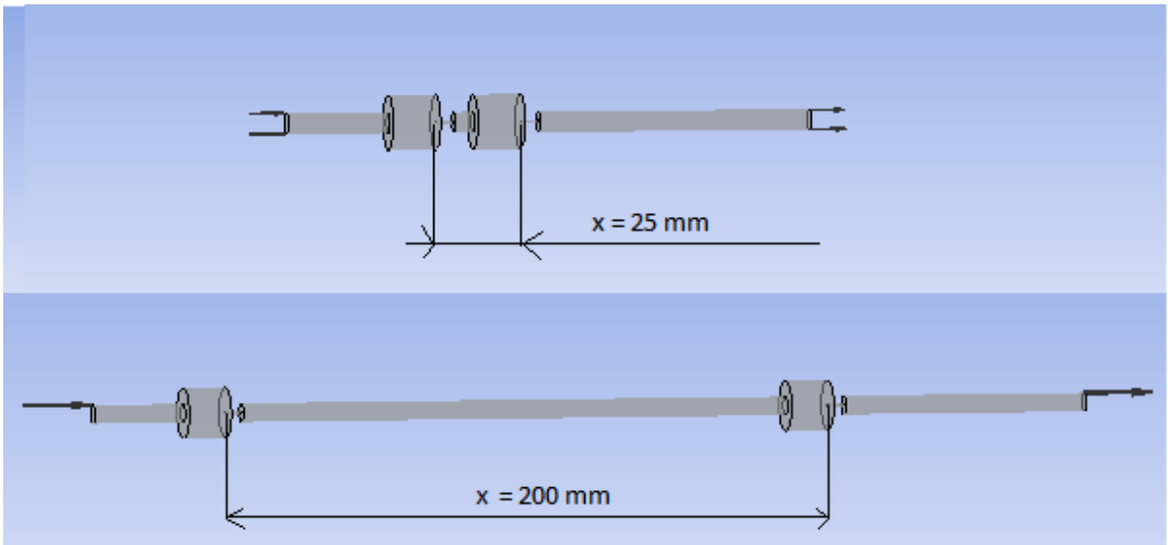
délka clony [mm]	průtok při tlakové diferenci 13-14 MPa [kg/s]	průtok při tlakové diferenci 12-14 MPa [kg/s]	průtok při tlakové diferenci 10-14 MPa [kg/s]
3	0,006064	0,008150	0,010250
7	0,005978	0,008138	0,010245
14	0,005940	0,008050	0,010200



Graf 5: vliv délky úseku l_2 na průtok media

6. Interakce dvou a více clon

6.1. Vzájemná interakce dvou clon při konstantní tlakové diferenci



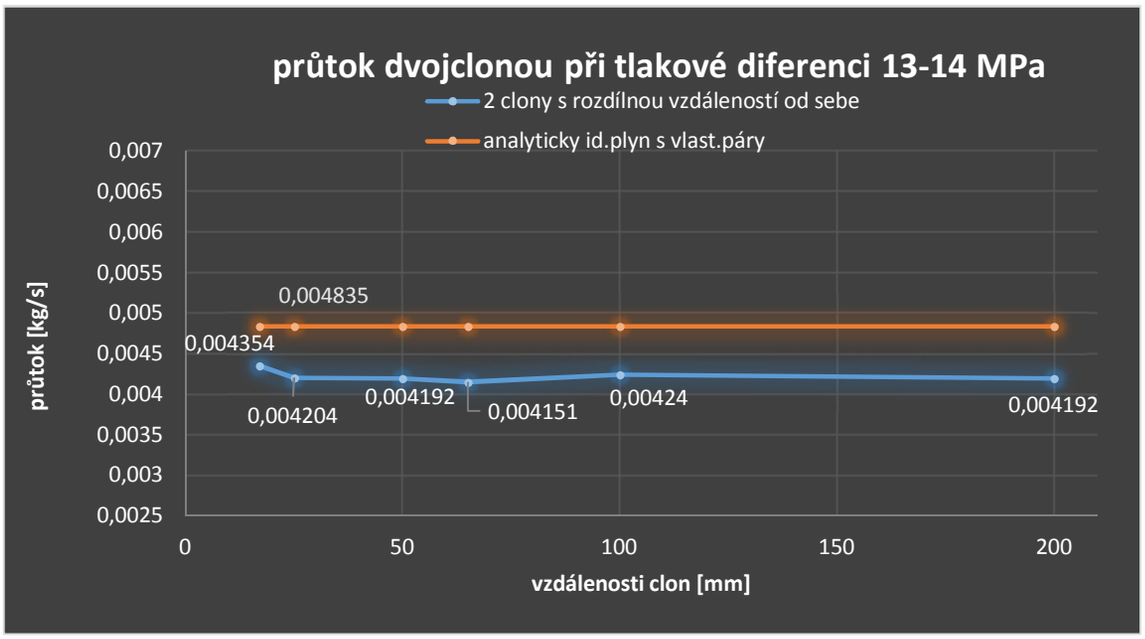
Obrázek 17: rozměr x značí rozdílné vzdálenosti mezi clonami. Na obrázku minimální délka oproti maximální počítané délce

Tlaková diference pro tento výpočet je uvažována 13 – 14 MPa a 8 - 14 MPa. 8 MPa je opět hodnota daná z kapitoly 7.3 Porovnání vypočtené tlakové ztráty s výsledky reálné zkoušky zvoleného mařiče, kde analytickým výpočtem vyjde tlak za prvními dvěma clonami 8 MPa. V CFX vychází 9,98 MPa, a proto je zde brána krajní hodnota intervalu tlaků. Geometrie pro výpočet dvojclony je totožná s 4.2.1 postup analytického výpočtu a s obrázkem 8 s výjimkou rozměru l_4. V geometrii jednotlivých dvojclon se mění délka l_4 v závislosti na nastavené vzdálenosti dvojclon. První sledovaná vzdálenost 17 mm je skutečná vzdálenost clon mezi sebou ve zkoumaném mařiči 2POT14638/A. Další vzdálenosti clon mezi sebou jsou pak voleny již libovolně s ohledem na prokázání vlivu vzdálenosti clon na průtok. Z tabulky 7 a 8 je zřejmé, že vzdálenosti clon mezi sebou nehrají významnou roli při poklesu průtoku. Největší průtok je právě v reálném mařiči, kdy jsou clony nejblíže u sebe. Snahou při konstrukci mařiče je dosáhnout samozřejmě co nejmenšího průtoku, ale vzhledem k nepatrnému poklesu průtoku při zvětšující se vzdálenosti clon by mařič musel být zbytečně dlouhý a výrazné snížení průtoku by tato úprava nepřinesla. Proto se větší vzdálenosti mezi clonami nepoužívají.

Tabulka 7: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 13-14 MPa

vzdálenost clon x [mm]	průtok při tlakové diferenci 13-14 MPa [kg/s]
17	0,004354
25	0,004204
50	0,004192
65	0,004151
100	0,004240
200	0,004192
analyticky	0,004835

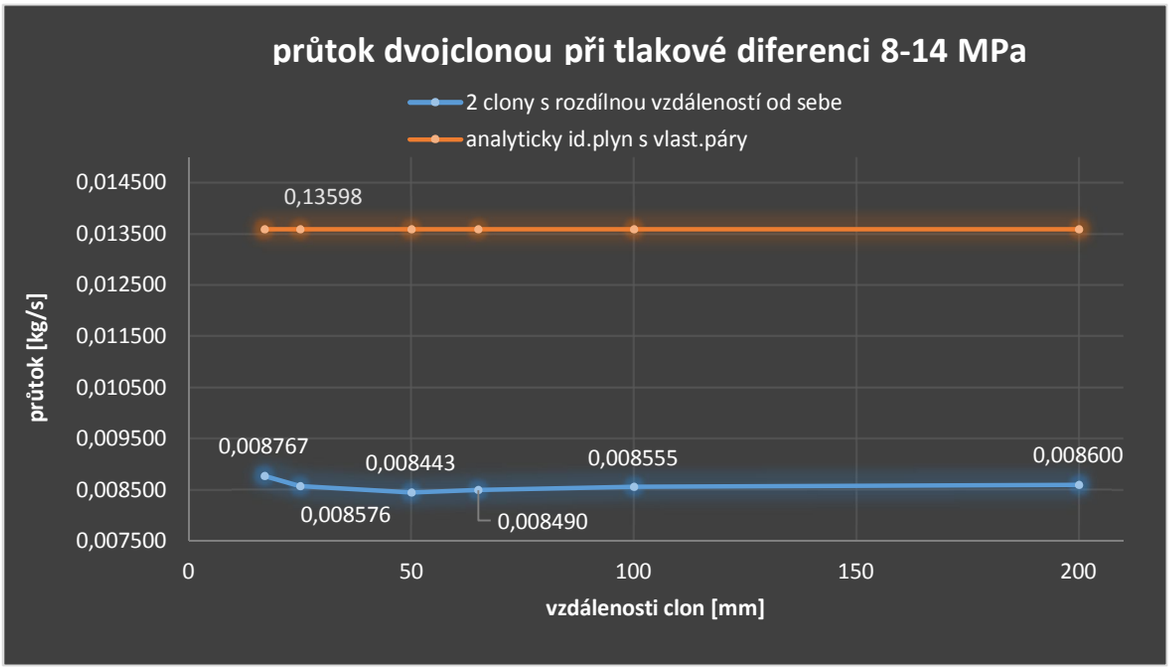
V grafu 6 a 7 je modře vyznačeno srovnání jednotlivých průtoků při různých vzdálenostech clon spočítaných v CFX. Červeně je vyznačen analytický výpočet, který nereflektuje vzdálenost clon, neboť počítá s druhou clonou tak, jako by se vzájemně neovlivňovaly. Výstupní hodnoty z první clony jsou brány jako vstupní hodnoty do clony druhé. Jediným způsobem, jak je v analytickém výpočtu zohledněna vzdálenost dvou clon, je v úseku l_4, kde se zvětšují třecí ztráty vlivem výrazného prodloužení vzdálenosti l_4. Jelikož ale zaokrouhluji průtok na 4 platná místa, rozdíl, který vznikne při započtení jiných třecích ztrát na délce l_4 u každé clony, se vlastně vůbec neprojeví na výsledném průtoku.



Graf 6: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 13-14 MPa

Tabulka 8: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 8-14 MPa

vzdálenost clon x [mm]	průtok při tlakové diferenci 8-14 MPa [kg/s]
17	0,008767
25	0,008576
50	0,008443
65	0,008490
100	0,008555
200	0,008600
analyticky	0,013598



Graf 7: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 8-14 MPa

6.2. Interakce dvou clon při zachování konstantního průtoku

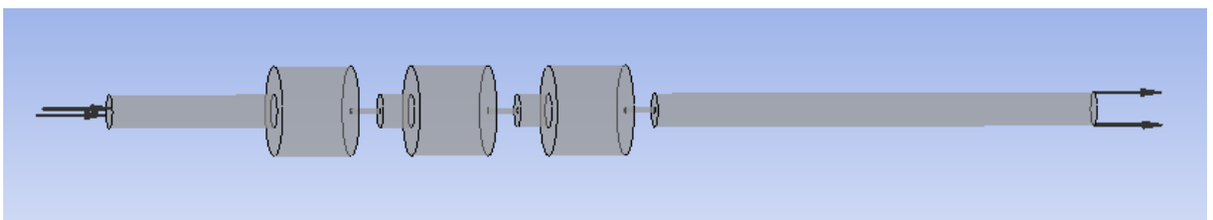
V případě volby konstantního průměru clony 1 mm a volby tlakového spádu 13–14 MPa je průtok na jedné samostatné cloně $\dot{m}$ = 0,005941 kg/s, jak je uvedeno například v kapitole 5.2. Srovnání analytického výpočtu s hodnotami z CFX při rozdílné tlakové diferenci. Použije-li se tento průtok jako vstupní veličina do druhé clony tak, aby byl zachován konstantní průtok, vyjde jako proměnná výstupní veličina statický tlak na výstupu z druhé clony. Tento tlak je proměnná, která je v této kapitole zkoumána, neboť právě mařič jako soustava clon pracuje s konstantním průtokem.

Výsledek je obdobný jako v předešlé kapitole. Vzdálenost clon se výrazně neprojeví na výstupním tlaku ze clony.

Tabulka 9: výstupní tlaky z dvojclony při konstantním průtoku

vzdálenost clon x [mm]	Statický tlak na výstupu z 2.clony [MPa]
17	12,050
25	11,960
50	11,930
65	11,890
100	11,980
200	11,930
analyticky	12,038

6.3. Použití více clon za sebou, vliv a význam dalších úprav



Obrázek 18: 3D pohled na řešenou trojclonu

Při použití více clon v uspořádání za sebou lze měnit různé parametry v soustavě clon a dosáhnout tak požadované výstupní veličiny. V kapitole 6.1 již byl řešen vliv vzdálenosti mezi clonami. Kapitola 6.3.2 Použití více clon za sebou při konstantním průtoku bude pojednávat o vlivu změny průměrů clony. Dosud jsme uvažovali u dvojclony vždy oba průměry stejné-konstantní. V následujících kapitolách bude ukázán postup, jak navrhnout proměnné průměry clon pro dosažení přibližně konstantních tlakových poměrů na jednotlivých clonách mařiče. A zároveň bude srovnáno řešení mařiče s clonami s konstantními průměry oproti clonám s proměnnými průměry z hlediska jejich tlakové ztráty a dosaženého průtoku.

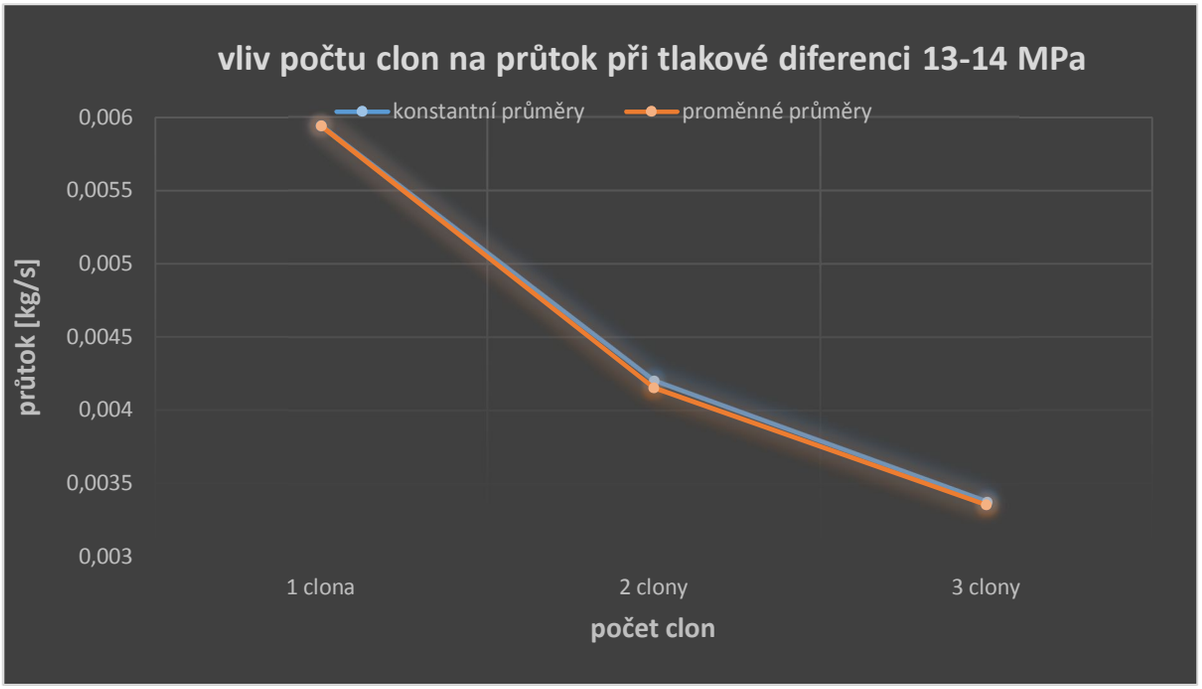
6.3.1 Použití více clon za sebou při konstantní tlakové diferenci

K řešení této problematiky byla zvolená stejná geometrie jako je v 4.2.1 postup analytického výpočtu a na obrázku 8. Vzdálenost jednotlivých clon od sebe je 25 mm, stejně jako je jedna z variant v kapitole 6.1 Vzájemná interakce dvou clon při konstantní tlakové diferenci. Účelem této simulace v CFX bylo prokázat výrazný pokles průtoku při použití více clon řazených za sebou. Z tabulky 10 je zřejmé, že rozdíl při použití 1 nebo 3 clon se na průtoku projeví dramaticky. Průtok při použití 3 clon se sníží téměř o polovinu v porovnání s průtokem skrz 1 clonu.

Průměr clon je uvažován buď konstantní, nebo zvětšující se ve směru toku media, což je blíže vysvětleno již v 1.1 Technická realizace mařiče. Hodnoty proměnných průměrů clon použitých v tabulce 10 jsou vypočteny v kapitole 6.3.2 Použití více clon za sebou při konstantním průtoku. V případě malého tlakového spádu, který je zde uvažován (13 – 14 MPa), se změna na proměnné průměry clon neprojeví výrazně (viz tabulka 10). Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 10 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (proměnné·100 / konstantní průměry clon). Se zvětšujícím se tlakovým spádem narůstá ale rozdíl v průtocích. Z výsledků tedy vyplývá, že pro výrazné snížení průtoku je vhodné použít více clon za sebou. Pohybujeme-li se na malé tlakové diferenci, lze použít konstantní průměry a vliv na změnu průtoku bude malý. V další kapitole je naznačeno, že při větším tlakovém spádu už je ale vliv proměnných průměrů clon výraznější. Výraznější je i v případě většího počtu clon za sebou použitých k redukci tlaku.

Tabulka 10: porovnání clon s proměnnými a konstantními průměry při konstantní tlakové diferenci

CFX id.plyn s vlastnostmi páry			
počet clon	průtok s proměnným průměrem clon [kg/s]	průtok s konstantním průměrem clon [kg/s]	rozdíl [%]
1 clona	0,005941	0,005941	0,00
2 clony	0,004152	0,004204	1,24
3 clony	0,003354	0,003381	0,80



Graf 8: vliv počtu clon na průtok při tlakové diferenci 13-14 MPa

6.3.2 Použití více clon za sebou při konstantním průtoku

Chceme-li zachovat konstantní průtok soustavou clon, musí se měnit protitlak tak, jak je již naznačeno v předešlých kapitolách. Počet clon v soustavě je totožný a na rozdílnou velikost protitlaku bude mít vliv volba konstantních průměrů clony či volba proměnných průměrů clony, jak je dále v kapitole uvedeno.

Pokud se zvolí konstantní průměry clon, tlakový poměr se u každé clony mění a na poslední cloně může nastat kritické proudění viz 2.3. kritické proudění na cloně. Clony s proměnnými průřezy mohou mít tlakový poměr stejný na každé cloně při vhodném nastavení průměru clony d_3. Tlakový poměr je úmyslně nastaven stejně a proměnnou v této konfiguraci je průměr clony d_3. Právě pomocí změny průměru d_3 si libovolně měníme tlakový poměr. Neměnné parametry jsou vstupní tlak a požadavek konstantního průtoku. Nastavení stejných tlakových poměrů na každé cloně je pro praktické aplikace důležité. Při stejných tlakových poměrech nedochází ke kritickému průtoku, pokud na celkovém tlakovém spádu mařiče je použito dostatečné množství clon. V kapitole 2.4 Hugoniotova věta již bylo uvedeno, že při kritickém průtoku

dochází k vyšlehávání clonek a k výrazným změnám tlakových poměrů v mařiči. V důsledku toho pak mařič nefunguje s parametry, pro které byl navržen. Pokud jsou clony v mařiči zavařeny viz kapitola 1.5 Upevnění clon v tělese, nelze je vyměnit při vyšlehání. Proto je zcela zásadní provést stejné nastavení tlakových poměrů na každé cloně z důvodu životnosti a funkce zařízení. Zde je ukázka toho, jak pomocí analytického výpočtu z kapitoly 4.2.1 Postup analytického výpočtu správně nastavit tlakový poměr u dvojclony a trojclony.

Výpočet průměru clon tak, aby byl stejný tlakový poměr, je iterační metoda původního výpočtu pro jednu clonu z kapitoly 4.2.1 Postup analytického výpočtu. Jako referenční hodnota pro průtok byl zvolen průtok, kterého je dosaženo s clonou o průměru 1 mm na tlakové diferenci 13 - 14 MPa. Průtok příslušný této konfiguraci je $\dot{m}$ = 0,006935 kg/s. Proto také clony s konstantním průměrem použité níže ve výpočtech mají clonu o průměru 1 mm.

a) Řešení dvojclony

Z analytického výpočtu pro dvojclonu podle stejného postupu jako v 4.2.1 Postup analytického výpočtu, vychází při $\dot{m}$ = 0,006935 kg/s tlak na výstupu z dvojclony p_7 = 12,012 MPa. Tento protitlak je hodnota, ze které se spolu s počátečním tlakem p_1 = 14,000 MPa získá tlakový poměr β na dvojcloně. Přibližný návrh tlakových poměrů vychází z analytického výpočtu, a tudíž je i trochu odlišný od hodnot, které jsou vypočteny pro stejnou geometrii pomocí CFX (viz graf 1). Nelze ale stanovit jiný postup, neboť do CFX je nutné dosazovat pouze hodnoty tlaků, nikoliv průtok. Proto je výhodné pomocí analytického výpočtu zjistit přibližnou hodnotu protitlaku. V níže uvedených tabulkách je pak provedeno srovnání, o kolik % se liší hodnoty z CFX oproti analytickému výpočtu. V případě velkého rozdílu je třeba iterovat a jako výstupní tlak pro tlakový poměr je nutno vzít hodnotu z CFX, která vyjde při daném průtoku (tj. taková hodnota protitlaku v CFX, při které je dosaženo původního zadaného průtoku). Tato hodnota protitlaku je dosazena namísto hodnoty, která byla zvolena jen z analytického výpočtu.

$$\beta = \sqrt{\frac{p_7}{p_1}} = \sqrt{\frac{12{,}012}{14{,}000}} = 0{,}926244$$

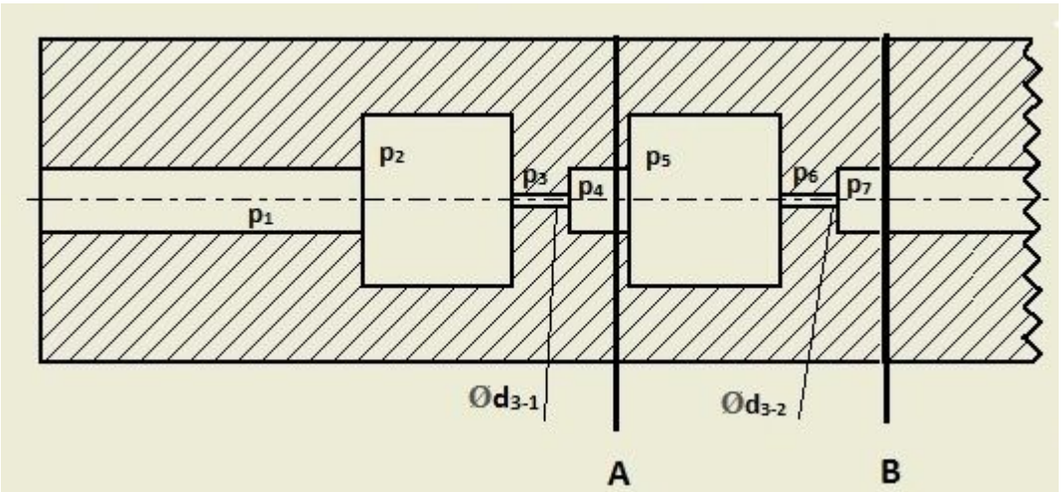
p_7 = 12,012 MPa

$p_{4ref} = \beta \cdot p_1$ = 12,968 MPa

p_{4ref} – referenční tlak analyticky spočítaný v rovině A a vyhodnocený v rovině A v CFX

p_7 – tlak spočítaný a odečtený z roviny B, rovina B umístěna tak, aby vzdáleností od ústí clony d_{3-2} odpovídala vzdálenosti roviny A od ústí clony d_{3-1}. Jinak by tlaky odečítané v různých místech nebyly srovnatelné.

Vzdálenost roviny A od vstupní hrany do dvojclony je 55 mm. Vzdálenost roviny B je 84 mm.



Obrázek 19: řez dvojclonou s vyznačenými tlaky v jednotlivých úsecích a s rovinami A, B, ve kterých jsou vyhodnocovány referenční tlaky

Nyní se v analytickém výpočtu pro dvojclonu vyřeší průměr první clony d_{3-1}. Dosazuje se taková hodnota d_{3-1} (namísto původní d_3 = 1 mm), při níž je dosaženo hodnoty p_{4ref}, která se vypočetla pomocí β. Při tlaku p_{4ref} = 12,968 MPa a stále stejném průtoku vychází po zaokrouhlení clon na setinu milimetru d_{3-1} = 0,99 mm. Clony jsou zaokrouhlovány na setinu milimetru z důvodu obvyklých výrobních možností.

Tato hodnota je zaokrouhlena na setinu milimetru, proto nikdy přesně vzájemně nesouhlasí porovnávané hodnoty p_{4ref} analytická a odečtená z CFX. Změnou

průměru d_{3-1} se změní tlakové poměry ve druhé cloně. Průměr d_{3-2} se určí obdobným způsobem tak, aby odpovídal tento průměr zvolenému koncovému tlaku p_7 = 12,012 MPa.

d_{3-2} = 1,01 mm

Soustava clon s těmito průměry je vymodelována a zasíťována v ANSYS ICEM CFD 17.0. Pomocí CFX jsem vyhodnotil rozdíl tlaků v rovinách A a B, kde byly odčítány jednotlivé tlaky. Tyto odečtené tlaky se pak porovnají s analyticky vypočtenými tlaky p_{4ref} a p_7 viz výše. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11. Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 11 a 12 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (CFX·100 / analytický výpočet).

Tabulka 11: Porovnání analytického výpočtu a hodnot z CFX

tlak [MPa]	analyticky vypočítané tlaky [MPa]	odečtené tlaky z CFX [MPa]	rozdíl [%]
p_1	14,000	14,000	0,00
p_{4ref}	12,968	12,917	0,39
p_7	12,012	11,802	1,75

Výsledky porovnání se nepatrně liší, ale vzhledem ke korekci průměru clon, kdy jsou zaokrouhleny na setinu milimetru, jsou výsledky brány jako vyhovující. Lze konstatovat, že při návrhu proměnných průměrů dvojclony dle analytického výpočtu je v řešeném rozsahu tlaků možno dosáhnout výsledků s rozdílem okolo 2%. Jak se číselně a procentuálně liší tlakové poměry mezi analytickým výpočtem a CFX je vidět tabulce 12.

Tabulka 12: Porovnání tlakových poměrů vypočítaných a zjištěných v CFX (pro proměnné průměry)

clona	tlak.poměr s proměnnými průměry analyticky	tlak.poměr s proměnými průměry CFX	rozdíl [%]
1	0,926244	0,922692	0,38
2	0,926244	0,913637	1,36

V tabulce 13 je vidět rozdíl tlaků vypočítaných v CFX ve dvojcloně při použití proměnných a konstantních průměrů clony. Výstupní tlak ze dvojclony se díky jiné konfiguraci průměrů clon liší o 2 %. Ve dvojcloně je tedy vliv proměnných průměrů clony při malé tlakové diferenci zanedbatelný. Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 13 a 14 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (proměnné·100 / konstantní průměry clon).

Tabulka 13: Porovnání hodnot tlaků z CFX pro proměnné a konstantní průměry

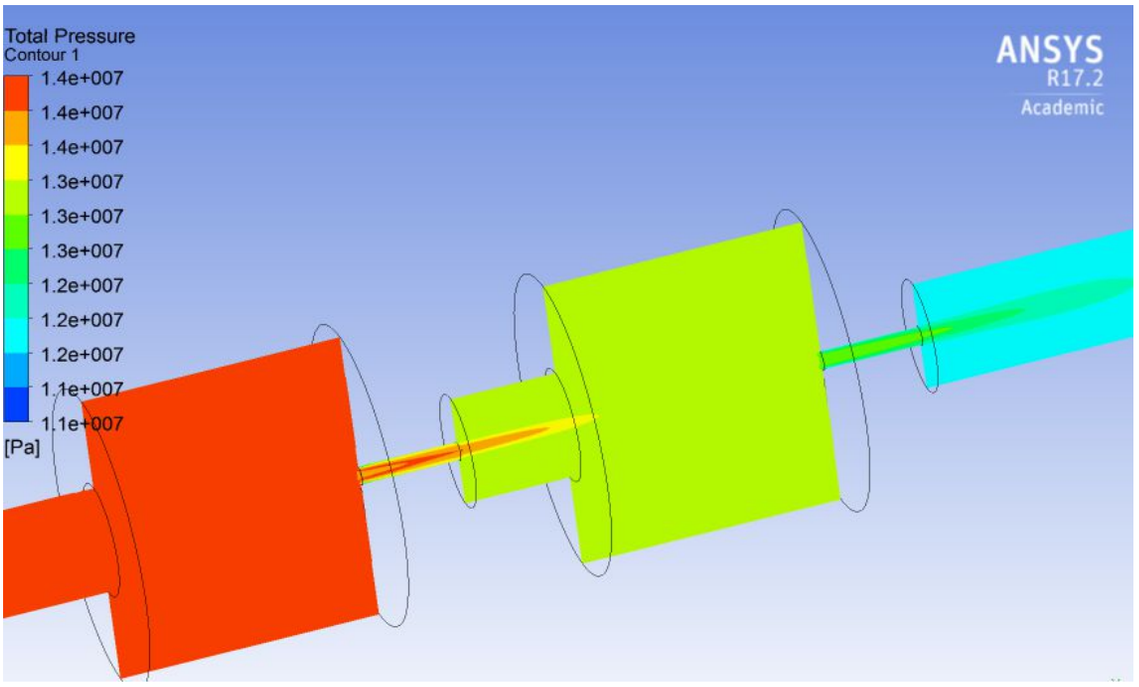
tlak [MPa]	tlak s proměnnými průměry [MPa]	tlak s konstantními průměry [MPa]	rozdíl [%]
p_1	14,000	14,000	0,00
p_{4ref}	12,917	13,044	0,97
p_7	11,802	12,051	2,06

Tabulka 14: Porovnání tlakových poměrů v dvojcloně v CFX s konstantním a proměnným průměrem

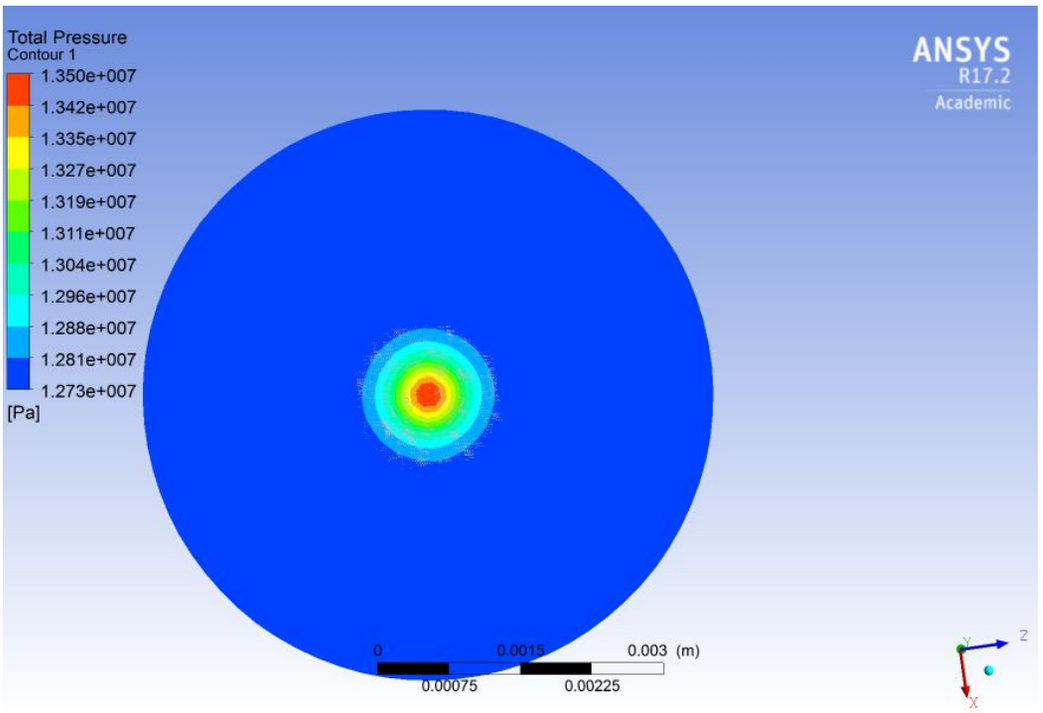
clona	tlak.poměr s proměnnými průměry	tlak.poměr s konstantními průměry	rozdíl [%]
1	0,922692	0,931700	0,97
2	0,913637	0,923879	1,11

Srovnání tlaku na výstupu z dvojclony v CFX s konstantním a proměnným průměrem

Tlak na výstupu z dvojclony v CFX s proměnnými průměry clon je 11,802 MPa oproti tlaku z dvojclony s konstantními průměry, kde je tlak 12,051 MPa. Dvojclona s proměnnými průměry má tedy v tomto příkladu větší tlakovou ztrátu při konstantním průtoku než dvojclona s konstantními průměry.



Obrázek 20: Řez rovinou x-y, kde je rozložení celkového tlaku ve dvojcloně



Obrázek 21: Rozložení celkového tlaku na průměru d_4 v rovině A, kde je zjišťován tlak p_4.

Hodnota tlaku v jednotlivých řezech byla zjištěna pomocí funkce massFlowAve v programu ANSYS CFD-Post 17.0, kdy je odečten tlak zprůměrovaný na plochu průřezu. Jak je vidět na obrázku 20 a 21, celkový tlak je v průřezu na jednotlivých poloměrech rozdílný. Proto nelze stanovit tlak v jednom konkrétním bodě, neboť hodnoty tlaků se v jednotlivých částech průřezu liší.

b) Řešení trojclony

Řešení trojclony je identické s řešením dvojclony, jen je navíc přidán jeden škrtící element. Proto je výpočet uveden již jen zkráceně.

Z výpočtu pro trojclonu se získá při $\dot{m}$ = 0,006935 kg/s tlak na výstupu z trojclony p_{10} = 11,035 MPa. Je zvolen stejný postup jako v případě dvojclony, ale v konečném porovnání výsledků z CFX bylo dosaženo jiného průtoku. To znamená, že výsledný tlak p_{10} spočítaný analyticky není úplně přesný a potvrzuje to závěry z kapitoly 5.2 Srovnání analytického výpočtu s hodnotami z CFX při rozdílné tlakové diferenci, tj. že při stále nižším protitlaku je analytický výpočet méně přesný. Aby

bylo v CFX dosaženo požadovaného konstantního průtoku $\dot{m}$ = 0,006935 kg/s, musel se v CFX měnit protitlak až na 10,300 MPa namísto spočteného p_{10} = 11, 035 MPa. Tento protitlak (10,30 MPa) je hodnota, ze které se spolu s počátečním tlakem p_1 = 14,000 MPa získá tlakový poměr β na trojcloně.

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{p_{10}}{p_1}} = \sqrt[3]{\frac{10{,}300}{14{,}000}} = 0{,}902754$$

p_1 = 14,000 MPa

$p_{4ref} = \beta \cdot p_1$ = 12,638 MPa

$p_{7ref} = \beta \cdot p_4$ = 11,409 MPa

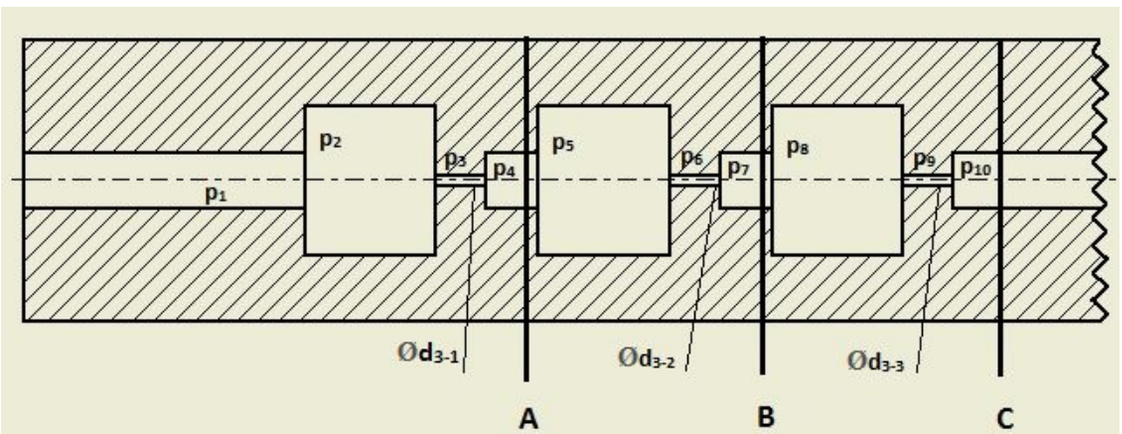
$p_{10} = \beta \cdot p_7$ = 10,300 MPa

Průměry d jsou zjištěny stejným způsobem jako v případě dvojclony, tj. je volen takový průměr d, který odpovídá danému tlaku za clonou při konstantním průtoku.

$d_{3\text{-}1}$ = 0,96 mm

$d_{3\text{-}2}$ = 1,00 mm

$d_{3\text{-}3}$ = 1,02 mm



Obrázek 22: řez trojclonou s vyznačenými tlaky v jednotlivých úsecích a rovinami A, B,C, ve kterých jsou vyhodnocovány referenční tlaky

V CFX odčítám tlaky v rovině A, B a C, tak aby byla zachována stejná vzdálenost odečtení tlaku od ústí jednotlivých clon viz obrázek 22.

Vzdálenost roviny A od vstupní hrany do trojclony je 55 mm. Vzdálenost roviny B je 84 mm. Vzdálenost roviny C je 105 mm. Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 15 a 16 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (CFX·100 / analytický výpočet).

Tabulka 15: Porovnání vypočítaných hodnot tlaku v porovnání s CFX (pro proměnné průměry)

tlak [MPa]	vypočítané tlaky [MPa]	odečtené tlaky z CFX [MPa]	rozdíl [%]
p_1	14,000	14,000	0,00
p_{4ref}	12,638	12,745	0,84
p_{7ref}	11,409	11,541	1,15
p_{10}	10,300	10,300	0,00

Výsledky porovnání se nepatrně liší, ale vzhledem k zaokrouhlení clon jsou výsledky brány jako vyhovující.

Tabulka 16: Porovnání tlakových poměrů vypočítaných a zjištěných v CFX (pro proměnné průměry)

clona	tlak.poměr s proměnnými průměry vypočtený	tlak.poměr s proměnými průměry CFX	rozdíl [%]
1	0,902754	0,910414	-0,85
2	0,902754	0,905529	-0,31
3	0,902754	0,892416	1,15

Poměrný rozdíl uvedený v tabulce 17 a 18 je dán jako rozdíl [%] = 100 - (proměnné·100 / konstantní průměry clon).

Tabulka 17: Porovnání hodnot tlaků z CFX pro proměnné a konstantní průměry

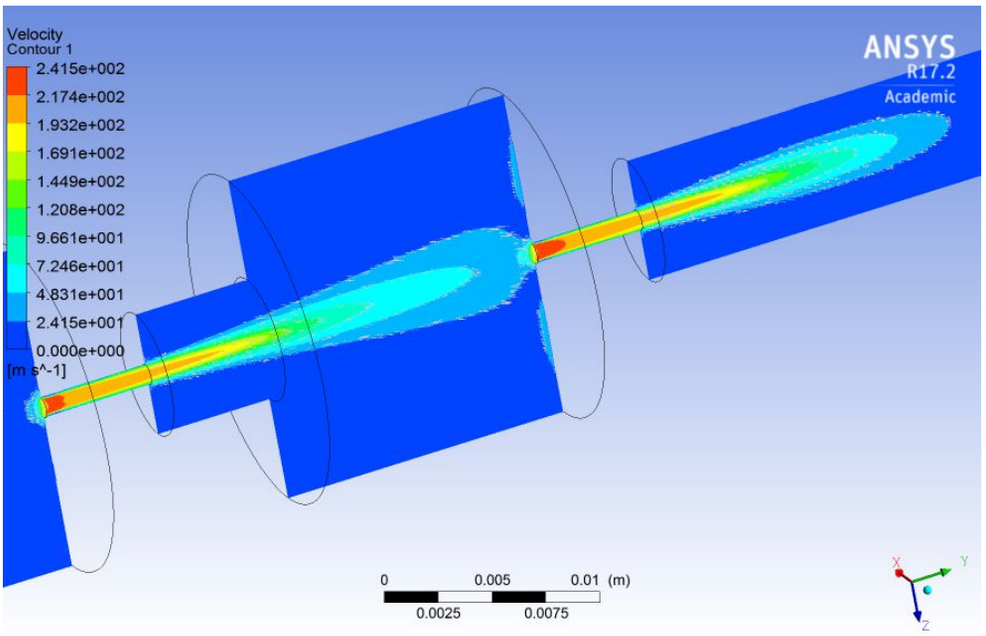
tlak [MPa]	tlak s proměnnými průměry [MPa]	tlak s konstantními průměry [MPa]	rozdíl [%]
p_1	14,000	14,000	0,00
p_4	12,745	13,033	2,21
p_7	11,541	11,949	3,41
p_{10}	10,300	10,750	4,19

Tabulka 18: Porovnání tlakových poměrů v trojcloně v CFX s konstantním a proměnným průměrem

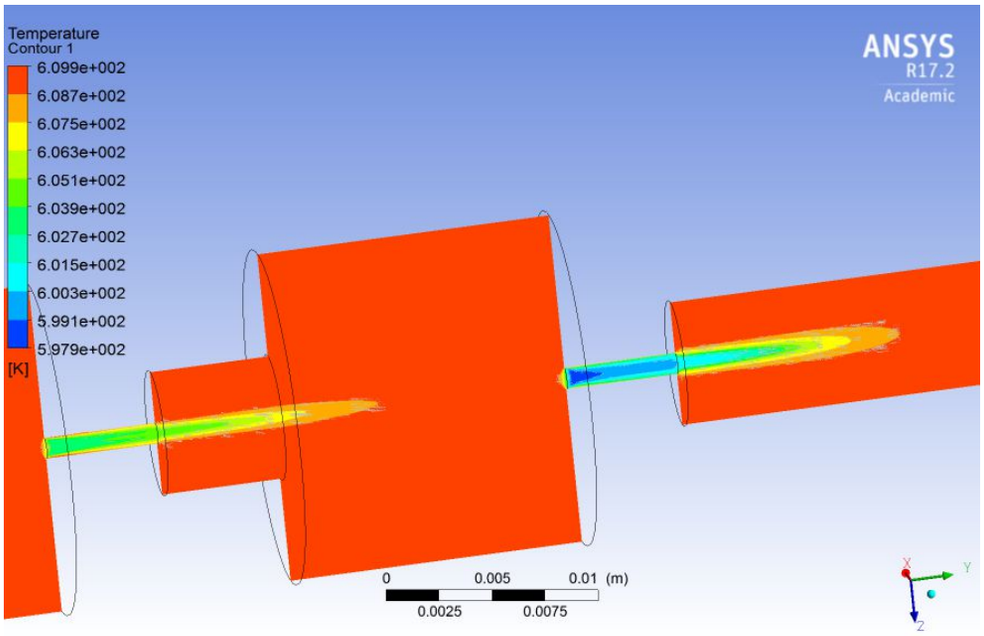
clona	tlak.poměr s proměnnými průměry	tlak.poměr s konstantními průměry	rozdíl [%]
1	0,910414	0,930985	2,21
2	0,905529	0,916793	1,23
3	0,892416	0,899634	0,80

<u>Srovnání tlaku na výstupu z trojclony v CFX s konstantním a proměnným průměrem</u>

Tlak na výstupu z trojclony v CFX s proměnnými průměry clon je 10,300 MPa oproti tlaku z trojclony s konstantními průměry, kde je tlak 10,750 MPa. V tomto konkrétním řešení trojclony, tak jak je nastavena, je již vidět vliv proměnných průměrů clon, který ve výsledku činí o 0,450 MPa větší tlakovou ztrátu než clony s průměry konstantními.



Obrázek 23: zobrazení rychlostního profilu ve clonách



Obrázek 24: Ukázka náhlé změny teploty při průtoku clonami, při adiabatické expanzi ve cloně. Z hlediska inverzní teploty jsme stále pod inverzní křivkou. Proto dochází lokálně ve clonách k náhlému poklesu teploty.

7. Srovnání výpočtu mařiče v CFD s reálnou zkouškou mařiče na páře

Pro výpočtovou část práce byly použity hodnoty průtoku, které byly získány během zkoušky mařiče 2POT14638/A, jíž jsem se osobně zúčastnil. Zkoušek proběhlo několik s rozdílnými výsledky.

7.1. Zkouška mařiče

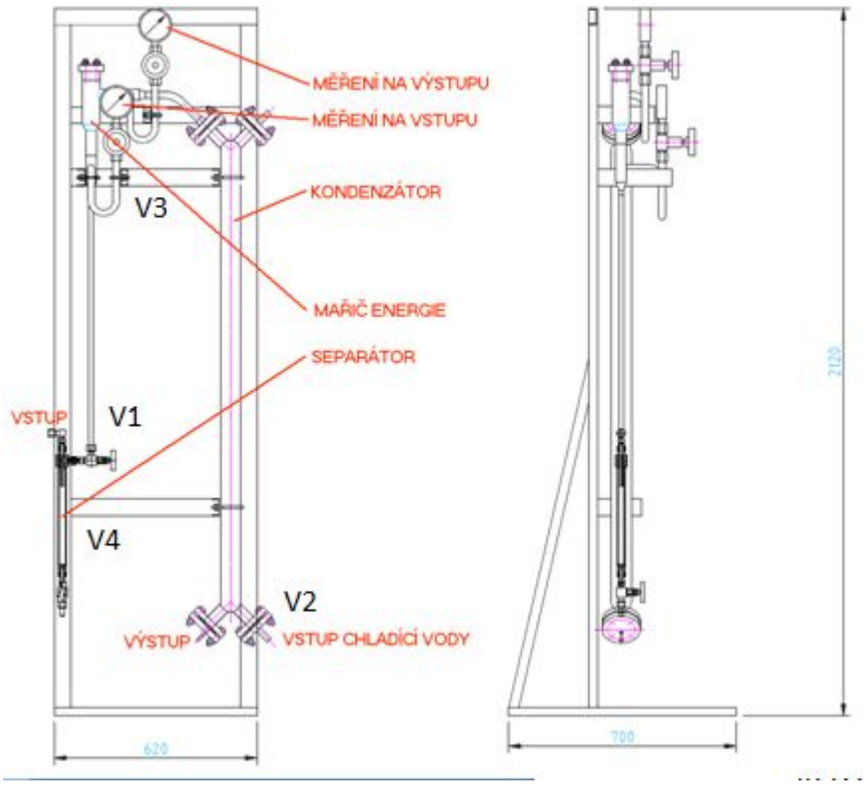
Účelem zkoušky mařiče bylo ověřit, zda průtočné množství páry přes mařič odpovídá předepsané hodnotě 40 kg/hod. Kritériem úspěšnosti bylo dosažení hmotnostního průtoku kondenzátu za chladičem v přesnosti -20 %, +5 % od nominální hodnoty. Naměřené hodnoty průtoku páry se tedy musí pohybovat v rozmezí 32 – 42 kg/hod.

Tabulka 19: Výsledky z měření č.1 z 12.4.2016

zkouška č.	doba měření	tlak p1	tlak p2	teplota t1	teplota t2	hmotnost kondenzátu	průtok při tlaku p1	průtok přepočtený na tlak 15,4 MPa	Pozn.
	[min]	[MPa]	[MPa]	[°C]	[°C]	[kg]	[kg /hod]	[kg /hod]	
1	5,5	14	0,1	290	85	5,084	55,46	61,01	průtok je + 45%, nevyhovuje
2	5,5	13,6	0,1	290	85	4,771	52,04	58,93	průtok je + 40%, nevyhovuje

Zkouška probíhala v Plzeňské teplárenské a.s. na bubnovém kotli č. 4. Okolní teplota u kotle byla 39,5°C. Mediem pro zkoušku byla sytá pára o tlaku 14 MPa. Nastavený protitlak byl výstup do atmosféry. Sytá pára jako medium pro ověřovací měření je velmi vhodná, protože medium odebírané z primárního okruhu jaderné elektrárny je směs s velkým obsahem vodní páry (obsah okolo 90%). Teplota syté páry pro tlak 14 MPa je 336,67 °C. Do mařiče byla přiváděna pára z kotle neizolovanou trubkou o délce 3 m. Může zde dojít ke kondenzaci určitého množství páry a proto byl za vstupem přívodního potrubí k měřícímu zařízení umístěn separátor

nečistot a vlhkosti. Pro dané měření byla navržena měřící trať, jejíž schéma je na obrázku 25.



Obrázek 25: schéma měřící tratě s vyznačením ventilů

Do mařiče se mohlo i přes separaci dostat nezanedbatelné množství vody, které nemuselo být na odlučovači před mařičem zcela odloučeno a měření proto není zcela srovnatelné s teoretickým výpočtem. Pro měření množství páry proteklé mařičem byl použit kondenzační výměník připojený za výstupním hrdlem mařiče, a tak stačilo po nastavení stabilního průtoku měřit hmotnost zkondenzované vody za čas.

7.2. Provedení zkoušky

Průběh zkoušky lze popsat následovně: Zkouška byla zahájena otevřením armatury V1 na separátoru (umístění ventilů je zakresleno na obrázku 25).

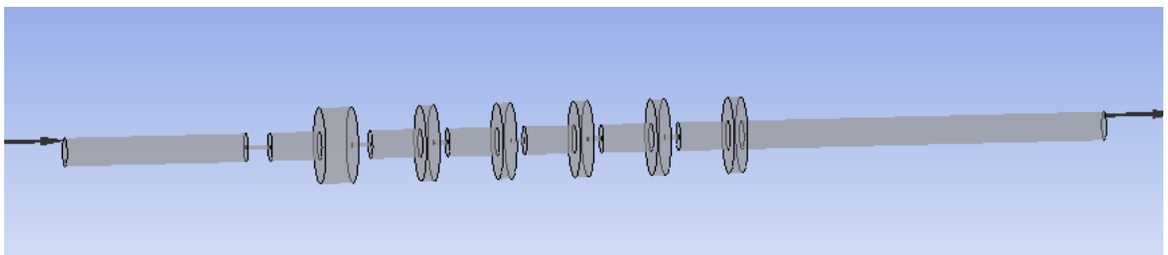
Obsluha otevřela kohout V2 přívodu chladící vody do kondenzátoru. Poté obsluha otevřela ventil na potrubí přívodu syté páry při současném uzavření ventilu V3 na vstupu do mařiče, čímž bylo zajištěno pročištění přívodního potrubí od

případných nečistot. Po stabilizaci průtoku páry separátorem byl otevřen ventil V3 do mařiče. Obsluha pomalu uzavírala ventil na výstupu ze separátoru V4, čímž se začal zvyšovat tlak před mařičem až na požadovanou hodnotu vstupního tlaku, přičemž asi 80 % páry při zkoušce stále odcházelo separátorem. Poté bylo provedeno prohřívání systému a stabilizace kondenzace (doba cca 5 minut). Po dosažení stabilního průtoku přes kondenzátor bylo zahájeno měření množství zkondenzované vody za čas. Průtok byl měřen odvážením zkondenzované vody na výstupu po dosáhnutí rovnovážného stavu zařízení. V průběhu měření byl kontrolován tlak na vstupu do mařiče. Měření bylo ukončeno po uzavření ventilu na přívodní trase.

Obrázek 26: fotografie měřící tratě

7.3. Porovnání vypočtené tlakové ztráty s výsledky reálné zkoušky zvoleného mařiče

V této kapitole bude provedeno porovnání výsledků reálné zkoušky popsané v předchozí kapitole 7.1 Zkouška mařiče s výpočtem mařiče v programu CFX. Celý výpočet v CFX je zde počítán s reálnými vlastnostmi vody a vodní páry dané dle IAPWS 97. Výkres reálného mařiče použitého pro zkoušku je zobrazen na obrázku 28. Geometrie, která byla počítána v CFX jako srovnávací, tedy simulovala reálný mařič a skládala se ze 6 clon s totožnými průměry jako byly použity při zkoušce na mařiči. V podstatě jde o model vnitřní průtočné části mařiče bez přívodního a odváděcího potrubí tak, jak je u reálného mařiče na obrázku 28. Rozdíl geometrie oproti reálnému mařiči byl dále v absenci sítka, které je umístěno před vstupem do mařiče. Zjednodušený pohled na geometrii použitou pro výpočet v CFX je na obrázku 27. Jedná se o zobrazení z prostředí CFX. Vstupní a výstupní potrubí v modelu v CFX je úmyslně prodlouženo, a to z důvodu vytvoření rychlostního profilu v potrubí před vstupem do první clony. Výstupní potrubí je prodlouženo oproti reálné zkoušce z důvodu zamezení zpětného proudění. Takto bylo potrubí prodlouženo pro všechny výpočty, které byly v diplomové práci použity v CFX, jak je vidět na obrázcích v předešlých kapitolách.



Obrázek 27: mařič se šesti clonami

První měření mařiče, které probíhalo, je v plném rozsahu zaznamenáno v kapitole 7.1 Zkouška mařiče v tabulce 18. Zkrácená verze obsahující jen výsledky průtoku je uvedena v tabulce 21. Průměry použitých clon mařiče jsou v tabulce 20.

Tabulka 20: První měření s většími průměry clon ze dne 12.4.2016

	1.clona	2.clona	3.clona	4.clona	5.clona	6.clona
průměr clon [mm]	0,78	0,9	0,99	0,95	1,075	1,075

S těmito průměry byly provedeny dvě reálné zkoušky. Ani jedno měření však nevyhovělo předepsanému průtoku, a to o 40 a o 45 %. Hodnoty předepsaného průtoku jsou zmíněny na začátku kapitoly 7.1 Zkouška mařiče. Na základě prvních zkoušek bylo konstatováno, že průtok mařičem je větší, něž předepsaný, proto byla upravena geometrie clon a zkouška byla se zmenšenými průměry clon opakována.

Tabulka 21: porovnání skutečné zkoušky a simulace v CFX

počet měření	skutečná zkouška mařiče, hodnota průtoku [kg/s]	mařič v CFX hodnota průtoku [kg/s]	rozdíl mezi zkouškou a výpočtem z CFX [%]
1	0,015406	0,006235	59,53
2	0,014456		56,87

Srovnávané hodnoty z 1. měření mařiče se v porovnání s mým výpočtem z CFX liší oproti experimentu o 56,87 - 59,53%. Naměřený průtok při zkoušce byl oproti předepsanému průtoku vyšší. Můj výpočet z CFX je oproti předepsané hodnotě naopak menší.

U druhého měření z 1.6.2016 se již hodnoty ze zkoušky mařiče téměř shodují s předepsanými průtoky a jsou v toleranci předepsaných průtoků pro mařič. V CFX se průtok liší výrazně méně než v případě prvního výpočtu s mařičem s většími průměry clon, jak je vidět v tabulce 23.

Tabulka 22: Druhé měření se zmenšenými průměry clon z 1.6.2016

	1.clona	2.clona	3.clona	4.clona	5.clona	6.clona
průměr clon [mm]	0,65	0,7	0,7	0,8	0,8	0,85

Tabulka 23: porovnání 2. měření a simulace v CFX

Zkouška č.	skutečná zkouška mařiče, hodnota průtoku [kg/s]	mařič v CFX hodnota průtoku [kg/s]	rozdíl mezi zkouškou a výpočtem z CFX [%]
1	0,007064	0,004502	36,30
2	0,007014		35,84
3	0,007250		37,93
4	0,007653		41,20
5	0,007592		40,72
6	0,008564		47,45

Výsledky z druhého měření jsou téměř totožné s předepsanými, proto je hodnota průtoku z tohoto měření brána jako referenční a dále je zkoumán vzniklý rozdíl mezi simulací CFX a druhým skutečným měřením

Vzniklý rozdíl u obou měření oproti hodnotám z CFX může být dán několika důvody:

1) Pára byla přiváděna z kotle na sytou páru, jednalo se tedy o sytou páru. Jak je ale patrné ze zápisu z měření zmíněného v kapitole 7.1 Zkouška mařiče, pára vstupuje do mařiče neizolovanou trubkou. Pára je tak přiváděna k mařiči pravděpodobně s určitým podílem kapalné fáze. Nebylo možno u páry před vstupem do experimentu stanovit, jestli jde o páru sytou nebo mokrou. Nezanedbatelné množství vody tak mohlo proudit nejen do odlučovače vlhkosti, který nemusel a pravděpodobně neodloučil všechny kapky, ale i přímo do mařiče. Naměřený průtok tak není zcela srovnatelný s teoretickým průtokem z CFX díky pravděpodobnému výskytu kapalné fáze. Proto je v rámci práce proveden výpočet pro páru s obsahem vlhkosti 5 a 15 % a srovnán vliv vlhkosti páry na průtok, jak je vidět v tabulce 24.

Tabulka 24 srovnání průtoku z CFX pro rozdílný obsah vlhkosti páry

	obsah vlhkosti y=0	obsah vlhkosti y=0,05	obsah vlhkosti y=0,15
průtok [kg/s]	0,004502	0,004565	0,004634

Jak je vidět v tabulce 24, s vyšším obsahem vlhkosti vzrůstá průtok, ale nárůst průtoku není takový, aby se přiblížil hodnotě z experimentu. Průtok se zvýšenou vlhkostí je počítán pro celý mařič. Rozhodující vliv je ale na poslední cloně, kde je kritické proudění (viz tabulka 25). Na poslední cloně bude ale pára přehřátá. Zvýšená vlhkost sice změní přerozdělení tlakových poměrů, ale jen na prvních clonách. V tomto rozsahu vlhkosti není možno hledat vysvětlení v rozdílném průtoku mezi experimentem a simulací CFX.

Pokud bychom spočítali tento 6ti clonový mařič analyticky, stejně jako v 4.2.1 postup analytického výpočtu, vyjde hodnota průtoku $\dot{m}$ = 0,006747 kg/s. Tato hodnota se blíží průtoku z experimentu, ale analytický výpočet je počítán pro ideální plyn s vlastnostmi páry, nikoliv pro páru.

2) Simulace z CFX nemusí zcela přesně popisovat situaci. Jelikož mařič počítaný v CFX je tvořen šesti clonami, počet buněk by se při tvorbě sítě 6x zvětšil, a tím výrazně vzrostla časová náročnost výpočtu a objem zapisovaných dat. Počítá se zde s velkým tlakovým spádem 0,1 MPa – 14 MPa. V předešlých kapitolách byl řešen maximálně spád 4 MPa. Výpočet na vodní páře je také složitější a náročnější než v případě použití ideálního plynu s vlastnostmi vodní páry. Síť proto byla zjednodušena tak, aby byl výpočet proveditelný v reálném čase. A i díky zjednodušení sítě nemusí být výsledek průtoku z CFX přesný.

3) Geometrie skutečného mařiče je rozdílná od geometrie, kterou jsem použil pro CFX. Zjednodušený mařič pro CFX, který jsem počítal, byl použit z důvodu příliš

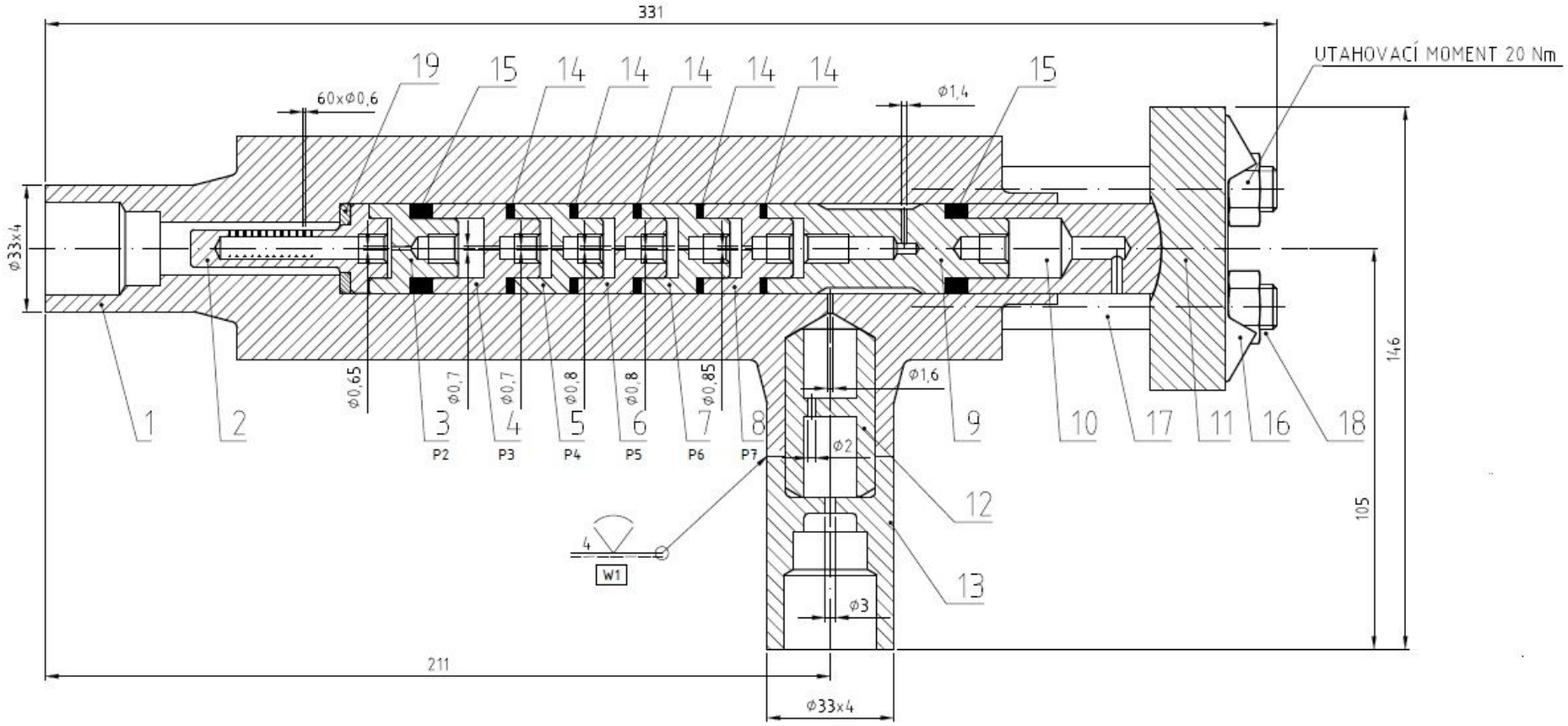
velké náročnosti zasíťovat identicky přesný mařič. Nejdůležitější konfigurace, jako počet clon a průměry clon, ale byly zachovány.

Kombinace těchto tří důležitých faktorů pak zapříčinila rozdíl, který vznikl při porovnání průtoků. I kdybychom naprosto přesně znali termodynamický stav látky, která vstupuje do mařiče a měli naprosto dokonalou síť, i tak by průtoky zcela neodpovídaly vlivem rozdílné geometrie. Rozdíl by byl ale výrazně menší.

Z rozložení tlaků za jednotlivými clonami v mařiči, které jsou odečteny z výpočtu v CFX (pro srovnání spočteny analyticky i tlaky za clonami, ale na jiném mediu, viz bod 1 výše), je vidět, že na posledních clonách mařiče dochází ke kritickému proudění. Každý z výpočtů při zachování geometrie mařiče, ukazuje jiné rozložení tlaků za jednotlivými clonami. Při tlakové diferenci 0,1 – 14 MPa se šesti clonami v mařiči by ke kritickému proudění docházelo i při konstantních tlakových poměrech. Ke kritickému proudění dojde vždy na poslední cloně, jak potvrzují hodnoty z tabulky 25. K zamezení kritického proudění na poslední cloně by bylo zapotřebí přidat ještě jednu clonu.

Tabulka 25 hodnoty tlaků za jednotlivými clonami v celém mařiči

	tlaky za jednotlivými clonami spočítané analyticky [MPa]	tlaky za jednotlivými clonami odečteny z CFX [MPa]
1.	10,03	11,70
2.	7,88	9,98
3.	6,62	8,72
4.	4,68	7,17
5.	3,17	5,89
6.	1,36	1,05



Obrázek 28:výkres sestavení úplného mařiče 2POT14638/A

Závěr

Tato práce se zabývala výpočtem a rozborem tlakové ztráty na mařiči tlakové energie 2POT14638/A od společnosti Škoda JS.

V rešeršní části je teoreticky popsána funkce a princip mařiče. Provedl jsem rešerši komerčně dostupných tlakových mařičů pro plynná i kapalná media a zmínil některé aspekty jejich konstrukce a provozu. Popsal jsem a blíže specifikoval účel využití mařiče 2POT14638/A, který je instalován na JE Temelín a který je předmětem této práce.

Ve výpočtové části jsem porovnával výpočet tlakových ztrát nejprve na jednom elementu(cloně). Výsledky analytických výpočtů byly porovnávány s výpočty z programu CFX. Výpočty byly provedeny pro různé konfigurace clony. Měnil se průměr při zachování stejného protitlaku a byla zaznamenávána změna průtoku. Další variantou byl konstantní průměr clony a změna protitlaku. Opět byla vyhodnocena změna průtoku. Z výsledků zaznamenaných v tabulkách a grafech lze vidět, jak se odchylují hodnoty z CFX a analytického výpočtu.

Dle zadání byla též řešena vzájemná interakce dvou clon. Pokud se řešila interakce při tlakové diferenci 13-14 MPa, vzájemná interakce clon byla prakticky zanedbatelná. Naopak při vyšší tlakové diferenci 8-14 MPa se již výrazněji projevila změna vzdálenosti clon. Pro praktický návrh mařiče je však stále tato změna průtoku zanedbatelná. V kapitole zabývající se vzájemnou interakcí clon je dále řešen problém s dvěma a třemi clonami s konstantními a proměnnými tlakovými poměry na jednotlivých clonách. Je popsán výpočet, jak navrhnout proměnné a konstantní tlakové poměry pomocí analytického výpočtu v kombinaci s CFX.

Poslední část práce je věnována porovnání výsledků získaných při reálné zkoušce mařiče 2POT14638/A, při které byla na vstupu použita sytá pára (mokrá pára), s výsledky modelů na zjednodušené geometrii tohoto mařiče, která je spočítána analytickým výpočtem a simulací v CFX. Rozdílnost výsledků je okomentována v kapitole 7.3 Porovnání vypočtené tlakové ztráty s výsledky reálné

zkoušky zvoleného mařiče a následuje krátká diskuze, možných příčin rozdílů mezi experimentálními daty a výsledky spočítanými analyticky a simulací v CFX.

1) Lze uvažovat, že výsledky ze zkoušky a ze simulace v CFX se liší například díky tomu, že není znám přesný obsah vlhkosti v páře, která během zkoušky vstupuje do mařiče. Obsah kapalné fáze v páře ovlivňuje – zvyšuje hmotnostní průtok mařičem. Testovacími výpočty se zvoleným obsahem vlhkosti 5 a 15 % ve vstupní páře se přepočítal průtok, nicméně ani toto množství vlhkosti neumožňuje dosáhnout shodu výpočtu s experimentem. Průtok se zvýšenou vlhkostí je počítán pro celý mařič. Rozhodující vliv je ale na poslední cloně, kde je kritické proudění, viz tabulka 25. Na poslední cloně bude ale pára přehřátá. Zvýšená vlhkost sice změní přerozdělení tlakových poměrů, ale jen na prvních clonách. V tomto rozsahu vlhkosti není možno hledat vysvětlení v rozdílném průtoku mezi experimentem a simulací CFX.

2) Další možností rozdílných výsledků může být, že v simulaci v CFX je použita zjednodušená geometrie oproti skutečnému mařiči, a proto jsou na jednotlivých clonách nastaveny rozdílné tlakové poměry než na skutečném mařiči.

3) Byla použita zjednodušená síť na výpočet simulace celého mařiče. Na rozdíl od výpočtu jedné nebo dvoj a tří clon se z důvodu časové náročnosti výpočtu musela síť celého mařiče zjednodušit a tím mohlo dojít k ovlivnění výsledků ze simulace.

Práce ukazuje, že použití analýzy CFD v kombinaci s analytickým výpočtem je vhodný nástroj pro řešení návrhu tlakového mařiče. Pro jednotlivé clony, případně sestavu clon platí, že čím je vyšší tlaková diference, tím je větší rozdíl mezi analytickým výpočtem a hodnotami z CFX. Odtud také vyplývá nevhodnost použití jen analytického výpočtu pro návrh mařiče. Analytický výpočet by měl sloužit spíše jako orientační a pomocný nástroj při řešení mařiče. Pro přesný a spolehlivý návrh mařiče je vhodné použít analýzy CFD, v tomto případě konkrétně programu CFX, ve kterém je možno počítat s reálnou parou, jejíž vlastnosti jsou dány IAPWS 97.

Seznam použité literatury

[1] Orifice plate manufacturer. *Www.fabritekindia.com* [online]. India [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.fabritekindia.com/products/orifice-plate-manufacturer/

[2] Multi stage restriction orifice. *Www.tmtecnomatic.com* [online]. Italy [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.tmtecnomatic.com/multi-stage-restriction-orifice.php

[3] Orifice Plate manufacter. *Www.prisma-instruments.com* [online]. India [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.fabritekindia.com/products/orifice-plate-manufacturer/

[4] Restriction orifice plates. *Www.emcocontrols.com* [online]. Denmark, 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.emcocontrols.com/393/restriction-orifice-plates

[5] Restriction orifice – flow control instrument *hwww.piping-engineering.com* [online]. USA, 2014 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.piping-engineering.com/restriction-orifice-ro-flow-control-instrument.html

[6] Multi-stage restriction orifice. *Www.europages.com* [online]. France, 2014 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.europages.com/filestore/product/b7/4/Restriction_orifice_Rev1_jan_2014_9d183375.pdf

[7] Restriction orifice plates. *Www.emcocontrols.com* [online]. Denmark, 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.emcocontrols.com/list/285/restriction-devices

[8] Mařič energie M25. *Http://www.trival.cz* [online]. Česká republika [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.trival.cz/kat_armatury_pro_energ/str_116_120.pdf

[9] Restriction orifice. *Www.prisma-instruments.com* [online]. France [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.prisma-instruments.com/en/measurement-and-regulation-instruments/flow-instruments/restriction-orifice

[10] Orifice plate assenblies. *Http://flowelement.net* [online]. India [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://flowelement.net/orifice-plate-assenblies.html

[11] Orifice Plate manufacter. *Www.prisma-instruments.com* [online]. France [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.prisma-instruments.com/images/uploads/PDF/Fiches%20PDF%20EN/Flow/Orifices.pdf

[12] Cavitation in restriction orifices. *Https://neutrium.net/* [online]. 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: https://neutrium.net/fluid_flow/cavitation-in-restriction-orifices/

[13] KALČÍK, Josef, Karel SÝKORA. *Technická termomechanika.* Vyd. 1. Praha: Academia, 1973.

[14] JEŽEK Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vyd. 3. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01615-3.

[15] interní materiály společnosti Škoda JS a.s.

[16] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-05-22]. ISBN 978-80-248-1508-4.

[17] Přibližný výpočet tlakové ztráty třením v potrubí. *Http://voda.tzb-info.cz* [online]. Česká republika, 2002 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://voda.tzb-info.cz/potrubni-trasy-vodovod/1002-priblizny-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubi

[18] Colebrook Equation. *Www.engineeringtoolbox.com* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/colebrook-equation-d_1031.html

[19] Colebrook Equations Formulas Calculator. *Http://www.ajdesigner.com* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.ajdesigner.com/php_colebrook/colebrook_equation.php#ajscroll

[20] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. *Hydraulika potrubí* [online]. Praha [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf

Seznam tabulek

Tabulka 1: ukázka nabízených teplotních a tlakových rozsahů pro materiál P250GH, ze kterého je vyroben mařič M25 na vodu a neagresivní kapaliny od společnosti Trival [8] 16
Tabulka 2:porovnání rozdílů průtoku při použití 2 druhů media v CFX s analytickým výpočtem při tlakové diferenci 13-14 MPa 43
Tabulka 3: porovnání rozdílů průtoku při použití 2 druhů media v CFX s analytickým výpočtem při tlakové diferenci 10-14 MPa 44
Tabulka 4: analytický výpočet v porovnání s výpočtem z CFX pro rozdílné protitlaky 46
Tabulka 5: vliv délky clony na průtok media.....47
Tabulka 6: vliv délky rozšířeného potrubí před clonou 49
Tabulka 7: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 13-14 MPa 51
Tabulka 8: průtok dvojclonou při tlakové diferenci 8-14 MPa 52
Tabulka 9: výstupní tlaky z dvojclony při konstantním průtoku.....53
Tabulka 10: porovnání clon s proměnnými a konstantními průměry při konstantní tlakové diferenci ..54
Tabulka 11: Porovnání analytického výpočtu a hodnot z CFX 58
Tabulka 12: Porovnání tlakových poměrů vypočítaných a zjištěných v CFX (pro proměnné průměry)...59
Tabulka 13: Porovnání hodnot tlaků z CFX pro proměnné a konstantní průměry 59
Tabulka 14: Porovnání tlakových poměrů v dvojcloně v CFX s konstantním a proměnným průměrem..59
Tabulka 15: Porovnání vypočítaných hodnot tlaku v porovnání s CFX (pro proměnné průměry) 63
Tabulka 16: Porovnání tlakových poměrů vypočítaných a zjištěných v CFX (pro proměnné průměry)...63
Tabulka 17: Porovnání hodnot tlaků z CFX pro proměnné a konstantní průměry 64
Tabulka 18: Porovnání tlakových poměrů v trojcloně v CFX s konstantním a proměnným průměrem ..64
Tabulka 19: Výsledky z měření č.1 z 12.4.2016 66
Tabulka 20: První měření s většími průměry clon ze dne 12.4.2016 69
Tabulka 21: porovnání skutečné zkoušky a simulace v CFX.....70
Tabulka 22: Druhé měření se zmenšenými průměry clon z 1.6.2016 70
Tabulka 23: porovnání 2. měření a simulace v CFX 71
Tabulka 24 srovnání průtoku z CFX pro rozdílný obsah vlhkosti páry.....72
Tabulka 25 hodnoty tlaků za jednotlivými clonami v celém mařiči 73

Seznam obrázků

Obrázek 1: ukázka centrické, excentrické a segmentové clony z nabídky indické společnosti Fabri-Tek Equipments Pvt. Ltd. [3] 14

Obrázek 2: řez vícestupňovým mařičem s různou konfigurací jednotlivých clon, 1. a 3. clona centrická, 2. excentrická [5] 15

Obrázek 3: clony s více otvory z produkce dánské společnosti EmcoControls [7] 16

Obrázek 4: reálné provedení mařičů s přírubovým připojením výrobce TM Tecnomatic Srl [2] 17

Obrázek 5: příklad mařiče s navařenými 4 clonami v tělese a s přivařenými připojovacími přírubami, výrobek společnosti Prisma Instruments & Gauge Bourdon France [11] 18

Obrázek 6: vznik trvalé tlakové ztráty na cloně ΔP_P [12] 19

Obrázek 7: inverzní křivka vynesená v p-t diagramu [13] 22

Obrázek 8: kótovaný nákres 1 clony použité v analytickém výpočtu 30

Obrázek 9: ukázka zasíťované dvojclony 38

Obrázek 10: ukazatel parametru angle 39

Obrázek 11: ukazatel parametru determinant 2x2x2 39

Obrázek 12: síť bez mezní vrstvy 40

Obrázek 13: síť s mezní vrstvou 41

Obrázek 14: pohled na základní počítaný element 47

Obrázek 15: maximální délka L_2 48

Obrázek 16: minimální délka L_2 48

Obrázek 17: rozměr x značí rozdílné vzdálenosti mezi clonami. Na obrázku minimální délka oproti maximální počítané délce 50

Obrázek 18: 3D pohled na řešenou trojclonu 53

Obrázek 19: řez dvojclonou s vyznačenými tlaky v jednotlivých úsecích a s rovinami A, B, ve kterých jsou vyhodnocovány referenční tlaky 57

Obrázek 20: Řez rovinou x-y, kde je rozložení celkového tlaku ve dvojcloně 60

Obrázek 21: Rozložení celkového tlaku na průměru D_4 v rovině A, kde je zjišťován tlak p_4 61

Obrázek 22: řez trojclonou s vyznačenými tlaky v jednotlivých úsecích a rovinami A, B,C, ve kterých jsou vyhodnocovány referenční tlaky 62

Obrázek 23: zobrazení rychlostního profilu ve clonách 65

Obrázek 24: Ukázka náhlé změny teploty při průtoku clonami, při adiabatické expanzi ve cloně. Z hlediska inverzní teploty jsme stále pod inverzní křivkou. Proto dochází lokálně ve clonách k náhlému poklesu teploty.....65
Obrázek 25: schéma měřící tratě s vyznačením ventilů 67
Obrázek 26: fotografie měřící tratě 68
Obrázek 27: mařič se šesti clonami 69
Obrázek 28:výkres sestavení úplného mařiče 2POT14638/A.....74