

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T041 Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Mařič energie

Autor: **Tomáš Matějka**

Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc. a konzultantům Ing. Martinu Pulcovi a Ing. Jiřímu Slachovi za cenné rady a poskytnuté materiály. Velký dík patří také Ing. Jiřímu Němečkovi za nezištné rady a mé rodině za podporu při studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Matějka	Jméno Tomáš		
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Uruba,CSc.	Jméno Václav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Výpočet tlakových ztrát v mařiči energie			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76	TEXTOVÁ ČÁST	74	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje analytický výpočet tlakových ztrát na mařiči energie a jeho validaci experimentálními daty. Tento výpočet popisuje průběh parametrů páry v mařiči energie.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	mařič energie, škrcení páry, odvod vodíku, výpočtový model, validace modelu, experiment

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Matějka	Name Tomáš
FIELD OF STUDY	2302T041 „Nuclear Power Equipment Design“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Uruba,CSc.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Pressure loss of a multi-stage restriction orifice	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76	TEXT PART	74	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This master thesis consists of an analytical calculation of pressure loss in a multi-stage restriction orifices and its validation with experimental data. This calculation describes steam parameters in multi-stage restriction orifices.
KEY WORDS	multi-stage restriction orifices, choking of steam hydrogen drain, calculation model, model validation, experiment

Obsah

1	Úvod	1
2	Škrčení tekutin	2
2.1.	Teoretický základ	2
2.1.1.	Stavová rovnice [8]	2
2.1.2.	i-s diagram [1]	3
2.1.3.	Izoentalpický děj [2]	5
2.1.4.	Joule-Thomsonův jev [1], [2]	7
2.1.5.	Rovnice kontinuity [3], [4]	8
2.1.6.	Bernoulliho rovnice [4]	8
2.1.7.	Věta o změně toku hybnosti [5]	8
2.1.8.	Ztrátové součinitele [6]	9
2.1.9.	Průtočné množství [1], [2]	10
2.2.	Vyšlehávání, kavitace	12
2.2.1.	Vyšlehávání [1], [8]	12
2.2.2.	Kavitace [9], [10]	13
2.3.	Pokročilé rovnice	14
2.3.1.	Idelchik – jiné průřezy [12]	15
2.3.2.	Idelchik – stejné průřezy [12]	18
2.3.3.	VDI Heat Atlas - 1. varianta [13]	19
2.3.4.	VDI Heat Atlas – 2. varianta [13]	20
2.3.5.	Roul, Dash [22]	23
2.3.6.	Tlaková ztráta mřížového elementu [12]	26
2.3.7.	S. D. Morris – průtočné množství, jednofázové proudění [29]	27
2.3.8.	S. D. Morris – průtočné množství, dvoufázové proudění [29]	27
3	Technické řešení mařiče energie	31
3.1.	Odvod vodíku z pojišťovacích a odlehčovacích ventilů VVER 1000 a VVER 440 [14]	31
3.1.1.	Vodík v primárním okruhu	31
3.1.2.	Funkce subsystému pro odvod vodíku	31
3.2.	Konstrukce mařiče	33
3.3.	Mařiče energie společnosti Škoda JS, a. s. [15]	33
3.3.1.	Mařič energie pro Jadernou elektrárnu Mochovce	33
3.3.2.	Mařič energie pro Jadernou elektrárnu Temelín	33
3.4.	Mařiče energie jiných společností	33
3.4.1.	Deltafluid [16]	33
3.4.2.	HMA Instrumentation [17]	34
3.4.3.	Seojin [18]	35
3.4.4.	Tecnomatic [19]	35
3.4.5.	WIKA [20]	36
3.4.6.	Baliga [21]	37
3.5.	Materiály pro mařiče energie [24], [25]	37
4	Výpočtový model	38
4.1.	Zkouška mařiče [15]	38
4.1.1.	Plzeňská teplárna, pára, 20. 1. 2015, Mochovce	40
4.1.2.	Plzeňská teplárna, pára, 22. 1. 2015, Mochovce	40
4.1.3.	Plzeňská teplárna, pára, 12. 4. 2016, Temelín	40
4.1.4.	Plzeňská teplárna, pára, 27. 4. 2016, Temelín	41

4.1.5.	Orlík, voda, 13. 11. 2017, Temelín	41
4.2.	Výpočtový model	41
4.2.1.	Idelchik	42
4.2.2.	VDI	43
4.2.3.	Morris	43
4.3.	Zhodnocení výsledků	43
4.3.1.	Idelchik, VDI	43
4.3.2.	Morris	51
4.3.3.	Srovnání metod	55
4.4.	Návrh mařiče energie	56
5	Závěr	58

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbole:

a	[m.s ⁻¹]	rychlost zvuku
A	[m ²]	průtočná plocha
A _{skut}	[m ²]	skutečná průtočná plocha v oblasti „vena contracta“
c _{i,e}	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění před a za clonou
c _p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c _{pi,e}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku před a za clonou
C _i	[-]	index kavitace
d	[m]	průměr
d _{skut}	[m]	skutečný průměr proudu v oblasti „vena contracta“
D _{1,2}	[m]	průměr otvoru
F _{1,2}	[N]	síla
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
h	[kJ.kg ⁻¹]	měrná entalpie
h'	[kJ.kg ⁻¹]	měrná entalpie syté kapaliny
h''	[kJ.kg ⁻¹]	měrná entalpie syté páry
i	[J.kg ⁻¹]	měrná entalpie
i _{i,e}	[J.kg ⁻¹]	entalpie před a za clonou
k _{JT}	[-]	Joule-Thomsonův koeficient
K	[-]	konstanta
m	[kg]	hmotnost
m'	[kg]	hmotnost kapaliny v mokré páře
m''	[kg]	hmotnost páry v mokré páře
ṁ _{1,2}	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní průtok
ṁ _{skut}	[kg.s ⁻¹]	skutečný hmotnostní průtok
Ma	[-]	Machovo číslo

n	[-]	polytropický koeficient
$p_{1,2}$	[Pa]	tlak
p_c	[Pa]	celkový tlak
p_k	[Pa]	kritický tlak
p_{2t}	[Pa]	teoretický tlak
r	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	individuální plynová konstanta
s	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	entropie
s'	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	entropie syté kapaliny
s''	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	entropie syté páry
$S_{1,2}$	[m ²]	průtočný průřez
S_s	[m ²]	průtočný průřez otvoru ve clonce
T	[K]	teplota
$T_{i,e}$	[K]	teplota před a za clonou
v'	[m ³ .kg ⁻¹]	měrný objem syté kapaliny
v''	[m ³ .kg ⁻¹]	měrný objem syté páry
$v_{1,2}$	[m ³ .kg ⁻¹]	měrný objem
$w_{1,2}$	[m.s ⁻¹]	rychlost média
w_k	[m.s ⁻¹]	kritická rychlost
β^*	[-]	kritický tlakový poměr
Δ	[-]	rozdíl
κ	[-]	Poissonova konstanta
μ	[-]	koeficient kontrakce, zúžení
ξ	[-]	koeficient tlakové ztráty
π	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho_{1,2}$	[kg.m ⁻³]	hustota

Zkratky:

ŠJS	Škoda JS, a. s.
CFD	Computational Fluid Dynamics
EMO	Jaderná elektrárna Mochovce
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou mařiče energie. Tato zařízení jsou navržena tak, aby jako součást potrubní sítě snížila tlak média při udržení požadovaného průtoku. Mařiče energie jsou konstruovány jako soustavy škrťících clon.

Cílem práce je sestavit analyticko-empirický výpočtový model v softwaru Microsoft Excel a ten následně validovat pomocí hodnot naměřených na dvou skutečných mařičích energie, které jsou v současnosti nainstalovány na jaderných elektrárnách Temelín a Mochovce jako součásti systému kompenzace objemu v primárním okruhu.

Pasivní zařízení pro snížení tlaku by mohlo teoreticky být navrženo pouze jako jedna clona, ovšem v těchto (a jiných) konkrétních případech je požadavek na snížení tlaku tak velký, že použití jednostupňového škrcení je nevhodné kvůli nutnosti použití clonky s příliš malým otvorem, která by se tak mohla ucpávat, nebo by mohlo docházet k pro praktickou aplikaci příliš rychlému opotřebení vyšleháváním.

Z těchto důvodů se tedy používají vícestupňové soustavy clonek. Návrhové výpočty průměrů otvorů ve clonkách jsou podle metodiky firmy Škoda JS, a. s. zatím prováděny iteračními analytickými výpočty, které však nedosahují dostatečné přesnosti a je tak nutno každý mařič proměřit, což přináší dodatečné náklady, které by sestavením vhodného validovaného výpočtu odpadly.

Výpočet bude obsahovat možnost volby parametrů média na vstupu, geometrie mařiče (počet clonek, velikost jejich otvorů, tloušťka) a průtoku média. Výstupem výpočtu pak budou parametry média za jednotlivými stupni i na výstupu z mařiče a výpočet tlakové ztráty na jednotlivých clonkách.

2 Škrčení tekutin

Problematicke škrtících clon (popřípadě soustav škrtících clon) se věnuje několik autorů, v následujícím oddíle budou popsány fyzikální rovnice, které se týkají tématu a zároveň rozebrány a zhodnoceny různé přístupy z hlediska sestavení matematického modelu pro v této práci diskutované mařiče energie.

2.1. Teoretický základ

Princip škrcení tekutin je obecně popisován jako děj, při němž dochází k tlakové ztrátě proudící tekutiny a nárůstu její entropie, aniž by byla konána nebo přiváděna práce. Tlaková ztráta je konsekvencí vnitřního tření a víření tekutiny, k němuž dochází v důsledku prudkého snížení a následného zvýšení průtočného průřezu na velmi krátkém úseku. Prakticky je této konstelace dosaženo například vloženou clonou. V následující části jsou popsány základní a z velké části idealizované vztahy pro výpočet škrcení tekutin a dějů, které se vztahují k problematice diskutovaných mařiče energie.

2.1.1. Stavová rovnice [8]

Jednou ze základních rovnic pro popsání stavu plynného média je stavová rovnice ideálního plynu. Vyjadřuje vztah tří základních veličin – tlaku, teploty a měrného objemu (potažmo hustoty).

$$pv = rT \quad 2.1$$

Z rovnice ideálního plynu dále vycházejí rovnice pro různé děje, kterými může médium procházet. Nejobecnějším dějem je děj polytropický, jenž je vyjádřen rovnicí 2.2.

$$pv^n = k. \quad 2.2$$

Jedním z těchto dějů je děj adiabatický (2.3), což je speciální případ polytropického děje, kdy se polytropický koeficient n rovná Poissonově konstantě κ konkrétního plynu. Adiabatický děj je charakteristický tím, že mezi termodynamickou soustavou a okolím neprobíhá výměna tepla.

$$pv^\kappa = k. \quad 2.3$$

Pro přechod mezi stavem 1 a 2 tedy platí výraz 2.4.

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa \quad 2.4$$

Rovnice 2.1 pro dva stavy média lze mezi sebou vydělit, čímž vznikne rovnice 2.5.

$$\frac{p_1 v_1}{p_2 v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad 2.5$$

Vyjádřením poměru tlaků z 2.4 a jeho dosazením do 2.5 získáme rovnici pro poměr teplot v závislosti na poměru měrných objemů.

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_1}{T_2} \quad 2.6$$

Další úpravou pak poměr teplot dáme do souvislosti s tlaky.

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_1}{T_2} \quad 2.7$$

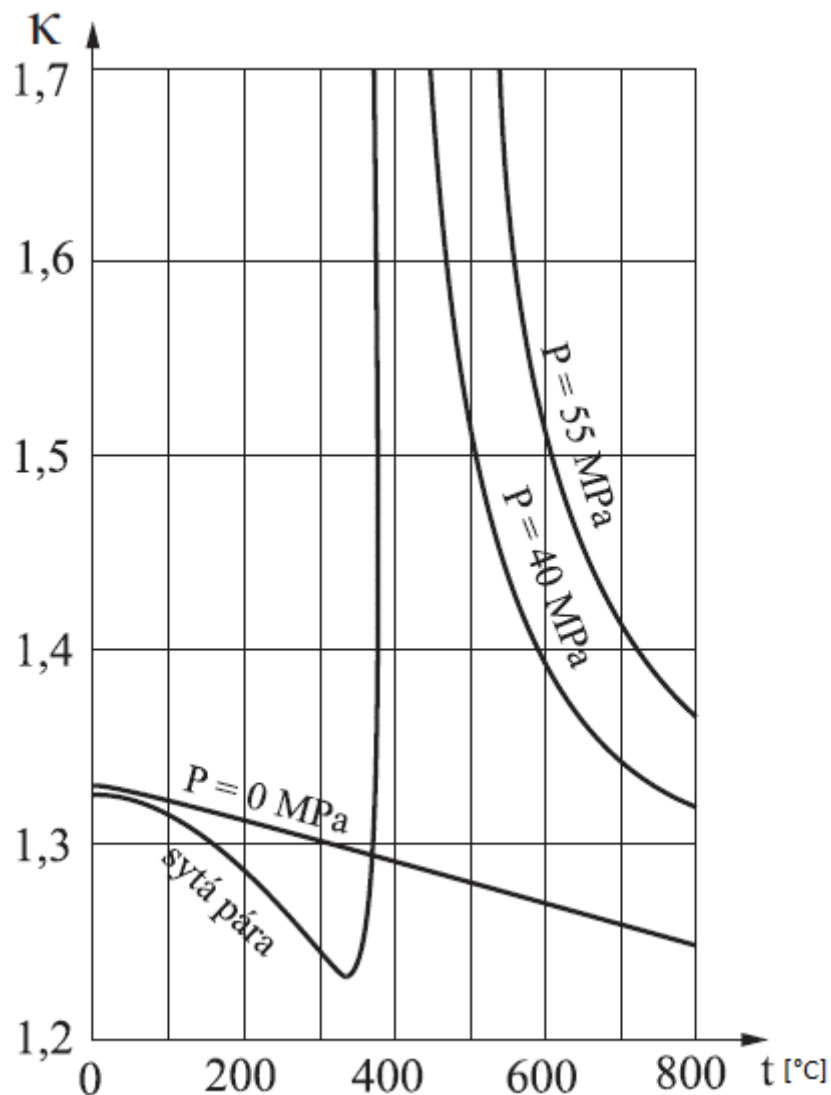
Poissonova konstanta je pro ideální plyn definována jako poměr izobarické a izochorické měrné tepelné kapacity.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad 2.8$$

Skutečná definice Poissonovy konstanty pro reálný plyn je však definována takto.

$$\kappa = -\frac{v \delta p}{p \delta v} \quad 2.9$$

Hodnoty jak izobarické, tak izochorické měrné tepelné kapacity jsou v případě reálného plynu (v našem případě syté páry) závislé na tlaku a teplotě, což má velký vliv na hodnotu κ . Tato závislost je dobře patrná z grafu 2-1.



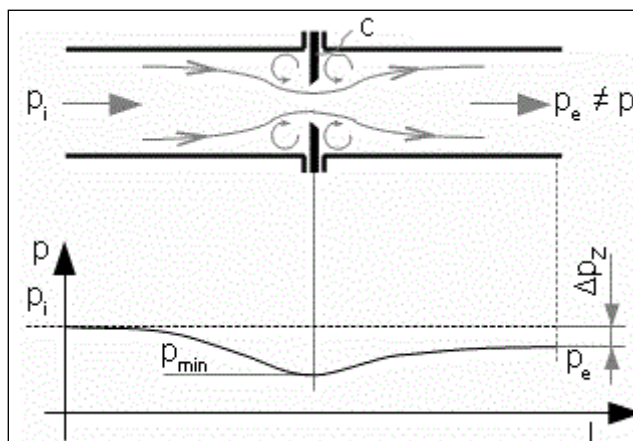
Graf 2-1 - závislost na teplotě a tlaku [8]

2.1.2. i-s diagram [1]

Škrcení tekutin je charakterizováno jako izoentalpický děj. V oblastech před i za clonou dochází k zavíráním tekutiny. V těchto vírech proudí tekutina jinou rychlostí než hlavní

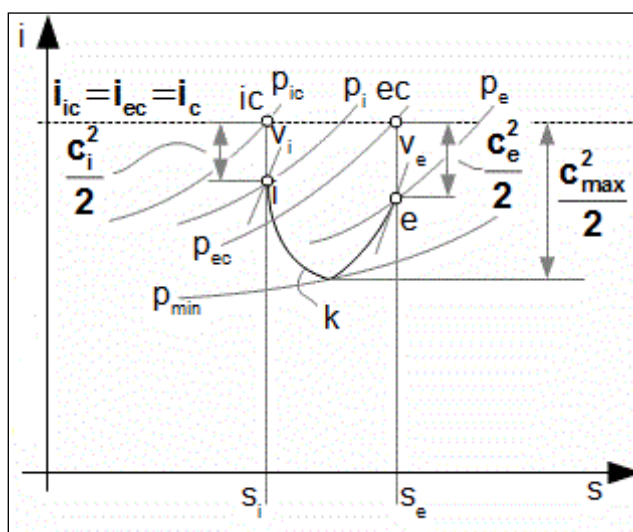
proud, v důsledku čehož má i jinou teplotu a dochází proto ke sdílení tepla v rámci tekutiny. Tím dochází k nárůstu entropie tekutiny a v konečném důsledku ke snížení tlaku za clonou.

Průběh statického tlaku v oblasti škrticí clony je patrný na obrázku 2-1. V důsledku zvýšení rychlosti statický tlak před clonou klesá a v nejužším místě clony dosahuje svého minima, rychlost proudění v tomto místě stoupá na své maximum. Za clonou se zvětšuje průtočný průřez, dochází ke zpomalení proudu, a tedy k růstu statického tlaku a jeho ustálení na konečné hodnotě, která je menší než hodnota vstupního tlaku.



Obrázek 2-1 - škrcení tekutiny na cloně a průběh statického tlaku [1]

Na obrázku 2-2 je křivkou k znázorněn proces škrcení v i - s diagramu. Počáteční statická měrná entalpie nejdříve vlivem velkého urychlení klesá z bodu i do bodu, kde se k protíná s p_{min} , aby pak opět vystoupala na svoji konečnou hodnotu, jež je znázorněna bodem e . Konečný rozdíl mezi statickými měrnými entalpiemi v bodech i a e je pak dán energií, jež se přemění na výstupní rychlost a rychlost víření, jak ilustruje vztah 2.10. Tyto rychlosti jsou však v praxi často zanedbatelné.

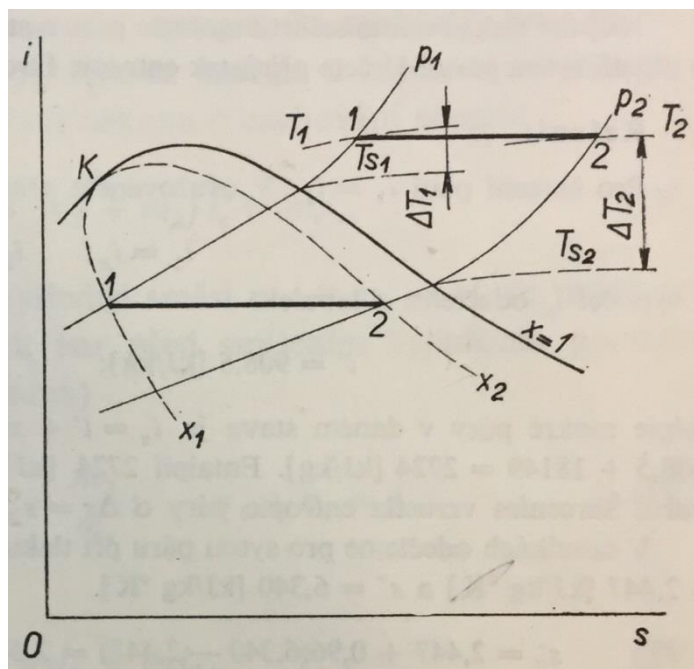


Obrázek 2-2 - i - s diagram škrcení [1]

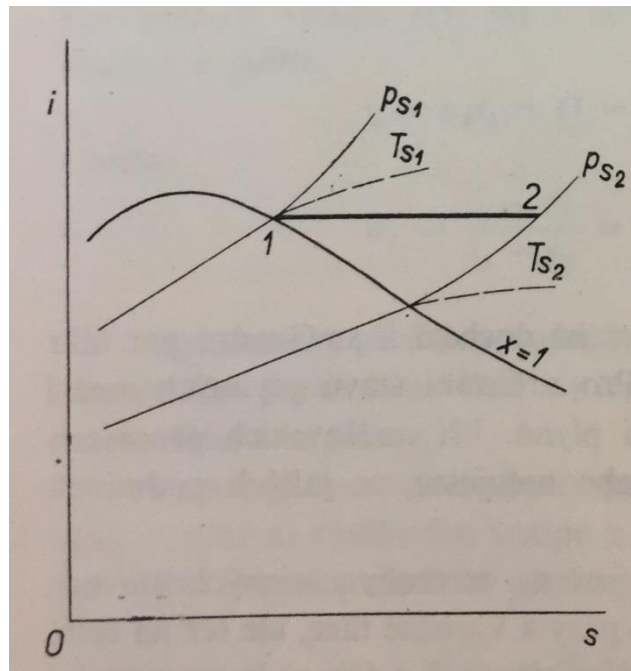
$$i_i + \frac{c_i^2}{2} = i_e + \frac{c_e^2}{2} \quad 2.10$$

2.1.3. Izoentalpický děj [2]

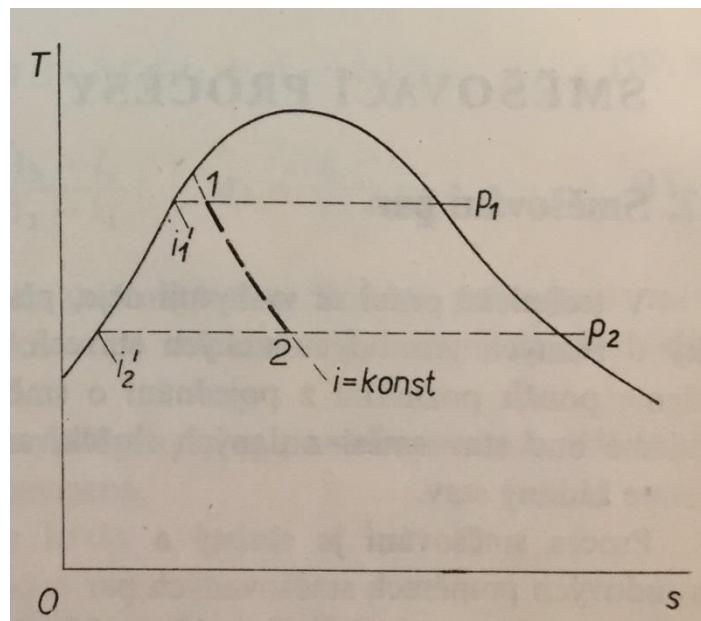
Jak již bylo řečeno, na škrcení tekutin je obecně nahlíženo jako na izoentalpický děj. Ten často probíhá za změny stavu tekutiny z plynného na kapalný nebo naopak. V případě páry se pak jedná o přechody mezi přehřátou a mokrou párou. Tyto změny stavu závisí na výchozím stavu páry před škrcením. Mokrá pára o nižších tlacích (Obrázek 2-3) přichází škrcením do stavu větší suchosti případně až do oblasti přehřáté páry. Sytá pára o vysokém tlaku (v i - s diagramu na pravé mezní křivce o entalpii větší než entalpie kritického bodu) se škrcením dostává do oblasti mokré páry, pokračuje-li škrcení dál, pára se vysušuje a může přejít opět až do stavu přehřáté páry. Škrcením zároveň klesá teplota, a to i například v oblasti přehřáté páry. Páře v této oblasti sice klesá tlak i teplota, ale stoupá její přehřátí (Obrázek 2-3). Je-li škrcena sytá kapalina, klesá její tlak a kondenzuje.



Obrázek 2-3 – škrcení mokré a přehřáté páry v i - s diagramu [2]



Obrázek 2-4 - škrcení syté páry v i - s diagramu [2]



Obrázek 2-5 – škrcení mokré páry v T - s diagramu [2]

V oblasti mokré páry hraje roli suchost. Ta je definována jako podíl hmotnosti páry ku celkové hmotnosti média.

$$x = \frac{m''}{m' + m''} \quad 2.11$$

Se suchostí páry se mění i její měrný objem, entalpie a entropie.

$$v = v' + x(v'' - v') \quad 2.12$$

$$h = h' + x(h'' - h') \quad 2.13$$

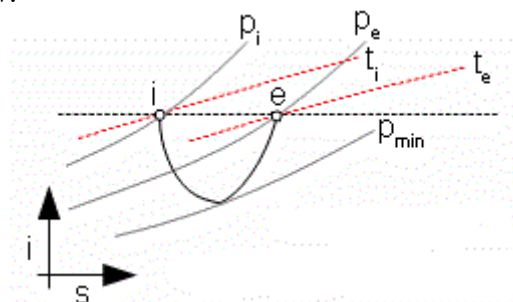
$$s = s' + x(s'' - s') \quad 2.14$$

Důležitým závěrem pro sestavení výpočtového modelu mařiče energie je tedy to, že pára může částečně kondenzovat a v mařiči se tak vyskytuje dvoufázové proudění.

2.1.4. Joule-Thomsonův jev [1], [2]

Škrčení ideálního plynu je idealizováno jako děj, na jehož počátku i konci má plyn stejnou entalpii, zároveň tedy platí, že i teplota na počátku a na konci děje je stejná. Při reálném škrčení se však teplota plynu změní. Tato změna je dána změnou měrné tepelné kapacity, jež při uvažování reálného plynu nezůstává konstantní, ale je funkcí teploty a tlaku.

Při škrčení páry při zachování konstantní entalpie dochází ke snižování její teploty, jak je ilustrováno na obrázku 2-6. Existují ovšem oblasti, kde dochází k opačnému jevu, tedy že se teplota páry zvyšuje. Tyto dvě oblasti má každý reálný plyn a jsou rozděleny inverzní křivkou. Na této křivce se pak plyn chová jako ideální. Tento jev je po svých objevitelích nazýván Joule-Thomsonův.



Obrázek 2-6 - i-s diagram škrčení reálného plynu [1]

Z předpokladu stejné hodnoty entalpie vyplývá následující rovnost. Pro přehlednost je zanedbán vliv rychlosti média.

$$i = c_{pi}T_i = c_{pe}T_e \quad 2.15$$

Za předpokladu, že je měrná tepelná kapacita funkcí teploty a tlaku, musí platit, že se v průběhu děje mění. Platí tedy dále, že ani počáteční a koncová teploty si nejsou rovny.

$$c_p = f(T, p) \Rightarrow c_{pi} \neq c_{pe} \Rightarrow T_i \neq T_e \quad 2.16$$

Joule-Thomsonův efekt je vyjádřen Joule-Thomsonovým součinitelem k_{JT} . Je-li jeho hodnota kladná, teplota plynu při škrčení stoupá, při jeho záporné hodnotě teplota při škrčení naopak poklesne.

$$k_{JT} = \frac{\Delta T}{\Delta p} \quad 2.17$$

V hranicích parametrů, ve kterých se pára pohybuje v případě této diplomové práce, je hodnota Joule-Thomsonova součinitele záporná, tedy teplota páry při škrčení klesá.

2.1.5. Rovnice kontinuity [3], [4]

V otvoru škrtkící clony dojde k urychlení proudící tekutiny, hmotnostní průtok je totiž zachován před i za clonou, což vychází z rovnice kontinuity. Zde je uvedena nejdříve v diferenciálním tvaru pro jednodimenzionální stlačitelné proudění.

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{wdw}{g} = 0 \quad 2.18$$

Pro izoentropický proces ideálního plynu uvažujeme:

$$p = K\rho^\kappa \quad 2.19$$

Tento předpoklad zdiferencujeme:

$$dp = K\kappa\rho^{\kappa-1}d\rho \quad 2.20$$

Tento výraz pak dosadíme do rovnice 2.18, kterou integrujeme a dostáváme konečný výraz:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} = \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2}\right) \quad 2.21$$

Rovnice kontinuity je zde uvedena také ve zjednodušeném tvaru pro stacionární proudění stlačitelné tekutiny, z něhož je nejvíce patrná rovnost hmotnostních průtoků a to, jak změna průtočného průřezu ovlivní rychlost tekutiny.

$$\dot{m} = \rho_1 S_1 w_1 = \rho_2 S_2 w_2 \quad 2.22$$

2.1.6. Bernoulliho rovnice [4]

Výše zmíněné úvahy o vztahu statického tlaku a rychlosti proudění vycházejí z Bernoulliho rovnice, která je uvedena v tlakovém tvaru se zanedbáním vlivu změny hydrostatického tlaku, což si vzhledem k nulovému výškovému rozdílu můžeme dovolit:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho w_1^2 = p_c \quad 2.23$$

Z této rovnice je vidět, že stoupá-li rychlost, musí pro zachování celkového konstantního tlaku klesat statický tlak a naopak. Tato rovnice sice neuvažuje tepelné ztráty (nárůst entropie tekutiny), ale dobře ilustruje mechanismus vztahu rychlosti média a jeho statického tlaku.

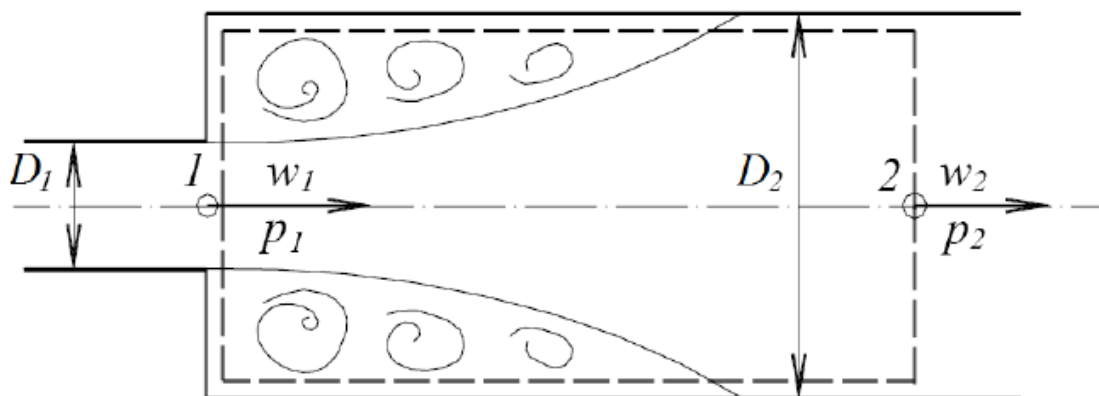
2.1.7. Věta o změně toku hybnosti [5]

Věta o změně toku hybnosti vyjadřuje rovnost síly proudu tekutiny působící na kontrolní objem se změnou hybnostního toku tímto kontrolním objemem protékajícím. Pro tuto konkrétní aplikaci je pak nejvhodnějším tvarem rovnice 2.24.

$$\dot{m}_1 w_1 - \dot{m}_2 w_2 = F_1 - F_2 \quad 2.24$$

2.1.8. Ztrátové součinitele [6]

Jedním z mála ztrátových součinitelů potrubních prvků, jež lze určit analyticky, je ztrátový součinitel náhlého rozšíření průřezu kanálu. Uvažovaný mařič energie má nezanedbatelnou tloušťku stěny škrťící clony. Pokud bychom zúžení ve cloně uvažovali jako velmi krátké potrubí, můžeme pomocí Bernoulliho rovnice, větě o změně toku hybnosti a rovnice kontinuity tento ztrátový součinitel pro náhlé rozšíření průřezu analyticky odvodit. Na obrázku 2-7 je znázorněno schéma tohoto problému. Šrafovanou linií je vyznačen kontrolní objem.



Obrázek 2-7 - schéma náhlého rozšíření proudu [6]

Z věty o změně toku hybnosti, jež uvažuje ztráty, nejdříve určíme skutečný tlak za rozšířením.

$$p_2 S_2 - p_1 S_2 = \rho S_1 w_1^2 - \rho S_2 w_2^2 \quad 2.25$$

Tedy

$$p_2 = \rho \frac{S_1}{S_2} w_1^2 - \rho w_2^2 + p_1 \quad 2.26$$

Dosažením rovnice kontinuity pro nestlačitelné proudění pak dostaneme vztah pro výpočet skutečného tlaku.

$$p_2 = \rho w_1^2 \left[\frac{S_1}{S_2} - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \right] + p_1 \quad 2.27$$

Z Bernoulliho rovnice, jež oproti větě o změně toku hybnosti ztráty neuvažuje, určíme teoretický tlak za rozšířením.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = \frac{p_{2t}}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} \quad 2.28$$

Opět dosadíme rovnici kontinuity pro nestlačitelné proudění a po úpravě dostáváme rovnici pro teoretický tlak za rozšířením.

$$p_{2t} = p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \right] \quad 2.29$$

Tlakovou ztrátu definujeme jako rozdíl skutečného a teoretického tlaku za rozšířením.

$$\Delta p = p_{2t} - p_2 \quad 2.30$$

Uvažované části mařiče jsou kruhového průřezu, můžeme tedy dosadit

$$S_{1/2} = \pi \frac{D_{1/2}^2}{4} \quad 2.31$$

Dosazením vypočtených hodnot tlaků a vztahu pro výpočet průřezu kruhové části maříče dostáváme

$$\Delta p = \frac{\rho w_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{D_1^2}{D_2^2} \right) \right]^2 \quad 2.32$$

Z posledního vztahu plyne, že ztrátový součinitel pro náhlé rozšíření proudu je

$$\xi = \left[1 - \left(\frac{D_1^2}{D_2^2} \right) \right]^2 \quad 2.33$$

Další ztrátové součinitele jsou často výsledkem analyticko-empirických výpočtů, jež jsou založeny na experimentálních výsledcích a jsou popsány v dalších kapitolách.

Obecně lze tedy ztrátový součinitel použít pro zjištění tlakové ztráty v souvislosti s hustotou média a jeho rychlostí.

$$\Delta p = \xi \frac{w^2}{2} \rho \quad 2.34$$

Různé zdroje pro ztrátový koeficient používají různé značení (například ζ , ξ , f atd.). Při rozboru jednotlivých zdrojů je zachováno původní značení a symboly jsou v každé podkapitole vysvětleny.

2.1.9. Průtočné množství [1], [2]

S tlakovou ztrátou úzce souvisí také hmotnostní průtok clonkou. Pro možné použití tohoto výpočtu průtoku je uvažováno izoentropické proudění. Úvodní vztah pro další úvahy vychází z rovnice kontinuity:

$$\dot{m} = A w \frac{1}{v_2} \quad 2.35$$

Výtokovou rychlost při izoentropickém proudění spočítáme takto:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} + w_1^2 \quad 2.36$$

Ze vztahu pro adiabatický děj vyjádříme měrný objem:

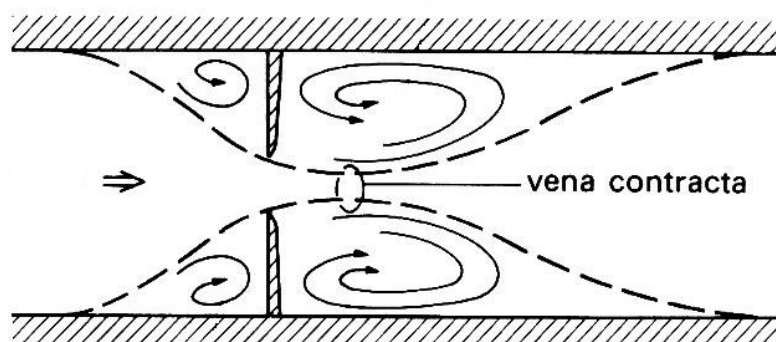
$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad 2.37$$

Otvory v uvažovaných clonách mají kruhový průřez, takže průtočnou plochu můžeme vyjádřit analogicky rovnicí 2.31.

Vztahy pro výtokovou rychlost, měrný objem a průtočnou plochu dosadíme do rovnice kontinuity a upravíme.

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad 2.38$$

Hmotnostní průtok je snižován v důsledku kontrakce proudu za nejužším místem clonky (tzv. „vena contracta“ - Obrázek 2-8). Toto zúžení je způsobeno setrvačností proudu.



Obrázek 2-8 - vena contracta [7]

Součinitel průtoku je pak vyjádřen jako poměr skutečného a izoentropického průtoku nebo jako poměr plochy proudu za otvorem a plochy otvoru.

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{skut}} = \frac{A}{A_{skut}} = \frac{d^2}{d_{skut}^2} \quad 2.39$$

Zakomponováním tohoto kontrakčního součinitele dostáváme vztah pro skutečný průtok clonou.

$$\dot{m}_{skut} = \mu \dot{m} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad 2.40$$

V případě kritického proudění hmotnostní průtok nezávisí na výstupním tlaku a vzorec pro něj nabývá tohoto tvaru.

$$\dot{m}_{skut} = \mu \dot{m} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} \rho_1 p_1} \quad 2.41$$

Vzorce pro výpočet kontrakčního součinitele se liší podle zdrojů. Obecně lze říci, že závisí na geometrii otvoru a zároveň na Reynoldsově čísle média. Jeho hodnota pro kruhové otvory se obvykle pohybuje mezi 0,600 a 0,642. Ve zdroji [27] je pro jeho výpočet uvedena empirická rovnice

$$\mu = 0,6543e^{-4,8Dh} \quad 2.42$$

Kontrakční součinitel také závisí na excentricitě otvoru ve clonce. Hodnota součinitele pro excentricky uložený otvor μ_n je podle [28] dána rovnicí 2.43.

$$\mu_n = \mu \left[1 + 0,641 \left(\frac{S}{S_s} \right)^2 \right] \quad 2.43$$

Podle [12] je pak kontrakční součinitel závislý jen na ztrátovém součiniteli clony.

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad 2.44$$

Další vzorce jsou pak například 2.67, 2.68 a 2.87.

2.2. Vyšlehávání, kavitace

Vyšlehávání a kavitace jsou důvody, proč jsou mařiče energie vyráběny jako vícestupňové škrťící clony. Fenomén vyšlehávání se objevuje u plyných fází, kavitace je pak jevem, jenž je pozorován u kapalných médií. Největším problémem, který tyto jevy způsobují, je zvětšování průměru otvoru ve cloně, což zhoršuje škrťící schopnost komponenty a nepřijatelnou měrou se mění průtočné množství. V návaznosti na to je další negativní stránkou těchto jevů snižování životnosti škrťících clon, dále může být například zvýšena hlučnost zařízení. V této části jsou uvedeny vztahy, jež souvisí s problematikou těchto dvou fenoménů a mohou pomoci k jejich pochopení.

2.2.1. Vyšlehávání [1], [8]

V následujících úvahách, není-li uvedeno jinak, je uvažováno předpokladu adiabatického děje. V případě mařičů energie pro plyná média je potřeba předcházet vyšlehávání. To je způsobeno rázovými vlnami, jež ničí materiál škrťící clony a snižují tím její životnost. Tyto rázové vlny se tvoří, přesáhne-li proudící médium rychlost zvuku. Rychlost zvuku závisí nejen na sledovaném médiu, ale také na teplotě.

$$a = \sqrt{\kappa r T} \quad 2.45$$

Rychlost média s přihlédnutím k jeho teplotě je tak znázorněna bezrozměrným Machovým číslem. Je-li dosaženo rychlosti zvuku, je Machovo číslo rovno 1.

$$Ma = \frac{w}{a} \quad 2.46$$

Machovo číslo figuruje například v Hugoniotově teorému. Ten dává do souvislosti rychlost média, průtočný průřez a rychlost zvuku. Tento teorém vychází z rovnice kontinuity a prvního termodynamického zákona.

$$\frac{dw}{w} (1 - Ma^2) + \frac{dS}{S} = 0 \quad 2.47$$

V případě podzvukového proudění (tedy $Ma < 1$) má zmenšení průtočného průřezu za následek zvýšení rychlosti média. Tímto způsobem se médium může dostat až na rychlost zvuku (tedy $Ma = 1$). V bodě dosáhnutí rychlosti zvuku však dochází k obratu a s dále se zmenšujícím se průřezem rychlost naopak klesá. Teoreticky by při dosažení rychlosti zvuku a následném zachování průtočného průřezu bylo možno zachovat rychlost zvuku například v nekonečně dlouhé trubici o konstantním průřezu. Prakticky je tomu však zamezeno třecími ztrátami. Pokud se však v bodě dosáhnutí rychlosti zvuku začne průtočný průřez opět zvětšovat, pokračuje také zvyšování rychlosti. Rychlost zvuku lze naformulovat také jako kritickou rychlost v nejužším průřezu.

$$w_k = \sqrt{2 \frac{\kappa r T_1}{\kappa + 1} + w_1^2 \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \right)} \quad 2.48$$

$$w_k = a \quad 2.49$$

Dosadíme-li rovnice 2.48 a 2.45 do předpokladu 2.49 dostaneme po několika matematických úpravách rovnici pro kritický tlakový spád 2.50. V aplikaci pro mařiče energie se snažíme jej nedosáhnout.

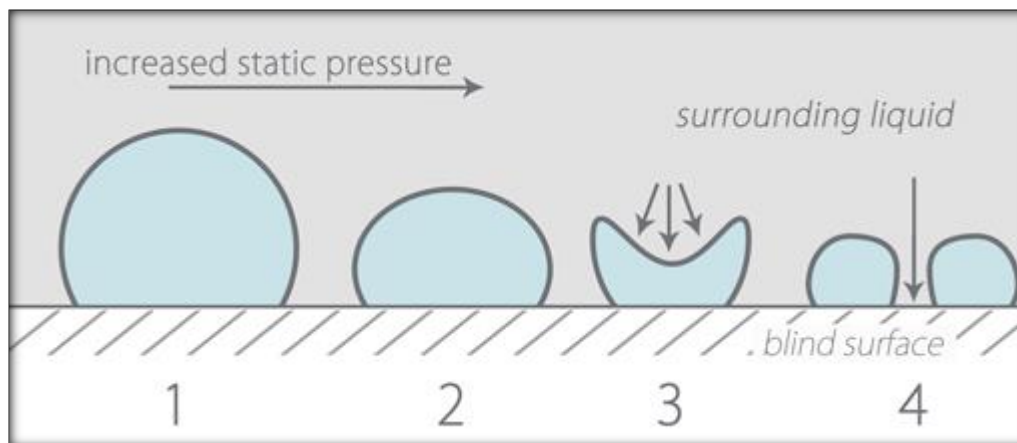
$$\beta^* = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad 2.50$$

V matematickém modelu, který je součástí této práce, je tedy obsažena kontrola jednotlivých clon na kritický tlakový spád. Jak bylo potvrzeno z výše zmíněných rovnic a úvah, dochází k vyšlehávání v důsledku příliš velkého rozdílu tlaků před a za jednotlivými clonami. Mařič energie je tedy třeba navrhnout tak, aby k celkovému požadovanému rozdílu tlaků docházelo ne na jedné cloně s malým průtočným průřezem, ale postupně na několika clonách s většími průtočnými průřezy, jež jsou poskládány za sebe.

2.2.2. Kavítace [9], [10]

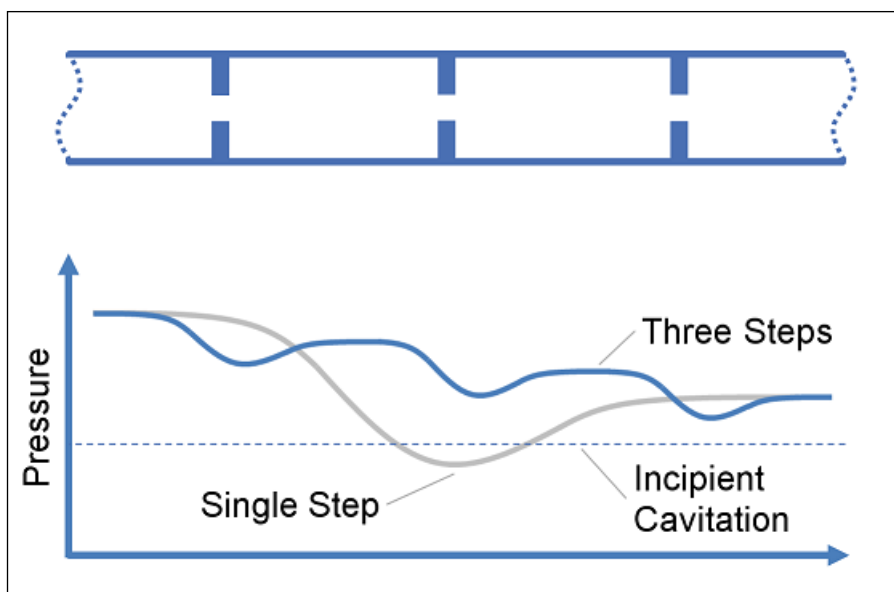
Ke kavítaci dochází obecně v kapalinách. Pro tuto diplomovou práci je pak tedy důležité, že k nim může docházet i na škrťicích clonách používaných ve vodních potrubních systémech. Odstavec 2.2.2 pojednává o tzv. kolabující kavítaci.

Tento jev nastává v důsledku prudkého poklesu tlaku při urychlení média, jehož je na škrťicí cloně dosahováno. Pokud tlak klesne až pod tlak nasycených par, jenž odpovídá teplotě média, dochází lokálně k odpařování kapaliny a tvorbě velmi malých bublinek páry. Ty jsou proudící kapalinou unášeny do oblastí s vyšším tlakem. Do těchto bublinek velkou rychlostí proniká okolní kapalina, dělí je na dvě části a následně za velké teploty naráží na povrch clony. To vytvoří rázovou vlnu, která značně namáhá materiál clony. Teplota v místě dopadu tekutiny na povrch může činit až tisíce stupňů Celsia. Tento mechanismus je znázorněn na obrázku 2-9.



Obrázek 2-9 - mechanismus kolabující kavítace [11]

Cílem je tedy navrhnout clonu tak, aby bylo dosaženo poklesu tlaku, ale ne tak prudkého, aby docházelo ke kavítaci ve velké míře. I když se nám povede snížit celkový tlakový spád, nelze zaručit, že nebude docházet k lokálním výkyvům tlaku a bude tak na velmi malé ploše dosahováno menšího tlaku, než je tlak nasycených par. Není-li dosažený tlakový spád na jedné cloně dostatečný, je potřeba použít mařič energie. Porovnání použití jedné clony a mařiče o třech clonách je naznačeno na obrázku 2-10, kde modrá čára zobrazuje průběh tlaku v mařiči, šedá na cloně a přerušovaná čára je hranicí tlaku, nad níž kavítace neprobíhá.



Obrázek 2-10 - porovnání jedno- a vícešupňového mařiče [10]

Pro odhadnutí toho, zda se na cloně vyskytne kavitace, se používá index kavitace 2.51. Je to bezrozměrné číslo, jehož hodnota udává pravděpodobnost vzniku kavitace. Prakticky se má za to, že je-li hodnota tohoto indexu rovna dvěma nebo více, je riziko vzniku kavitace malé, a pokud je jeho hodnota menší než dva, je naopak toto riziko vysoké.

$$C_i = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} \quad 2.51$$

kde:

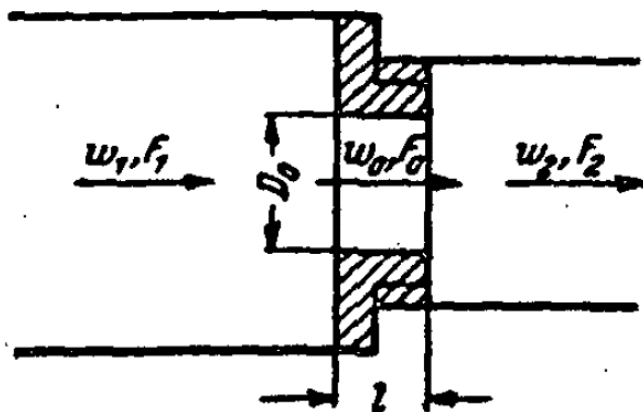
p_1	[Pa]	vstupní tlak
p_2	[Pa]	výstupní tlak
p_v	[Pa]	tlak nasycených par

2.3. Pokročilé rovnice

V následujících odstavcích jsou popsány různé přístupy k problematice tlakových ztrát na škrťacích clonách s nezanedbatelnou tloušťkou stěny a pro výpočet průtočného množství. Ve výpočetní části práce je pak uvedeno srovnání jednotlivých výpočtů s experimentem a výběr toho, který experimentu s největší přesností odpovídá. V předchozích odstavcích uvedené analytické přístupy často uvažují idealizované koncepty výpočtů, a proto jsou v praxi jen omezeně použitelné. Pro průmyslové použití je tedy vhodnější využít analyticko-empirické rovnice. V následujících odstavcích jsou v některých případech pro stejné veličiny používány jiné symboly z důvodu odlišných značení těchto veličin v různých zdrojích. Značení je v každé podkapitole popsáno u těch veličin, jež se liší od svých ekvivalentů v Seznamu symbolů a použitých zkratk (viz úvod práce).

2.3.1. Idelchik – jiné průřezy [12]

V tomto zdroji je uváděna rovnice pro výpočet ztrátového součinitele pro škrťací clonu s nezanedbatelnou tloušťkou pro proudění směřující z přívodní části jiného průřezu než části vývodní. Dle definice je ztrátový koeficient vyjádřen rovnicí 2.52. Určující rychlost w_0 je tedy rychlostí ve cloně. Tento koeficient je pak zároveň vyjádřen přes geometrické parametry clony rovnicí 2.53.



Obrázek 2-11 - schéma clony s nezanedbatelnou tloušťkou a jinými průřezy přívodního a vývodního potrubí [12]

Hranice nezanedbatelnosti šířky clony je dána rovnicí 2.54. Poslední člen rovnice 2.53 z důvodu nezanedbatelné tloušťky clony používá také ztrátový součinitel drsnosti potrubí. Jeho závislost na Reynoldsově čísle je znázorněna v grafu 2-2 a 2-3. Tato závislost platí pro Reynoldsova čísla větší než 4000. Charakteristickým rozměrem pro určení Reynoldsova čísla je zde průměr otvoru ve cloně. Funkční závislost koeficientu τ na poměru tloušťky clony a hydraulického průměru otvoru clony je znázorněna v grafu 2-4.

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho w_0^2} \quad 2.52$$

$$\zeta \cong 0,5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0,375} \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right) + \lambda \frac{l}{D_h} \quad 2.53$$

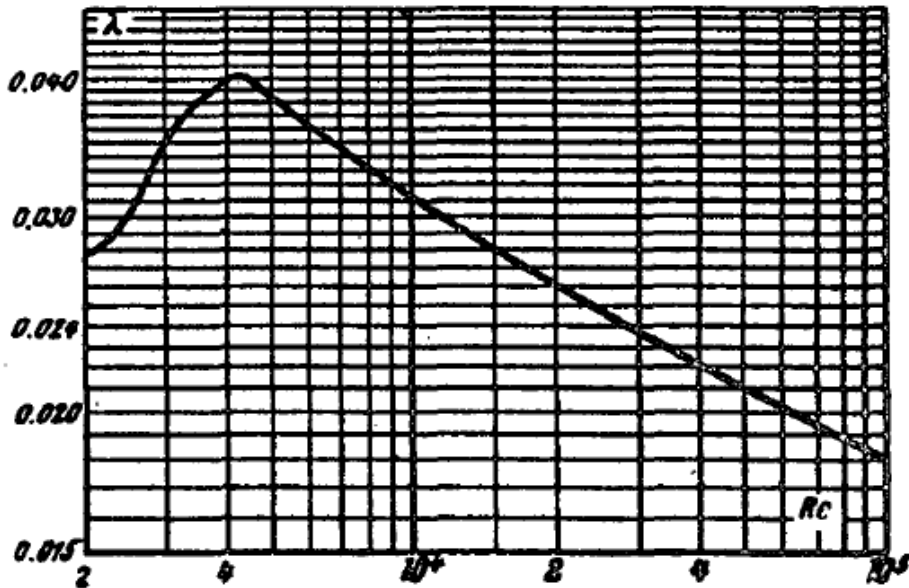
$$\bar{l} \equiv \frac{l}{D_h} > 0,015 \quad 2.54$$

$$\tau = f\left(\frac{l}{D_h}\right) = (2,4 - \bar{l})10^{-\varphi} \quad 2.55$$

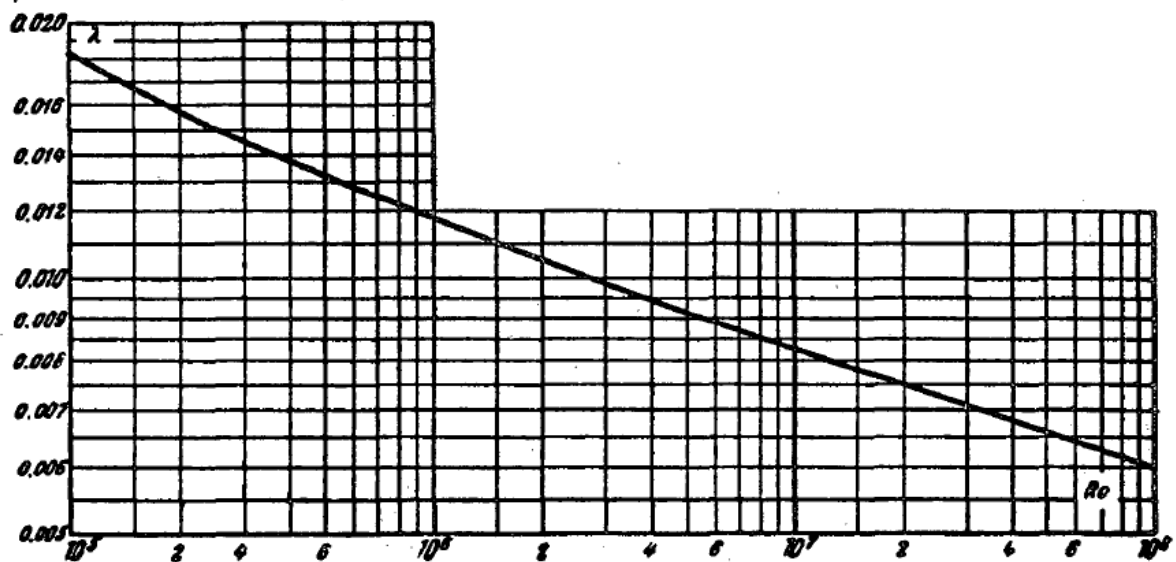
$$\varphi(\bar{l}) = 0,25 + \frac{0,535\bar{l}^8}{0,05 + \bar{l}^8} \quad 2.56$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8\log(Re) - 1,64)^2} \quad 2.57$$

$$Re = \frac{w_0 D_h}{\nu} \quad 2.58$$



Graf 2-2 - závislost λ na Re [12]



Graf 2-3 - závislost λ na Re [12]

l/D_h	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
τ	1,35	1,22	1,10	0,84	0,42	0,24	0,16	0,07	0,07	0,00

Tabulka 2-1 - závislost τ na l/D_h

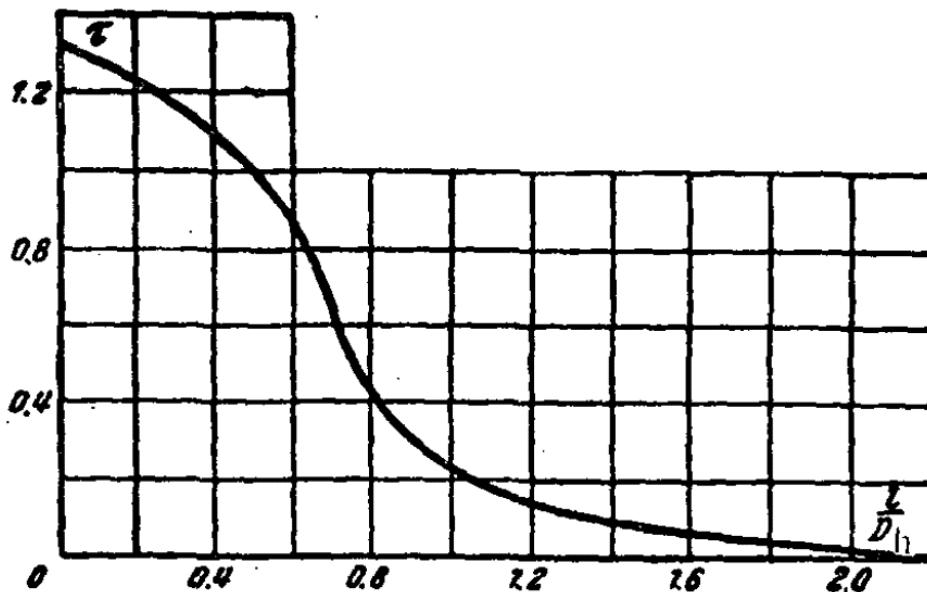
Pro Reynoldsova čísla nižší než 2000 doporučuje Idelchik použít vzorec 2.59.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad 2.59$$

Pro tranzitní oblast, kde se Reynoldsovo číslo pohybuje v rozmezí 2000 a 4000 platí rovnice 2.60.

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad 2.60$$

Tabulka 2-1 je v [12] pro hodnoty koeficientu τ v závislosti na poměru tloušťky clony a jejího průměru uváděna pouze pro poměry l/D_h v rozsahu 0-2,4. Lze tedy předpokládat, že pro větší hodnoty tohoto poměru bude hodnota τ rovna 0.



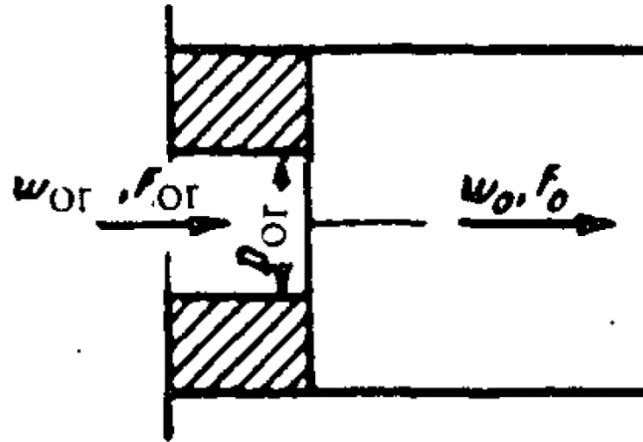
Graf 2-4 – závislost τ na l/D_h [12]

kde:

ζ	[-]	ztrátový koeficient při průtoku clonou
$F_{0,1,2}$	[m ²]	průtočná plocha ve cloně, před clonou a za clonou
τ	[-]	koeficient funkčně závislý na l a D_h
λ	[-]	koeficient tření
l	[m]	tloušťka clony
D_h	[m]	hydraulický průměr otvoru clony (v uvažovaném případě kruhového průřezu je roven průměru clony)
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
w_0	[m.s ⁻¹]	rychlost v nejužším průřezu clony
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita

2.3.2. Idelchik – stejné průřezy [12]

Idelchik uvádí rovnici 2.61 pro $Re > 10^5$ i pro variantu potrubí, které má před i za clonou stejný průměr (Obrázek 2-12).



Obrázek 2-12 - schéma clony s nezanedbatelnou floušťkou a stejnými průřezy přívodního a vývodního potrubí [12]

$$\zeta \cong \left[0,5 + (1 - \bar{f})^2 + \tau(1 - \bar{f}) + \lambda \frac{l}{d_h} \right] \frac{1}{\bar{f}^2} \quad 2.61$$

$$\bar{f} = \frac{F_{or}}{F_o} \quad 2.62$$

Pro stejnou potrubní konstelaci je pak uváděna rovnice 2.63 pro $Re < 10^5$.

$$\zeta = (\zeta_p + \varepsilon_0^{-Re} \zeta_0) \frac{1}{\bar{f}^2} \quad 2.63$$

Částečný ztrátový koeficient je určen rovnicí 2.64.

$$\zeta_0 = 0,5 + (1 - \bar{f})^2 + \tau(1 - \bar{f}) \quad 2.64$$

Hodnoty pro ε_0^{-Re} a ζ_p jsou určovány z tabulky 2-2.

Re	2.5·10	4·10	6·10	10 ⁵	2·10 ⁵	4·10 ⁵	10 ⁶	2·10 ⁶	4·10 ⁶	10 ⁷	2·10 ⁷	10 ⁸	2·10 ⁸	10 ⁹
$\frac{\epsilon_0 Re}{\zeta_0}$	0.34	0.36	0.37	0.40	0.42	0.46	0.53	0.59	0.64	0.74	0.81	0.94	0.95	0.99
$\frac{F_0}{F_1}$	Values of ζ_p													
0	1.94	1.38	1.14	0.89	0.69	0.64	0.39	0.30	0.22	0.15	0.11	0.04	0.01	0
0.2	1.78	1.36	1.05	0.85	0.67	0.57	0.36	0.26	0.20	0.13	0.09	0.03	0.01	0
0.3	1.57	1.16	0.88	0.75	0.57	0.43	0.30	0.22	0.17	0.10	0.07	0.02	0.01	0
0.4	1.35	0.99	0.79	0.57	0.40	0.28	0.19	0.14	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0
0.5	1.10	0.75	0.55	0.34	0.19	0.12	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0
0.6	0.85	0.56	0.30	0.19	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0
0.7	0.58	0.37	0.23	0.11	0.06	0.03	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0
0.8	0.40	0.24	0.13	0.06	0.03	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0
0.9	0.20	0.13	0.08	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.95	0.03	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 2-2 - hodnoty koeficientů pro rovnici (2.32) [12]

Koeficienty λ a τ jsou stejně jako v případě rovnice 2.53 odečítány z grafu 2-3 a 2-4. Stejně tak pro tuto rovnici platí stejná definice nezanedbatelnosti šířky clony.

kde:

ζ	[-]	celkový koeficient tlakové ztráty
\bar{f}	[-]	poměr průtočných ploch
F_{OR}, F_0	[m ²]	průtočná plocha clonou a výstupním potrubím
ζ_p	[-]	statická složka koeficientu tlakové ztráty
ϵ_0	[-]	dynamický koeficient
ζ_0	[-]	částečný koeficient tlakové ztráty

2.3.3. VDI Heat Atlas - 1. varianta [13]

Pro proudění plynů v diskutovaných clonách uvádí VDI Heat Atlas rovnici 2.65. Veličina, podle níž je definována zanedbatelnost tloušťky clony, je popsána jako poměr tloušťky stěny s a hydraulického průměru otvoru d_h . Aby mohla být uvažována nezanedbatelná tloušťka clony, musí být tento poměr značně větší než 0. Poměr σ je dán poměrem průtočných ploch před zúžením a zúžení, a je definován rovnicí 2.66. Výtokový součinitel K je definován pro velké hodnoty Reynoldsova čísla dvěma způsoby pro malé σ jako 2.67 a pro větší hodnoty jako 2.68. Průběh statického tlaku po délce clony je ilustrován obrázkem 2-13. Tato rovnice narozdíl od Idelchikovy rovnice nezohledňuje drsnost stěn a vliv tloušťky stěny clony.

$$\zeta = \left(\frac{1}{K} - 1 \right) + (1 - \sigma)^2 \quad 2.65$$

$$\sigma \equiv \frac{F_0}{F_1} \quad 2.66$$

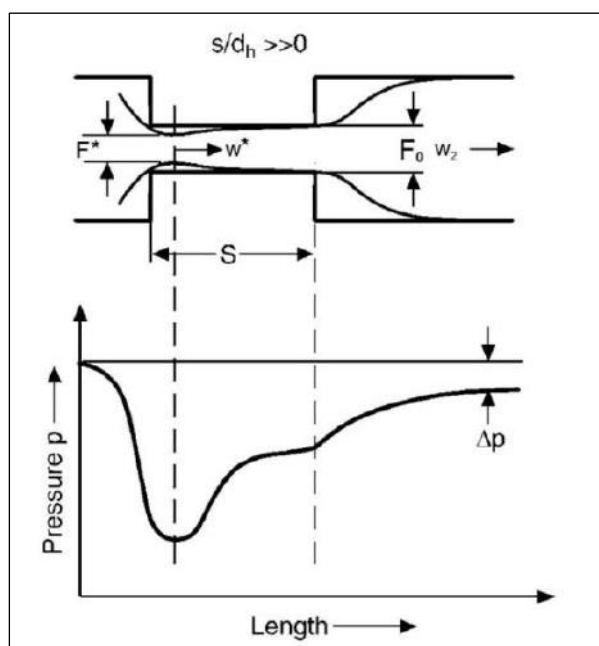
$$K = \frac{\pi}{\pi + 2} \approx 0,611 \quad 2.67$$

$$K = 0,6 + 0,4\sigma^2$$

2.68

kde:

ζ	[-]	koeficient tlakové ztrátové
K	[-]	výtokový součinitel
σ	[-]	poměr průtočných ploch
F_0	[m ²]	průtočná plocha clonou
F_1	[m ²]	průtočná plocha před clonou



Obrázek 2-13 - průběh tlaku v cloně podle VDI Heat Atlas [13]

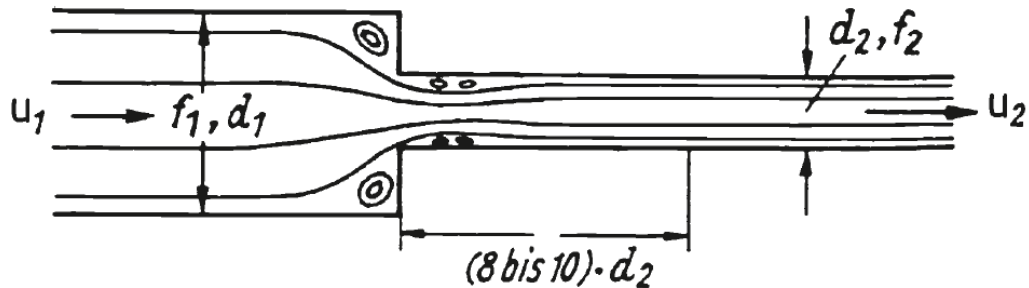
2.3.4. VDI Heat Atlas – 2. varianta [13]

Na problematiku škrťací clony s nezanedbatelnou šířkou by v případě, že by před i za clonou byla dostatečně dlouhá volná délka, také nahlížet jako na tři oddělené problémy tlakových ztrát – náhlé zúžení průřezu, drsnost potrubí (pro otvor ve stěně) a náhlé rozšíření průřezu. Tlakové ztráty jednotlivých elementů lze sečíst a získat tak celkovou tlakovou ztrátu konkrétní škrťací clony. Zde je však nutno poznamenat, že tyto vzorce a hodnoty jsou odvozeny primárně pro potrubí a nejsou koncipovány pro výpočty škrťacích clon.

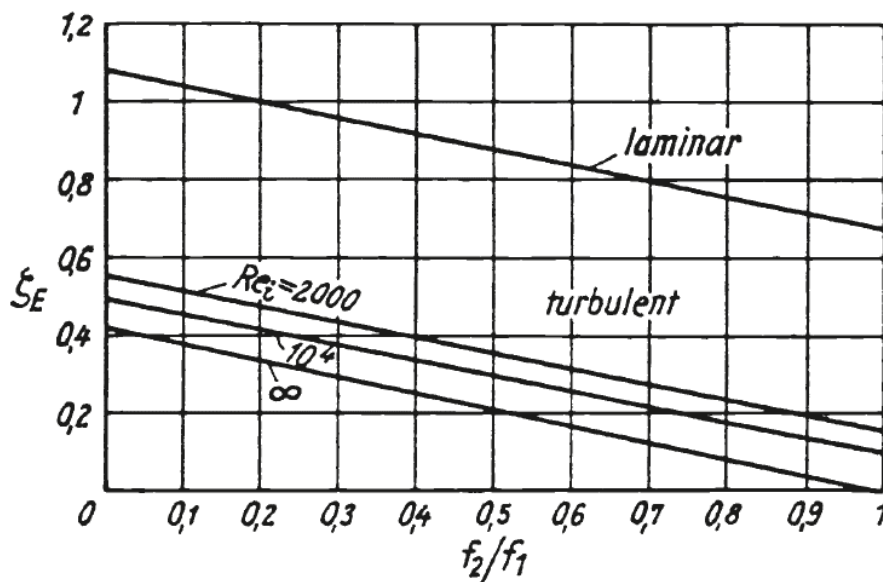
Pro náhlé rozšíření potrubí uvádí VDI Heat Atlas identický analytický vzorec, jenž byl odvozen v kapitole 2.1.8., pouze s odlišným značením.

$$\zeta_E = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2 \quad 2.69$$

Pro náhlé zúžení potrubí (Obrázek 2-14) platí podle stejného zdroje Graf 2-2, z něhož je patrné, že ztrátový koeficient závisí nejen na změně průtočného průřezu, ale i na Reynoldsově čísle. Z grafu mimo jiné plyne, že pro hodnotu ztrátového koeficientu hraje velkou roli turbulentnost proudění.



Obrázek 2-14 - náhlé zúžení proudu [13]



Graf 2-5 - závislost ztrátového koeficientu náhlého zúžení na Reynoldsově čísle a poměru průtočných průřezů [13]

Pro možnost použití grafu 2-5 i vztorce 2.69 platí podmínka dostatečné volné délky za zúžením, respektive rozšířením. V této oblasti se totiž hned na jejím začátku mění zprvu rovnoměrný rychlostní profil vlivem tření na stěnách zúžení (respektive náhlým rozšířením), tvoří se víry a k odeznění vírů je dle tohoto zdroje nutno alespoň osmi až desetinásobku průměru otvoru v potrubí. K úplnému vyvinutí rychlostního profilu je pak nutná ještě podstatně větší volná délka. Pro laminární proudění je dána vztahem 2.70.

$$l_A \approx 0,13Re_2d_2 \quad 2.70$$

Pro turbulentní pak 2.71.

$$l_A \approx 0,0575Re_2d_2 \quad 2.71$$

Ve veličině ζ_E pro náhlé zúžení průtočného průřezu jsou již zahrnuty třecí ztráty v uvažované volné délce za zúžením. Pokud je však šířka clony větší než volná délka za zúžením, je potřeba zahrnout do výpočtu i ztrátu třením o stěny potrubí. Zde je opět nutno rozlišovat proudění laminární a turbulentní. Pro laminární proudění platí vztah 2.72.

$$\zeta = \frac{64}{Re_i} \quad 2.72$$

Pro turbulentní proudění je problém ztrátového koeficientu komplexnější a je nutno se orientovat podle hodnot Reynoldsova čísla, a ne vždy je jednoznačné, jakou hodnotu lze použít. Z povahy těchto rovnic vyplývá, že je nutno počítat s určitou mírou nejistoty. V oblasti mezi $Re \approx 3000$ a $Re \approx 100000$ platí podle Blasia vztah 2.73.

$$\zeta = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_i}} \quad 2.73$$

Pro oblast $10^4 \leq Re \leq 10^6$ platí podle Konakova vztah 2.74.

$$\zeta = (1,8 \log Re_i - 1,5)^{-2} \quad 2.74$$

Pro oblasti vyšších Reynoldsových čísel ($>10^6$) platí podle von Kármána a Prandtla implicitní vztah 2.75.

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -0,8 + 2 \log(Re_i \sqrt{\zeta}) \quad 2.75$$

V rozsahu $10^5 \leq Re \leq 5 \cdot 10^7$ platí (s 5% odchylkou od předešlého vztahu) implicitní vztah 2.76 podle Filonenka.

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = 1,819 \log(Re_i) - 1,64 \quad 2.76$$

Pokročilejší přístup zahrnuje i vliv drsnosti potrubí. Pro vyvinuté proudění platí podle von Kármána a Prandtla vztah 2.77.

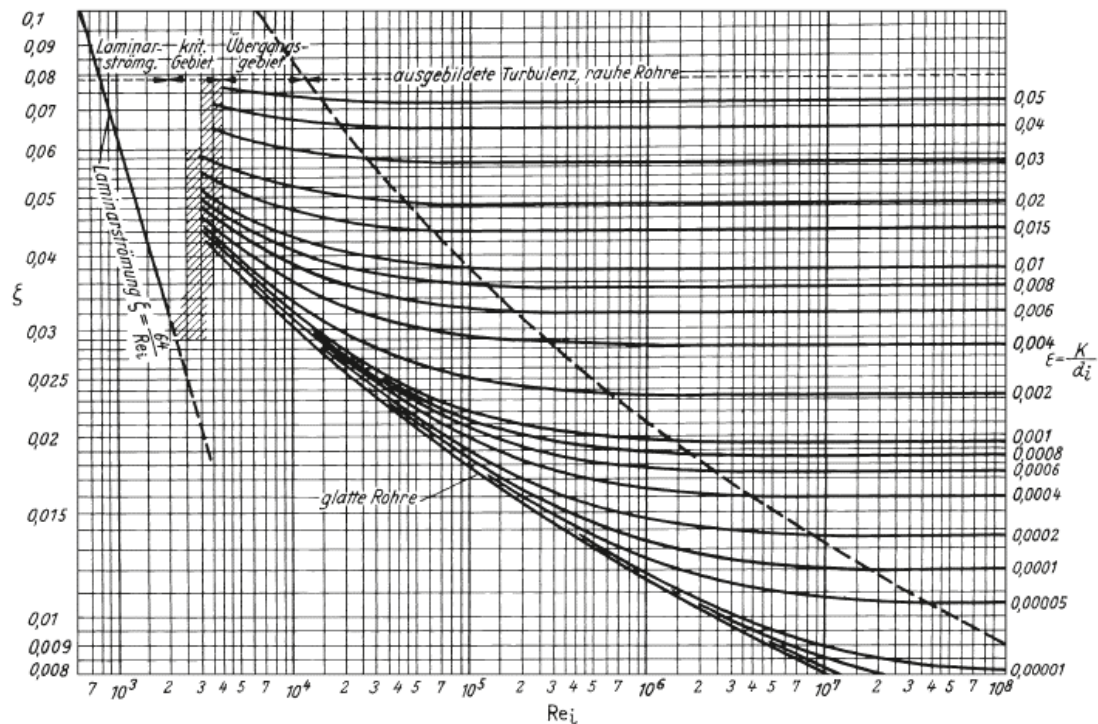
$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = 2 \log\left(\frac{d_i}{K}\right) + 1,14 \quad 2.77$$

Pro turbulentní proudění pak podle Nikuradseho, Prandtla, von Kármána, Moodyho a Colebrooka platí vztah 2.78.

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re_i \sqrt{\zeta}} + \frac{K/d_i}{3,71}\right) \quad 2.78$$

Hodnoty těchto koeficientů jsou zaneseny do grafu Graf 2-6, který vyjadřuje závislost třecího koeficientu v závislosti na Reynoldsově čísle a bezrozměrné relativní drsnosti ε (2.79).

$$\varepsilon = \frac{K}{d_i} \quad 2.79$$



Graf 2-6 - závislost ztrátového koeficientu trubek s nezanedbanou drsností na Re a relativní drsnosti [13]

Výsledný vztah pro výpočet tlakové ztráty tedy silně závisí na turbulentnosti proudění. V závislosti na ní je možné dále určit postup výpočtu.

kde:

ζ_E	[-]	koeficient tlakové ztráty náhlého rozšíření
$f_{1,2}$	[m ²]	obsah průřezné plochy otvoru ve cloně a výstupního potrubí
K	[m]	absolutní drsnost potrubí (střední hodnota výšky výstupků v potrubí)
d_i	[m]	průměr potrubí
l_A	[m]	volná délka
ε	[-]	bezrozměrná relativní drsnost

2.3.5. Roul, Dash [22]

Tento zdroj uvádí rovnici pro tlakovou ztrátu jak clony se zanedbatelnou, tak s nezanedbatelnou tloušťkou. Měřítkem nezanedbatelnosti tloušťky je zde poměr tloušťky clony a průměru otvoru ve cloně. Clona je považována za „tlustou“, je-li:

$$\frac{s}{d} > 0,5 \quad 2.80$$

Pro tenkou clonu je uváděn vzorec 2.81.

$$\Delta P_{sp} = \frac{\rho V^2}{2} \left[\frac{1}{\sigma \sigma_c} - 1 \right]^2 \quad 2.81$$

Ztrátový koeficient je tedy vyjádřen takto:

$$\zeta_{sp} = \left[\frac{1}{\sigma\sigma_c} - 1 \right]^2 \quad 2.82$$

Koeficient σ je pak vyjádřen jako druhá mocnina poměru průměru otvoru ve cloně a přívodního potrubí.

$$\sigma = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad 2.83$$

Koeficient kontrakce σ_c je poměrem plochy teoretické průtočné plochy a průtočné plochy v oblasti „vena contracta“.

$$\sigma_c = \frac{A_c}{A_\sigma} \quad 2.84$$

Pro clonu s nezanedbatelnou tloušťkou je uváděn vztah 2.85.

$$\Delta P_{sp} = \frac{\rho V^2}{2} \left[\left(\frac{1}{\sigma\sigma_c} \right)^2 - 1 - \frac{2}{\sigma^2} \left(\frac{1}{\sigma_c} - 1 \right) - 2 \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \right]^2 \quad 2.85$$

Ztrátový koeficient je pak vyjádřen takto:

$$\zeta_{sp} = \left[\left(\frac{1}{\sigma\sigma_c} \right)^2 - 1 - \frac{2}{\sigma^2} \left(\frac{1}{\sigma_c} - 1 \right) - 2 \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \right]^2 \quad 2.86$$

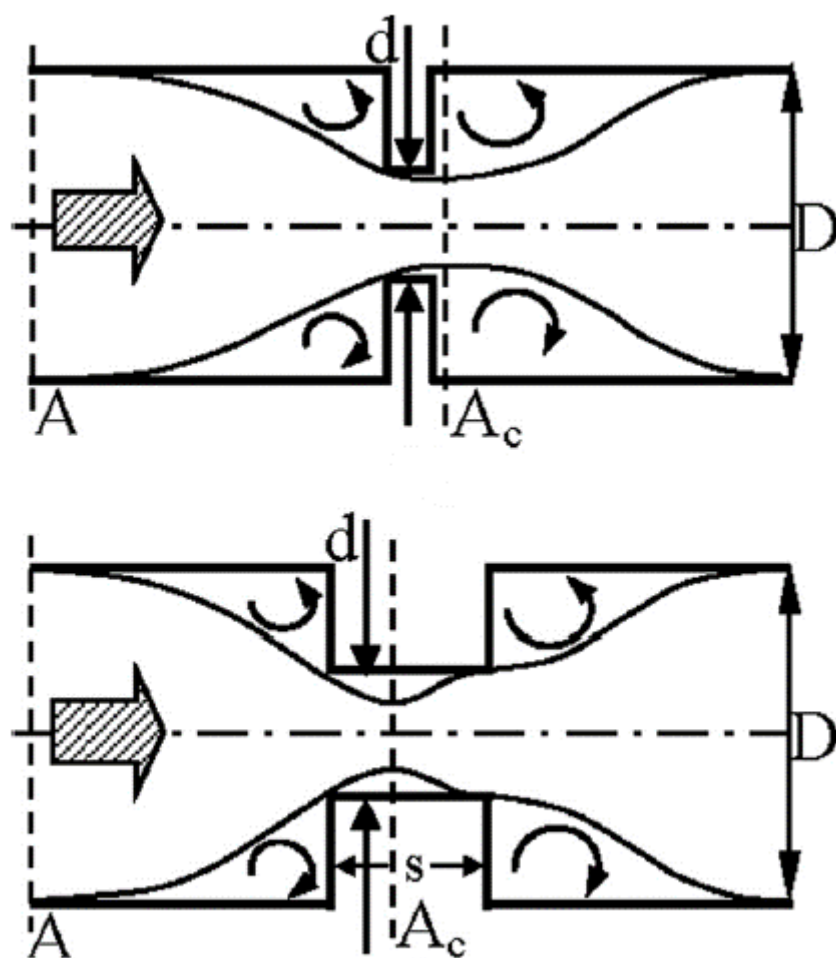
Pro praktické určení koeficientu σ_c je pak použit vzorec 2.87.

$$\sigma_c = \frac{1}{0,639(1 - \sigma)^{0,5} + 1} \quad 2.87$$

Konfigurace pro oba výpočty je znázorněna na obrázku 2-15.

kde:

ζ_{sp}	[-]	koeficient tlakové ztráty
σ	[-]	koeficient poměrů průměru potrubí a otvoru ve cloně
σ_c	[-]	kontrakční koeficient
d	[m]	průměr otvoru ve cloně
D	[m]	průměr přívodního potrubí
A_c	[m ²]	obsah teoretické průtočné plochy
A_σ	[m ²]	obsah průtočné plochy v oblasti „vena contracta“
V	[m.s ⁻¹]	rychlost média
P_{sp}	[Pa]	tlaková ztráta



Obrázek 2-15 - konfigurace clon pro výpočet podle Roula a Dashe (nahore tenká, dole tlustá clona) [22]

2.3.6. Tlaková ztráta mřížového elementu [12]

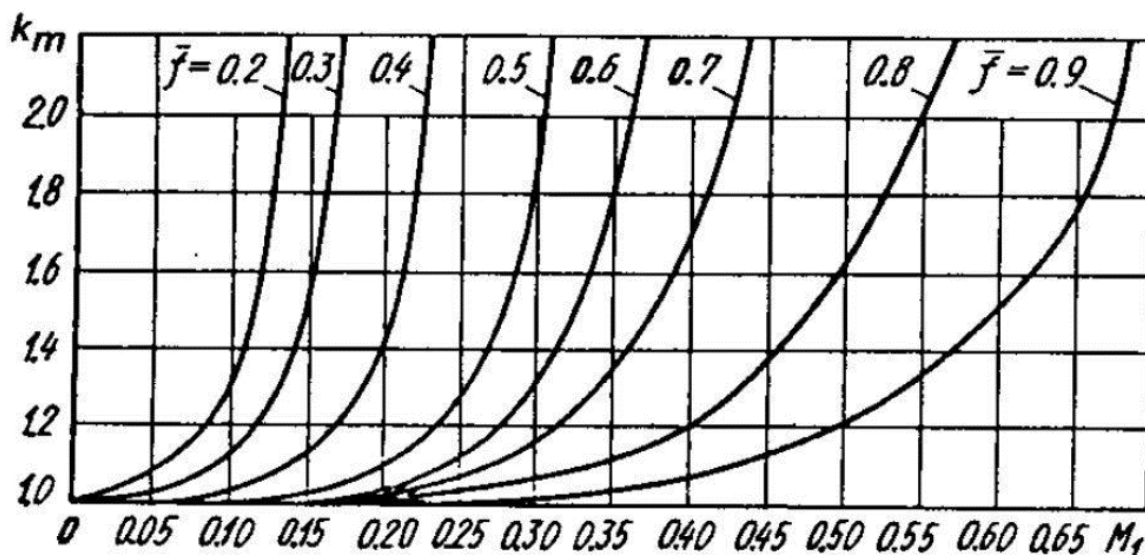
Tlaková ztráta mřížky se zanedbatelnou tloušťkou stěny je založena na vzorci 2.88. Ten platí i pro clonu s jedním otvorem. Tento ztrátový koeficient je přenásoben opravným členem k_M . Ten je funkcí Machova čísla a jeho hodnotu můžeme nalézt v tabulce 2-3 nebo v grafu 2-7. Poměr \bar{f} je stejně jako ve vztahu 2.62 poměrem průtočné plochy omezujícího prvku (zde mříže) a průtočné plochy navazujícího potrubí.

$$\zeta = \left[0,707(1 - \bar{f})^{0,375} + 1 - \bar{f} \right]^2 \frac{1}{\bar{f}^2} \quad 2.88$$

$$\zeta_M = k_M \zeta \quad 2.89$$

$$k_M = f(M_1) \quad 2.90$$

$$\bar{f} = \frac{f_1}{f_0} \quad 2.91$$



Graf 2-7 - graf závislosti k_M na M_1 a f

\bar{f}	M_1													
	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0,2	1,00	1,09	1,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	1,00	1,03	1,13	1,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4	1,00	1,00	1,03	1,14	1,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	1,00	1,00	1,00	1,03	1,10	1,27	1,85	-	-	-	-	-	-	-
0,6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,12	1,30	1,77	-	-	-	-	-	-
0,7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03	1,08	1,16	1,35	1,68	-	-	-	-	-
0,8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,03	1,07	1,12	1,20	1,37	1,63	2,01	-	-
0,9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,04	1,07	1,13	1,21	1,33	1,5	1,75

Tabulka 2-3 – číselné hodnoty závislosti k_M na M_1 a f

kde:

ζ_M	[-]	koeficient tlakové ztráty mřížového elementu
k_M	[-]	opravný člen
M_1	[-]	Machovo číslo
f_1	[-]	obsah průtočné plochy mříže
f_0	[-]	obsah průtočné plochy za mříží

2.3.7. S. D. Morris – průtočné množství, jednofázové proudění [29]

Na rozdíl od rovnice 2.40 v reálném případě nelze uvažovat izoentropické proudění. Škrčení plynů je popisováno jako izoentalpický děj. S. D. Morris uvádí vzorec pro průtočné množství jednofázového stlačitelného média.

$$\dot{M} = C_d A_t \left(2 \frac{p_0}{v_{g0}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.92$$

Parametry X_1 a X_2 se vypočtou následovně.

$$X_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(1 - \eta_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad 2.93$$

$$X_2 = \eta_t^{\frac{-2}{\gamma}} - \beta^4 \quad 2.94$$

Všechna označení a parametry jsou vysvětleny v následující kapitole.

2.3.8. S. D. Morris – průtočné množství, dvoufázové proudění [29]

Další komplikací pro výpočet je fakt, že přechodem přes pravou mezní křivku v průběhu děje pára kondenzuje a snižuje se tak její suchost. Tato fakta respektuje Morrisův model. Základním vztahem je rovnice pro výpočet samotného hmotnostního průtoku.

$$\dot{M} = C_d A_t \left(2 \frac{p_0}{v_{e0}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.95$$

Parametry Z_1 a Z_2 se vypočtou následovně.

$$Z_1 = (1 - a)(1 - \eta_t) + \frac{a\gamma}{\gamma - 1} \left(1 - \eta_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad 2.96$$

$$+ \frac{3b}{4} \tan^{-1} \left(\eta_t^{\frac{-1}{\gamma}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} - b \eta_t^{\frac{1}{\gamma}} \left(\eta_t^{\frac{-1}{\gamma}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\eta_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \frac{1}{4} \right) \quad 2.97$$

$$Z_2 = \Lambda_t^2 - \beta^4$$

Parametry a a b se vypočtou takto.

$$a = \frac{\lambda_2^{\frac{1}{2}}(\Lambda_1 - 1) - \lambda_1^{\frac{1}{2}}(\Lambda_2 - 1)}{\lambda_1^{\frac{1}{2}}\lambda_2^{\frac{1}{2}}\left(\lambda_1^{\frac{1}{2}} - \lambda_2^{\frac{1}{2}}\right)} \quad 2.98$$

$$b = \frac{\Lambda_2 - 1 - a\lambda_2}{\lambda_2^{\frac{1}{2}}} \quad 2.99$$

Dalšími nutnými parametry jsou tedy λ_1 , Λ_1 , λ_2 , a Λ_2 .

$$\lambda_{1/2} = \eta_{1/2}^{\frac{-1}{\gamma}} - 1 \quad 2.100$$

$$\Lambda_{1/2} = \frac{v_{e1/2}}{v_{e0}} \quad 2.101$$

Tlakové poměry jsou označeny jako η .

$$\eta = \frac{p_2}{p_0} \quad 2.102$$

$$\eta_2 = \frac{p_0}{0,5(p_0 + p_t)} \quad 2.103$$

Morris také zavádí efektivní měrný objem.

$$v_e = [xv_g + k(1-x)v_L] \left\{ x + \frac{1-x}{k} \left[1 + \frac{(k-1)^2}{\left(\frac{v_g}{v_L}\right)^{\frac{1}{2}} - 1} \right] \right\} \quad 2.104$$

$$k = k_0(1 + \varepsilon_{h0}\lambda)^{\frac{1}{2}} \quad 2.105$$

$$k_0 = \left(\frac{v_{h0}}{v_{L0}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.106$$

$$\varepsilon_{h0} = \frac{xv_{g0}}{xv_{g0} + (1-x)v_{L0}} \quad 2.107$$

Parametry Λ_t a β pro výpočet Z_2 jsou počítány takto.

$$\Lambda_t = 1 + a\lambda_t + b\lambda_t^{\frac{1}{2}} \quad 2.108$$

$$\beta = \frac{D_h}{D_1} \quad 2.109$$

Parametr λ_t je vypočten pomocí tlakové poměru η_t .

$$\eta_t = \frac{p_t}{p_0} \quad 2.110$$

$$\lambda_t = \eta_t^{\frac{-1}{\gamma}} - 1 \quad 2.111$$

Tlak ve cloně p_t je odhadován takto.

$$p_t = 2p_2 - p_0 \quad 2.112$$

Morris zároveň definuje kontrakční koeficient C_d .

$$C_d = (1,26 - 0,26\beta)C_{d0} \quad 2.113$$

$$C_{d0} = \varepsilon_t C_{dg} + (1 - \varepsilon_t)C_{dL} \quad 2.114$$

$$\varepsilon_t = \left[1 + \frac{(1-x)v_{L0}}{xv_{g0}} \eta_t^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{v_{ht}}{v_{L0}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad 2.115$$

$$C_{dL} = 0,61375 + 0,13318\beta^2 - 0,26095\beta^4 + 0,51146\beta^6 \quad 2.116$$

$$C_{dg} = \frac{1 - (1-w)^{\frac{1}{2}}}{2f\eta_t^{\frac{1}{\gamma}}} \quad 2.117$$

$$f = \frac{1}{C_{dL}} - \frac{1}{2C_{dL}^2} \quad 2.118$$

$$w = 4\eta_t^{\frac{2}{\gamma}}(1 - \eta_t) \frac{f}{K_N^2} \quad 2.119$$

$$K_N^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \eta_t^{\frac{2}{\gamma}} \left(1 - \eta_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad 2.120$$

kde:

\dot{M}	[kg/s]	hmotnostní průtok
C_d	[-]	absolutní kontrakční koeficient
A_t	[m ²]	průtočný průřez clonky
p_0	[Pa]	vstupní tlak
v_{e0}	[m ³ /kg]	obsah průtočné plochy za mříží
$Z_{1,2}$	[-]	parametry
a, b	[-]	parametry
$\eta_{t,2}$	[-]	tlakové poměry
γ	[-]	Poissonova konstanta
$\Lambda_{t,1,2}$	[-]	parametry

$\lambda_{t,1,2}$	[-]	parametry
β	[-]	poměr průměru clonky a vstupního průměru
$v_{e0,2,t}$	[m ³ /kg]	efektivní měrný objem
$p_{t,2}$	[Pa]	tlak ve clonce, na výstupu
$D_{h,1}$	[m]	průměr clonky, vstupní průměr
$C_{d0,dg,dL}$	[-]	kontrakční koeficient základní, pro plyn, pro kapalinu
w	[-]	parametr
f	[-]	parametr
ε_t	[-]	objemový poměr zabíraný plynem ve cloně
K_N	[-]	parametr
V_L, V_{L0}	[m ³ /kg]	(vstupní) měrný objem kapaliny
V_g, V_{g0}	[m ³ /kg]	(vstupní) měrný objem plynu
$V_{ht,0}$	[m ³ /kg]	celkový měrný objem ve clonce, vstupní
x	[-]	suchost
k, k_0	[-]	kluzný poměr
ε_{h0}	[-]	homogenní objemový poměr zabíraný plynem ve cloně

3 Technické řešení mařiče energie

V této kapitole je v první části popsán realizovaný subsystém odvodu vodíku z primárního okruhu. Další část se zabývá popisem a srovnáním konstrukce mařičů energie z produkce společnosti Škoda JS, a. s. a jiných výrobců.

3.1. Odvod vodíku z pojišťovacích a odlehčovacích ventilů VVER 1000 a VVER 440 [14]

Mařiče energie, z jejichž testování vychází validace přiloženého výpočtového modelu, jsou nainstalovány na dvou jaderných elektrárnách jako součást systému kompenzace objemu. Jsou součástí subsystému, jehož úkolem je odvod vodíku z pojišťovacích a odlehčovacích ventilů.

3.1.1. Vodík v primárním okruhu

Z média primárního okruhu vzniká vodík radiolýzou a je uvolňován po celém primárním okruhu, především pak v jeho vyšších částech. Jeho podstatná část se tak vyskytuje nad hladinou kompenzátoru objemu. Vodík je třaskavý plyn s dobrými izolačními vlastnostmi, jeho vyšší koncentrace v primárním okruhu jaderné elektrárny je tedy nebezpečná a nepřijatelná.

Před uvedením tohoto subsystému do provozu se vodík hromadil v kompenzátoru objemu, před hlavním pojišťovacím a odlehčovacím ventilem. Při otevření hlavního pojistného ventilu do barbotážní nádrže existovala možnost, že by se mohlo najednou uvolnit značné množství vodíku, které by najednou systém na spalování vodíku nestačil zneškodnit. Další potíží, kterou vodík svými izolačními vlastnostmi způsoboval, bylo nerovnoměrné prohřívání uzlu pojistných ventilů, což vedlo ke snížení spolehlivosti pojistných ventilů v případě potřeby jejich otevření.

3.1.2. Funkce subsystému pro odvod vodíku

Tento subsystém má za úkol zajistit především odvod vodíku takovým způsobem, aby nebyla překročena dovolená úroveň množství nahromaděného vodíku v primárním okruhu a zároveň musí systém odvádět maximálně takové množství, které je schopen zpracovat systém pro spalování vodíku. Subsystém musí také zamezit prasknutí průtržné membrány barbotážní nádrže, pokud se krátkodobě otevře hlavní pojistný nebo odlehčovací ventil.

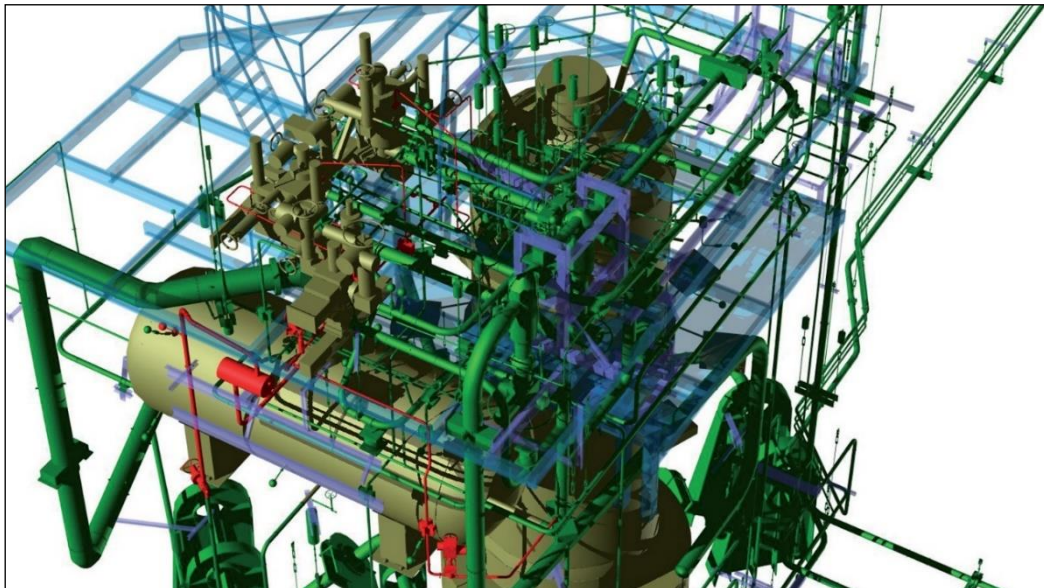
Subsystém se skládá ze sběrače parovodíkové směsi. Jeho součástí je i mařič energie, který upraví parametry odebrané směsi tak, aby mohla dále putovat přes barbotážní nádrž do systému spalování vodíku. V současné době je tento subsystém nainstalován na třech jaderných elektrárnách. Na jaderné elektrárně Dukovany byl tento subsystém realizován mezi lety 2004 a 2005, následovala instalace na 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Mochovce a v rámci postfukušimských opatření i na jaderné elektrárně Temelín.

V dukovanském subsystému je vodík odváděn periodicky v takových intervalech, aby systém pro spalování vodíku měl dostatečnou rezervu spalovací kapacity. Při periodickém odpuštění dojde ke snížení obsahu vodíku v parním polštáři kompenzátoru objemu, avšak ne k odpuštění vodíku, který je v primárním médiu. Ten se pak začne opět uvolňovat do parního polštáře kompenzátoru objemu. Zároveň z periodické podstaty tohoto děje dochází k teplotnímu cyklování komponent.

Mochovecký subsystém prošel evolucí. Je koncipován tak, že sbírá vodík ze všech míst, kde by se mohl hromadit a odebraná parovodíková směs je skrz kolektor vedena do centrálního mařiče energie, z něhož je odvedena do barbotážní nádrže a dále do systému spalování vodíku. Subsystém je nově také vybaven bezpečnostními opatřeními jako jsou elektroventily na výfuku, které mohou, je-li to potřeba, celý subsystém ihned odstavit. Dalším zdokonalením je doplnění měření teploty na odběrech, což umožňuje efektivně regulovat množství odpouštěné směsi. Clony v mařiči energie jsou pak dimenzovány na 15 let provozu. Tento subsystém je na obrázcích 3-1 a 3-2 zvýrazněn červenou barvou.



Obrázek 3-1 - 3D model subsystému pro odvod vodíku



Obrázek 3-2 - 3D model sybsystému pro odvod vodíku

3.2. Konstrukce maříče

Z funkce maříče vyplývá několik obecných zásad pro jeho konstrukci. Materiál maříče musí být chemicky odolný médiu, jež jím protéká. Maříč by měl být připraven i na případný přechodný výskyt nadzvukového proudění – materiál tedy musí být dostatečně mechanicky odolný. Prvotním opatřením proti nadzvukovému proudění je však samozřejmě geometrie maříče, jež musí být navržena tak, aby k nadzvukovému proudění nedocházelo pokud možno vůbec.

V případě, že médiem je pára (nebo médium, které škrcením mění svůj měrný objem), dochází k na clonkách k její expanzi (měrný objem se zvětšuje). Má-li být zachován hmotnostní průtok, je nutno otvory v každé clonce navrhnout větší než ve clonce předchozí.

3.3. Maříče energie společnosti Škoda JS, a. s. [15]

Společnost Škoda JS, a. s. zatím realizovala instalaci maříčů energie do systému pro odvod vodíku tří jaderných elektráren. Maříče energie z elektráren Mochovce a Temelín jsou použity pro validaci výpočtového modelu v této práci. Maříče této společnosti jsou složeny z jednotlivých clonek, které navzájem zapadají do sebe. Clonky jsou tedy sestaveny ve správném pořadí za sebou (jednotlivé clonky mají odlišné průměry) a vloženy do tělesa maříče. Před clonkami je ještě předřazen mřížový element, jenž také zvyšuje tlakovou ztrátu a zároveň funguje jako filtr případných nežádoucích elementů.

3.3.1. Maříč energie pro Jadernou elektrárnu Mochovce

Tento maříč je složen ze sedmi clon, jejichž průměry stoupají od 0,9 mm až do 2,2 mm. Tyto clony jsou seřazeny v jedné ose za sebou. Otvory jednotlivých clon jsou vůči ose clon konstruovány excentricky tak, aby dvě za sebou poskládané clony neměly otvory v jedné ose. V předřazeném mřížovém elementu je 60 otvorů s jednotným průměrem 0,6 mm. Jednotlivé elementy maříče se smontují dohromady a následně přivaří k potrubí.

3.3.2. Maříč energie pro Jadernou elektrárnu Temelín

Maříč energie pro Temelín se skládá z deseti škrťících clon a předřazeného mřížového elementu. Prvních šest clon je poskládaných za sebou, sedmá clona mění směr proudění o 90° a vyvádí proud média do posledních tří clon, jež jsou opět poskládané za sebou. Oproti mochoveckému maříči leží otvory prvních šesti clon v jedné ose. Jediný vyosený je otvor je na osmém cloně. Stejně jako u mochoveckého maříče jsou clony nejdříve poskládané do sebe, vloženy do tělesa maříče a následně přivařeny k navazujícímu potrubí.

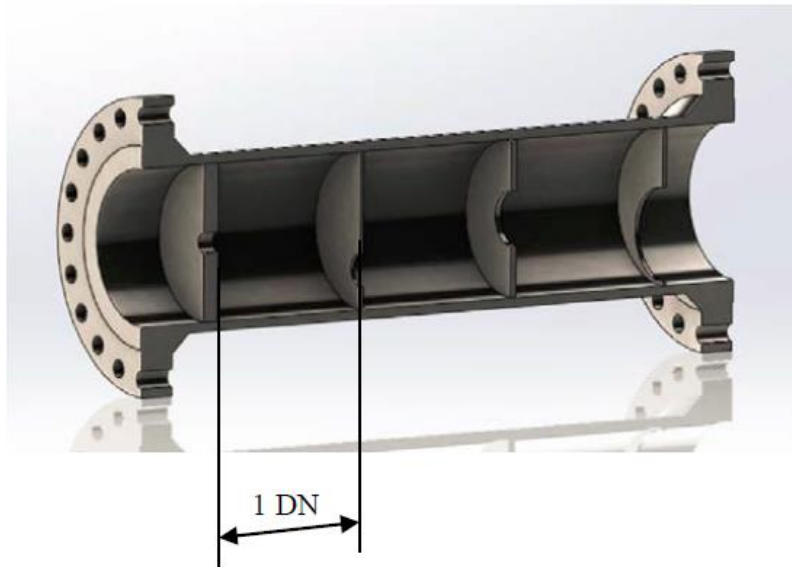
3.4. Maříče energie jiných společností

Kromě ŠJS se výrobou maříčů energie zabývá množství dalších firem. Je však potřeba poznamenat, že se většinou nejedná o maříče energie pro jiné aplikace a z tohoto důvodu mají odlišnou konstrukci. Často jsou produkovány sériovou výrobou.

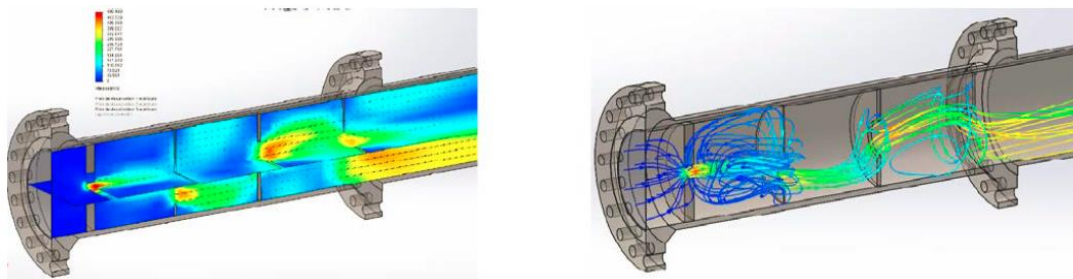
3.4.1. Deltafluid [16]

Maříč společnosti Deltafluid sestává z jedné trubky, v níž jsou umístěny jednotlivé clony. Tato trubka je pak k navazujícímu potrubí připojena přírubovým spojem nebo svarem. Otvory jsou vůči sobě postaveny excentricky ve clonách, jež umístěny ve stejné vzdálenosti jako je průměr trubky. Jednotlivé clony je možno navrhnout i s více otvory. Dle katalogu této firmy lze maříč vyrobit z různých materiálů jako jsou různé druhy oceli, titan nebo PVC. Při volbě

materiálu je samozřejmě brát velkou zřetel na použité médium a jeho parametry. Výrobce dále tvrdí, že umí vyrobit mařič tak, aby se jím produkovaný zvuk pohyboval pod hladinou 85 dB. Typické průměry, pro něž Deltafluid mařiče vyrábí se pohybují od DN15 až do DN1000.



Obrázek 3-4 - mařič energie Deltafluid [16]



Obrázek 3-3 - vizualizace CFD simulace mařiče Deltafluid [16]

3.4.2. HMA Instrumentation [17]

Tato firma vyrábí mařiče energie především jako levnou a dlouho pracující alternativu pro regulační ventily. Uvádí, že hlavní výhodou oproti regulačnímu ventilu je nepřítomnost pohyblivých částí, které tak nepodléhají opotřebení z důvodu jejich vzájemného pohybu. Nevýhodou této alternativy je pak rigidita regulace – ke změně regulovaného tlaku nestačí pouze změnit polohu ventilu, ale je potřeba vyměnit clony v mařiči, což vyžaduje odstávku provozu. Mařiče energie je tedy nutno využívat v takových aplikacích, kde tato nevýhoda nepředstavuje podstatný faktor.

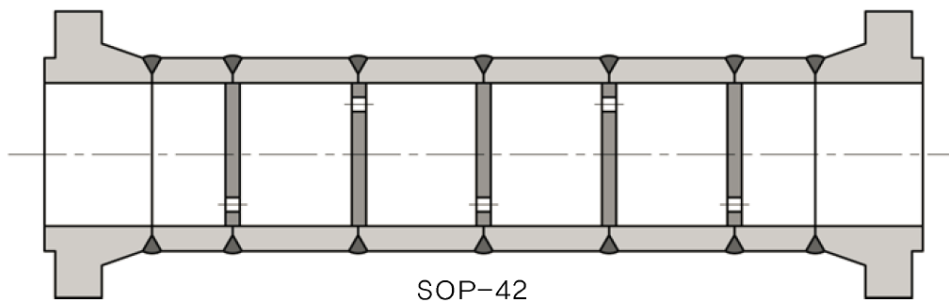
Firma HMA Instrumentation používá metodu navařování clon do trubky, jež tvoří zároveň těleso mařiče. Podle druhu aplikace nemusí být mařič sestaven pouze z jedné trubky, ale i z více k sobě svařených trubek. Mařiče této firmy jsou používány například na plošinách a lodích na moři (tankery, plošiny pro těžbu plynu), v dolech nebo v zařízeních pro zpracování tekutého plynu. Mařiče jsou tedy používány v pomocných systémech pro profukování, jako pojistka pro selhání kontrolního ventilu nebo jako omezovač tlaku ve vodních systémech.



Obrázek 3-5 - mařič energie HMA Instrumentation [17]

3.4.3. Seojin [18]

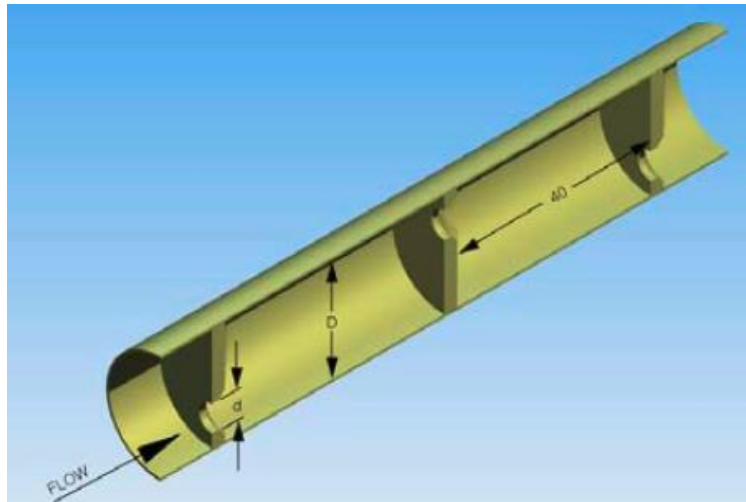
Korejská firma Seojin vyrábí jak škrtkové clony, tak mařiče energie pod produktovým označením SOP. Jejich konstrukce i technologie výroby je podobná jako v předchozích případech. Jako zajímavost lze uvést, že v portfoliu tohoto výrobce figurují například i kónické víceotvorové clony. Mařiče energie pak mají označení SOP-42 a z velké většiny jsou vyráběny jako za nevyměnitelné clony navařené v trubce. Na obrázku 3-7 lze vidět, že jednotlivé otvory ve clonách jsou navrženy excentricky. Většina produktů této firmy je instalována ve výfukových systémech, kde snižuje tlak vyfukovaného média na atmosférický a zamezuje tak nadměrnému hluku, který by vznikl případnými vibracemi.



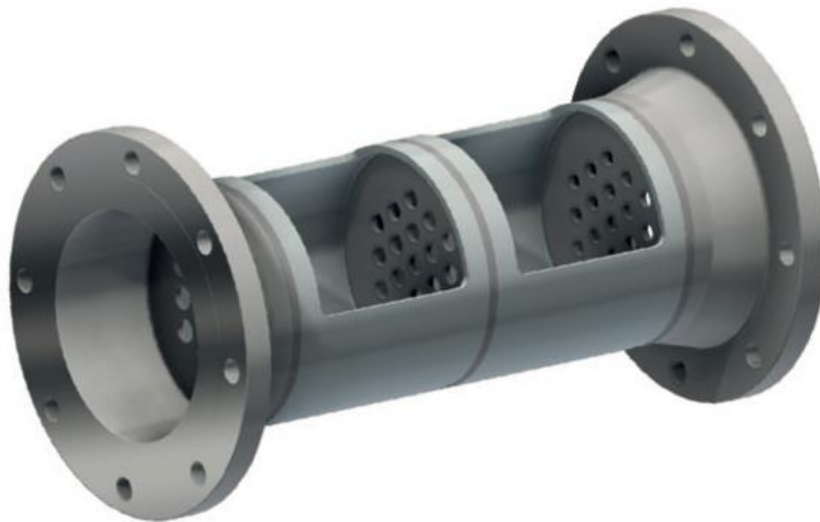
Obrázek 3-6 - mařič energie SOP-42, Seojin [18]

3.4.4. Tecnomatic [19]

Italská firma Tecnomatic disponuje širokým portfoliem potrubních komponent. Jedním z jejich produktů jsou také i mařiče energie. Ty jsou používány jak v zařízeních pro výrobu a zpracování plynu, tak v petrochemickém průmyslu i v elektrárnách. Mařiče jsou konstruovány buď jako trubka se clonami nebo jako více částí, jež se skládají dohromady. Clony jsou podle aplikace navrhovány jako jedno- i víceotvorové (Obrázek 3-7, Obrázek 3-9).



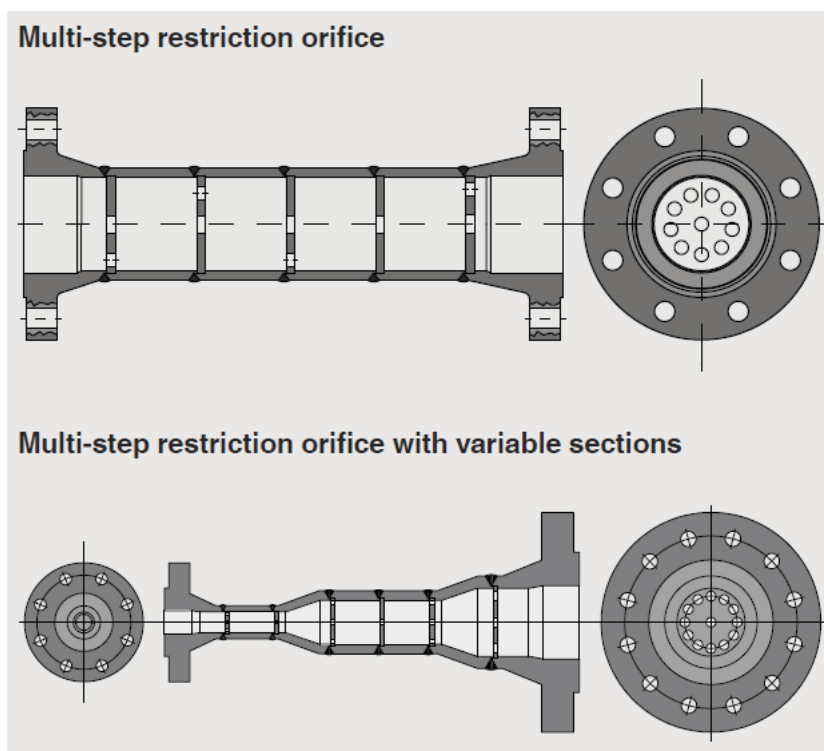
Obrázek 3-8 - 3D vizualizace maříče SOG-42, Seojin [18]



Obrázek 3-7 - maříč energie Tecnomatic [19]

3.4.5. WIKA [20]

Maříče německého výrobce WIKA jsou zajímavé možností volby proměnného průměru trubky, v níž jsou instalovány clony. V portfoliu této firmy jsou i maříče se stálým průměrem. Jednotlivé clony mohou být navrženy jako jedno- i víceotvorové, výrobce nabízí i excentrické umístění otvoru ve cloně.



Obrázek 3-9 - mařič energie WIKA [20]

3.4.6. Baliga [21]

Dalším z výrobců je společnost Baliga. Její design se nijak zásadně neliší od designů ostatních výrobců. Mařiče jsou navrhovány pro vodu i páru, v závislosti na parametrech média jsou pak softwarově navrženy rozestupy mezi clonami, velikosti otvorů a další parametry mařiče.

3.5. Materiály pro mařiče energie [24], [25]

Pro výrobu mařičů energie je používáno různých materiálů. Při výběru materiálu záleží na druhu média a jeho provozních parametrech. Můžeme se tak setkat především s mařiči z kovů, ale i z polymerů jako jsou například polypropylen, polyvinylchlorid nebo polytetrafluoretylen. Kovové mařiče jsou pak vyráběny z uhlíkových a nerezových ocelí, titanových a niklových slitin atd.

Mařiče energie společnosti ŠJS, jež jsou předmětem této práce, jsou vyráběny z materiálu s označením 08Ch18N10T. Jedná se o nerezavějící chrom-niklovou ocel stabilizovanou titanem, jež je v jaderném průmyslu hojně využívána pro rozličné aplikace. Procentuální zastoupení jednotlivých prvků v tomto druhu oceli je patrné z tabulky 3-1.

-	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni		Ti
koncentrace prvku [%]	max 0,08	max 0,8	1,0 – 2,0	max 0,2	max 0,035	17,0 – 19,0	9,0 – 11,0		min 5xC-0,7

Tabulka 3-1 - chemické složení oceli 08Ch18N10T v procentech [24]

4 Výpočtový model

V příložené tabulce programu Excel je zpracováno několik výpočtových modelů. Ty jsou založeny na rovnicích uvedených v kapitolách 1 a 2. Jednotlivé výpočtové modely jsou popsány v kapitole 4.2. Tabulkové hodnoty pro páru jsou zjišťovány pomocí databáze a funkcí makra X Steam, jež je založeno na průmyslových standardech pro vodní páru IAPWS IF97 [23].

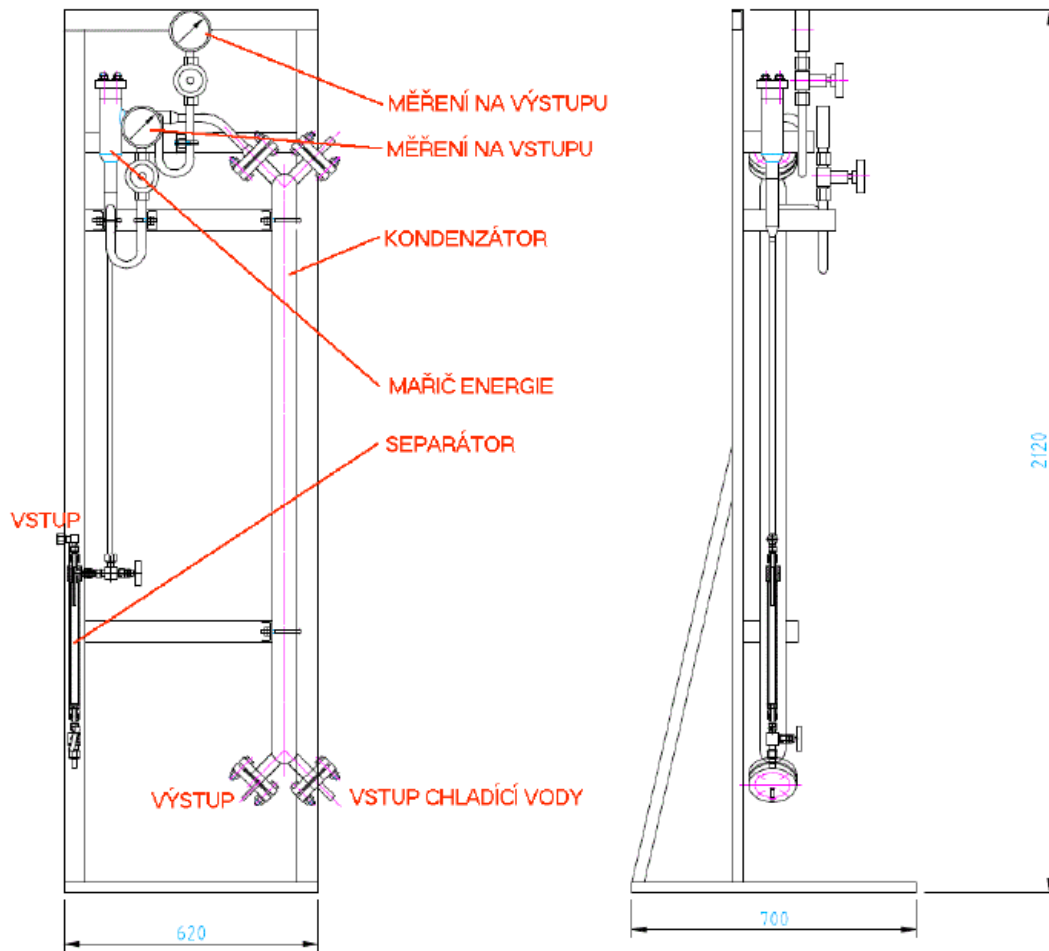
4.1. Zkouška mařiče [15]

Pro ověření výpočtu je využito několik měření, jež byla uskutečněna za účelem ověření správnosti konstrukce již existujících mařičů, které jsou v současnosti nainstalovány na českých a slovenských jaderných elektrárnách. Těchto zkoušek bylo provedeno pět. Čtyři z nich proběhly v plzeňské teplárně, kde bylo jako média využito syté páry z bubnového kotle. Jeden test pak proběhl v areálu Orlík firmy ŠJS v Plzni, kde bylo jako média použito tlakové vody. Výkresy mařičů, na nichž byly provedeny experimenty jsou přiloženy k práci jako Příloha č. 2 a 3. V následujících podkapitolách budou detailněji popsány jednotlivé zkoušky a utříděny naměřené výsledky. Názvy podkapitol jsou strukturovány takto: Místo, médium, datum zkoušky, elektrárna, pro niž byl mařič testován. U každého měření je specifikováno, jak byl mařič sestaven a jaké clonky byly použity. Naměřené tlaky jsou ve skutečnosti přetlaky, to znamená, že hodnota 0 MPa ve skutečnosti reprezentuje absolutní hodnotu atmosférického tlaku.

Účelem zkoušky je ověření toho, zda průtočné množství média mařičem za definovaných podmínek odpovídá předepsané hodnotě průtoku. Tato hodnota je dána potřebou konkrétního systému jaderné elektrárny.

Pro zkoušky v plzeňské teplárně bylo použito schématu zapojení mařiče, jež je znázorněno na obrázku 4-1 (rozměry jsou uvedeny v milimetrech). Za vstupem přívodního potrubí syté páry z kotle je umístěn separátor nečistot a vlhkosti. Poměrem otevření ventilů na separátoru je pak regulován vstupní tlak do mařiče. Tato soustava je spolu se dvěma měřiči tlaku zasazena do rámu. Po projití mařičem pára kondenzuje v kondenzátoru, jenž je připojen k výstupu. Zkondenzovaná kapalina pak odkapává do připravené nádoby se známou hmotností. Měření probíhá po určitý čas, po němž se zváží nádoba s kondenzátem, následně se odečte hmotnost nádoby od celkové hmotnosti, z čehož dostaneme hmotnost kondenzátu. Ze znalosti délky časového úseku průtoku páry a hmotnosti kondenzátu je pak tedy možno určit hmotnostní průtok.

Teplota vstupního média t_1 byla měřena na povrchu potrubí vstupujícího do mařiče, skutečná teplota média byla tedy vyšší. Pro potřeby výpočtu je zjednodušeně uvažována vstupní pára otlaku p_1 s přehřátím $0,1^\circ\text{C}$. Jednotlivá měření jsou číslována a toto číslování je dodržováno i v Příloze č. 1.



Obrázek 4-1 - schéma zapojení měření mařiče energie na syté páře [15]

4.1.1. Plzeňská teplárna, pára, 20. 1. 2015, Mochovce

Požadovaným hmotnostním průtokem pro tuto zkoušku bylo 35 kg/hod při vstupním tlaku cca 12,5 MPa. Po prvních dvou měřeních byly tak clonky mařiče přestaveny do vyhovující konstelace. Měření číslo 3 a 4 byla již vyhovující. Vyhovující konstelace clonek je v tabulce 4-2.

č. měření	tlak p_1	tlak p_2	teplota t_1	teplota sytosti t_{s1}	teplota t_2	hmotnostní průtok
	[MPa]	[MPa]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/hod]
1	12,4	0	302	333,22	93	48,41
2	13	0	301	336,67	95	51,86
3	12,4	0	303	333,22	96	36,64
4	12,1	0	302	331,45	94	35,01

Tabulka 4-1 – experiment 20. 1. 2015

d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	d_4 [mm]	d_5 [mm]	d_6 [mm]	d_7 [mm]
0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,6	2,2

Tabulka 4-2 - průměry clonek po přestavení

4.1.2. Plzeňská teplárna, pára, 22. 1. 2015, Mochovce

Toto měření proběhlo za stejné konstelace mařiče jako poslední dvě měření z 22. 1. 2015.

č. měření	tlak p_1	tlak p_2	teplota t_1	teplota sytosti t_{s1}	teplota t_2	hmotnostní průtok
	[MPa]	[MPa]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/hod]
5	11	0	301	324,68	92	31,21
6	12,3	0	302	332,64	93	34,89
7	12,9	0	302	336,10	93	37,37

Tabulka 4-3 – experiment 22. 1. 2015

4.1.3. Plzeňská teplárna, pára, 12. 4. 2016, Temelín

Požadovaným hmotnostním průtokem pro tento mařič při vstupním tlaku cca 14 MPa bylo 28 kg/hod. Tento experiment tedy posloužil jako vstup pro úpravu mařiče pro příští zkoušku.

č. měření	tlak p_1	tlak p_2	teplota t_1	teplota sytosti t_{s1}	teplota t_2	hmotnostní průtok
	[MPa]	[MPa]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/hod]
8	14	0	290	342,16	85	55,46
9	13,6	0	290	340,00	85	52,04

Tabulka 4-4 – experiment 12. 4. 2016

4.1.4. Plzeňská teplárna, pára, 27. 4. 2016, Temelín

Tato zkouška mařiče byla provedena se stejnými požadavky jako ta předchozí. Použité průměry clonek jsou v tabulce 4-6.

č. měření	tlak p_1	tlak p_2	teplota t_1	teplota sytosti t_{s1}	teplota t_2	hmotnostní průtok
	[MPa]	[MPa]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/hod]
10	13	0	262	336,67	82	25,43
11	13	0	261	336,67	82	25,25
12	13,5	0	268	339,45	91	26,1
13	14,1	0	277	342,69	98	27,55
14	14	0	265	342,16	89	27,33
15	13,7	0	260	340,54	82	30,83

Tabulka 4-5 – experiment 27. 4. 2016

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,75	0,75	0,80	0,85	0,85	0,90	1,4	1,6	2	3

Tabulka 4-6 - průměry clonek

4.1.5. Orlík, voda, 13. 11. 2017, Temelín

Tato zkouška byla provedena za účelem ověření hmotnostního průtoku mařičem, pokud by médiem nebyla pára, ale voda. Je tak ověřena schopnost mařiče vykonávat svoji funkci v jaderné elektrárně, i pokud by jím měla protékat již zcela zkondenzovaná pára.

č. měření	tlak p_1	tlak p_2	teplota t_1	hmotnostní průtok
	[MPa]	[MPa]	[°C]	[kg/hod]
16	2	0	20	44,78
17	8	0	20	73,04
18	15,7	0	20	102,47
19	15,7	0	20	102,69
20	15,7	0	20	102,29

Tabulka 4-7 – experiment 13. 11. 2017

4.2. Výpočtový model

Výpočet tlakové ztráty je proveden dvěma přístupy. Jejich klady a zápory jsou porovnány v závěru práce. První je založen na využití vzorců pro koeficienty místní tlakové ztráty. Pomocí těchto koeficientů a vstupních parametrů je spočtena tlaková ztráta na jednotlivých clonkách a následně i hmotnostní průtok clonkou.

Druhý přístup využívá opačného postupu. Dbá nejdříve na dodržení změřeného hmotnostního průtoku a z něj potom určuje tlakovou ztrátu jednotlivých clonek. Jednotlivé postupy jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

Výpočtové modely jsou sestaveny za použití výsledků výše popsaných experimentů v programu Microsoft Excel ve formě tabulky. Pro model jsou využita měření číslo 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13 a 14. Tento soubor je přiložen k diplomové práci jako Příloha č. 1. Tabulka obsahuje různé postupy výpočtů, jež se zakládají na rovnicích z kapitol 2 a 3. Na listech tabulky „Idelchik“ a „VDI“ jsou zpracovány postupy výpočtu, jež jsou založeny na vzorcích

pro koeficient tlakové ztráty. Na listech „Morris_EMO“ a „Morris_ETE“ je zpracován postup výpočtu podle S. D. Morrise. Listy „výsl_Idelchik“, „výsl_VDI“ a „výsl_Morris“ obsahují nejdůležitější výstupní hodnoty výpočtů, které jsou zpracovány v tabulkách a grafech. Na listě „srovnání“ je zpracováno srovnání všech tří výpočtových modelů taktéž ve formě tabulek a grafů.

V tabulkách jsou využívány funkce makra Excel Steam Tables [23] pro vyčíslení různých parametrů (entalpie, suchost, teploty sytosti atd.). Na listech „Properties“ a „Functions“ jsou pak pomocné údaje právě pro toto makro. Hodnoty Poissonovy konstanty jsou určeny na základě parametrů páry programem TVVP [30]. Výpočtové modely jsou navrženy pro stlačitelné izoentalpické dvoufázové proudění. Buňky s číselnými hodnotami jsou podbarveny podle toho, jakou úlohu ve výpočtu hrají.

Listy s výpočtovými modely se skládají ze sloupců výpočtů, kde každý sloupec reprezentuje jeden element, na němž vzniká tlaková ztráta (clonku), a výpočty potřebné pro spočtení této ztráty.

4.2.1. Idelchik

Tento postup je založen na rovnici 2.53. Sloupce tabulky jsou rozděleny do tří oddílů, které jsou opatřeny legendou. Do sekce „Input“ je zadán tlak a skutečný změřený hmotnostní průtok. V této sekci je popsán stav média před clonou. Jako vstupní teplota je volena teplota sytosti zvětšená o $0,1^{\circ}\text{C}$. Pomocí [23] jsou dále zjištěny hodnoty entropie, entalpie (ta zůstává konstantní v celém výpočtu), suchost a měrné objemy syté kapaliny i páry. Z rovnice 2.12 je vypočten homogenní měrný objem. Jeho převrácenou hodnotou je hustota, která vstupuje do výpočtu kinematické viskozity. Poissonova konstanta je určena z teploty a tlaku. Rovnice 2.50 slouží pro výpočet kritického tlakového poměru.

V sekci „Geometrie“ je definována geometrie clony. Ze zadaných průměrů a tloušťky clony jsou vypočteny jednotlivé průtočné průřezy, charakteristický poměr l/D_h a parametr τ .

Sekce „Output“ obsahuje parametry průtoku clonou a výstupní parametry média za clonou. Rychlost zvuku je zjištěna funkcí. Předpokládaná rychlost ve clonce je spočtena rovnicí 2.22 ze vstupní hustoty, skutečného hmotnostního průtoku a průtočného průřezu clonky. Dále je možno spočítat Reynoldsovo číslo (2.58) a koeficient tření (2.57, 2.59 nebo 2.60). Podle 2.53 je pak spočten ztrátový koeficient. Pomocí něj Idelchik definuje také kontrakční koeficient (2.44). Tlakový spád je pak spočten z rovnice 2.34. Jeho hodnota je pak odečtena od vstupního tlaku. Tak je získán výstupní tlak. Pomocí něj a rovnice 2.40 nebo 2.41 je ověřen hmotnostní průtok. Informativně je uvedena teplota sytosti. Skutečná teplota je aproximována rovnicí pro adiabatický děj (2.7). Z výstupního tlaku a teploty jsou určeny další parametry (suchost, měrný objem, hustota). Poslední hodnota je rozdílem skutečného a vypočteného hmotnostního průtoku.

Výstupní hodnoty clony jsou zároveň vstupními hodnotami pro další clonu. Poissonovu konstantu je nutno odhadnout pro každou clonu pomocí teploty sytosti při konkrétním tlaku. Pomocí tlaku a teploty sytosti je také odhadována rychlost zvuku. Stejný princip výpočtu pro všechny clony teoreticky dovoluje kopírováním sloupců za sebe definovat takřka neomezené množství clon.

4.2.2. VDI

Tento výpočtový model je velmi podobný přechozímu modelu. Rozdíl je pouze ve vzorci pro ztrátový koeficient clonky. V tomto případě je počítán ze vzorce 2.65.

4.2.3. Morris

Na rozdíl od prvních dvou modelů je u Morrisova postupu sekci výpočtu pět. Sekce „Input“ i „Geometrie“ jsou takřka identické jako v prvních dvou případech. V sekci „m parametry“ jsou definovány potřebné parametry pro výpočet hmotnostního průtoku. Rovnice pro tyto parametry jsou popsány v kapitolách 2.3.7 a 2.3.8. Průtok první clonou je uvažován jako jednofázový, další clony již počítají s mokrou párou.

Morrisův výpočet nepracuje se ztrátovými koeficienty. Pro dosažení požadovaného hmotnostního průtoku je tedy v případě jednofázového proudění nutné odhadnout tlakový poměr η_t . Prvotní odhad je zanesen do výpočtu a nástrojem „Hledání řešení“ programu Microsoft Excel je pomocí iterací tlakový poměr měněn, dokud počítaný hmotnostní průtok neodpovídá změřenému hmotnostnímu průtoku. Iteračně je tak vypočítán výstupní tlak.

V sekci „Output“ jsou kromě výstupního tlaku stejným principem jako v předchozích případech dopočteny i ostatní výstupní parametry.

Hodnoty výstupního tlaku při dvoufázovém proudění je dosaženo také iteračně. Oproti jednofázovému proudění je měněn přímo výstupní tlak. Spíše informativně je pak v sekci „Iterace“ opět iterací spočítán ztrátový koeficient clony tak, aby tlakový spád na cloně odpovídal rozdílu vstupního a výstupního tlaku.

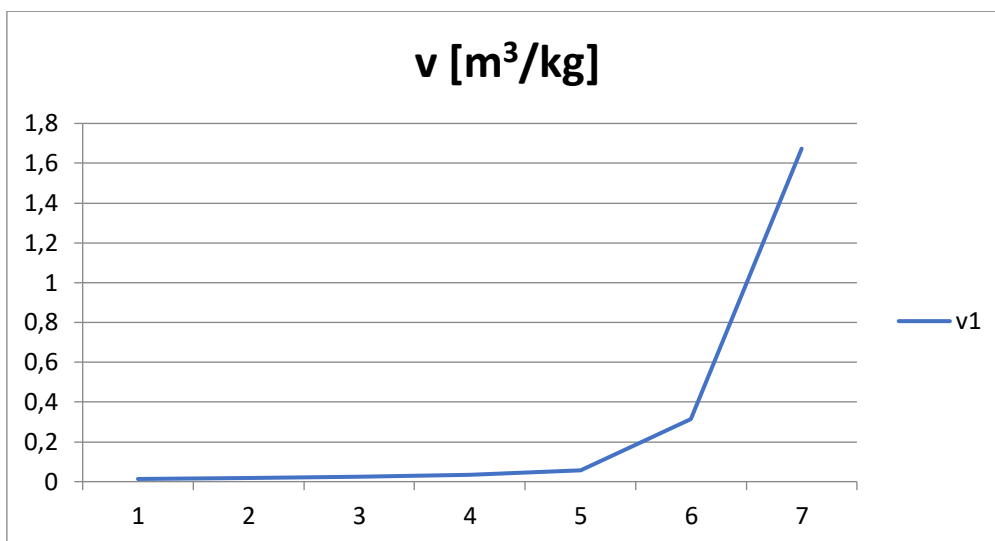
4.3. Zhodnocení výsledků

V této kapitole jsou zhodnoceny a porovnány výsledky výpočtu a experimentu. Z výsledků výpočtu jsou použity ty, které jsou pro porovnání s experimentem nejsignifikantnější. Kompletní výsledky jsou ve formě tabulek a grafů v Příloze č. 1. Ve výpočtech je přijata řada zjednodušení, jejichž vliv je také diskutován.

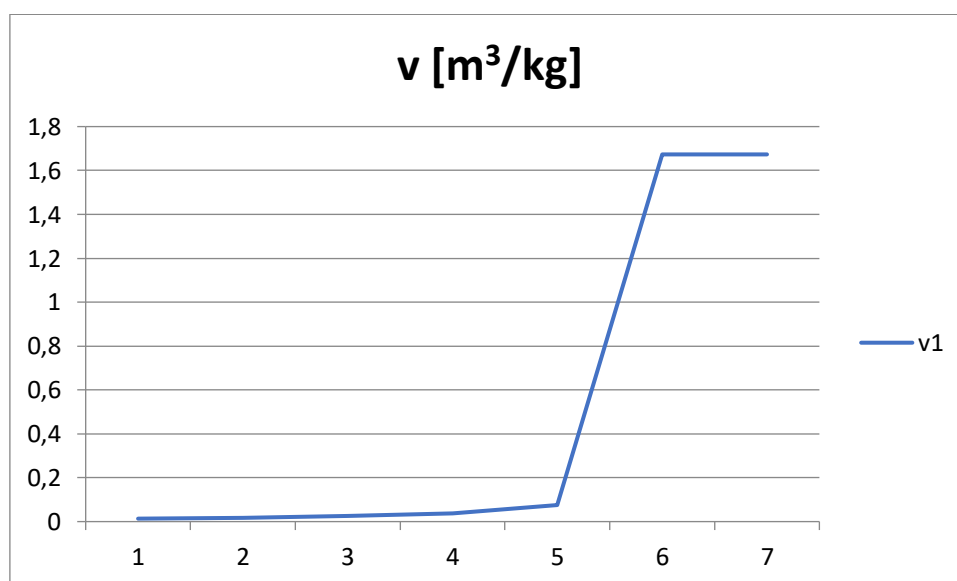
4.3.1. Idelchik, VDI

Přístupy k výpočtovému modelu podle Idelchika a VDI obsahují mnoho zjednodušení. Primárně neuvažují izoentalpické proudění, v rovnici pro hmotnostní průtok není zahrnuta suchost, pro výpočet rychlosti média není uvažována změna hustoty a kinematické viskozity média ve clonce. Diskutabilní je také vhodnost použití vztahů pro ztrátové koeficienty v případě dvoufázového proudění a pro clonky s takto malým průměrem. Dalším zjednodušením je určení Poissonovy konstanty pomocí nikoliv skutečné teploty, ale teploty sytosti. Stejným neduhem trpí i určení rychlosti zvuku.

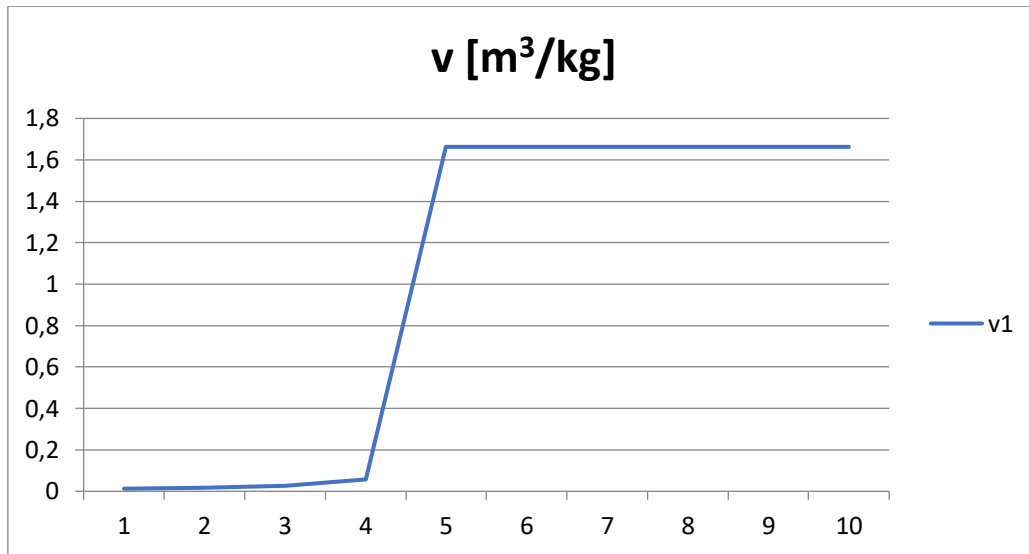
Z těchto zjednodušení pak plyne značná nepřesnost obou metod, která se s každou přibývajícím clonou zvětšuje, až ve většině případů výpočet zcela kolabuje. Podle těchto metod se s každou další clonou hmotnostní průtok zmenšuje, což odporuje zákonu o zachování hmoty. Také hodnoty tlakového spádu dosahují nereálných hodnot. Vlivem velké expanze média na jednotlivých clonkách se zvyšuje rychlost, což má za následek to, že přetlak je často zredukován již na několika prvních clonách. Tato nedokonalost je dobře patrná z vývoje měrného objemu na clonách. Jeho typický průběh je demonstrován v grafech 4-1, 4-2, 4-3 a 4-4. Na svislé ose jsou hodnoty měrného objemu, na vodorovné ose pak pozice jednotlivých clonek.



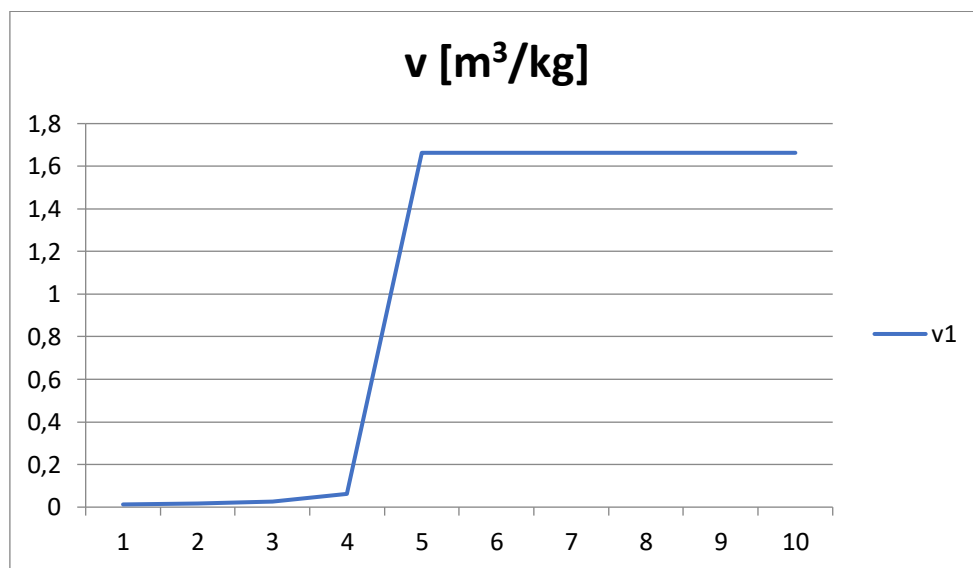
Graf 4-1 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik



Graf 4-2 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI

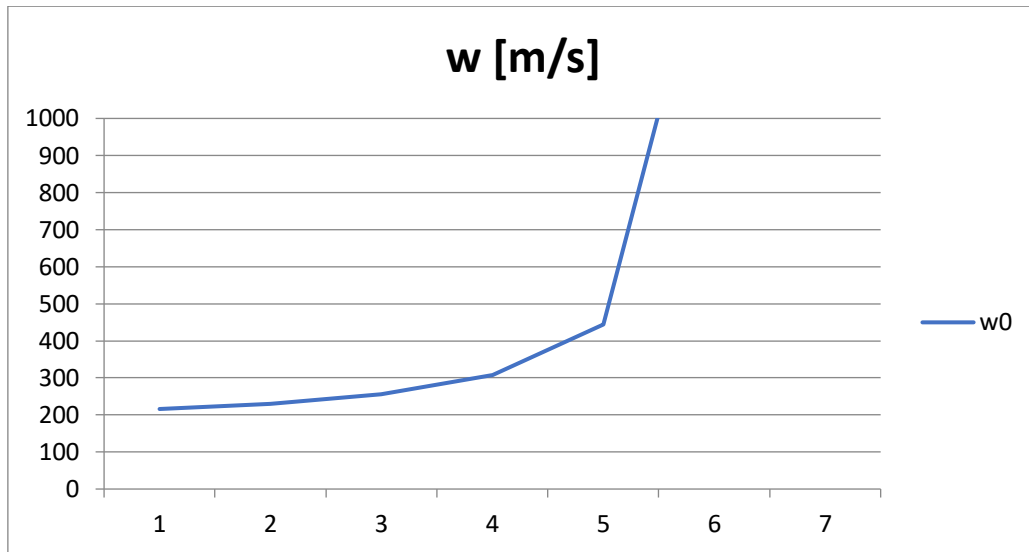


Graf 4-3 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik

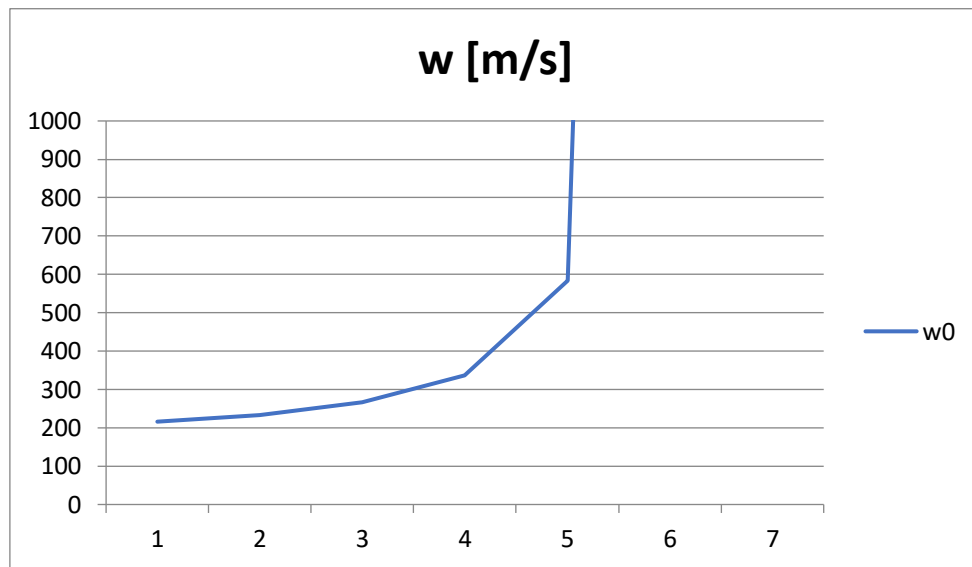


Graf 4-4 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI

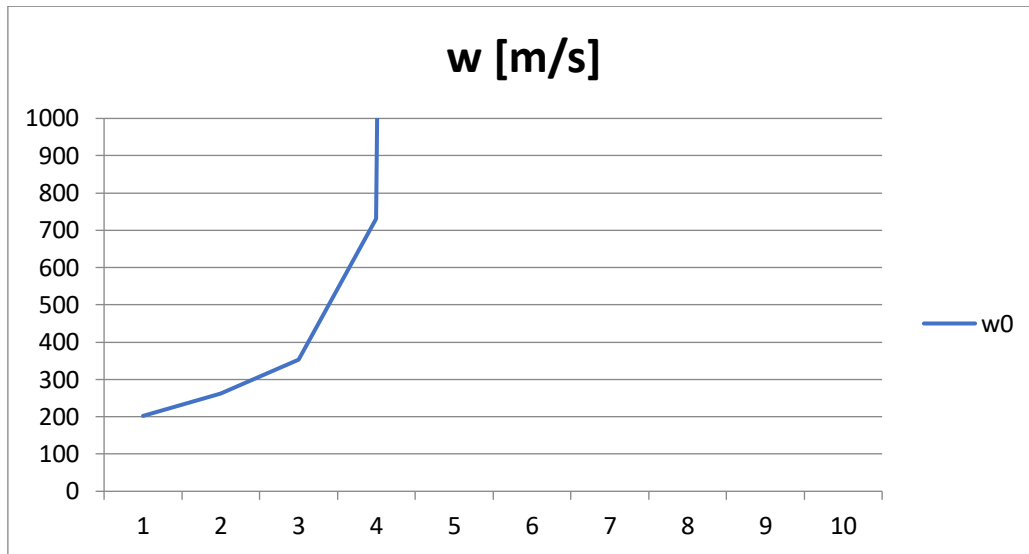
Růst rychlosti je zjevný z grafů 4-5, 4-6, 4-7 a 4-8. Na svislé ose jsou hodnoty rychlosti ve clonce, na vodorovné ose jsou pozice jednotlivých clonek.



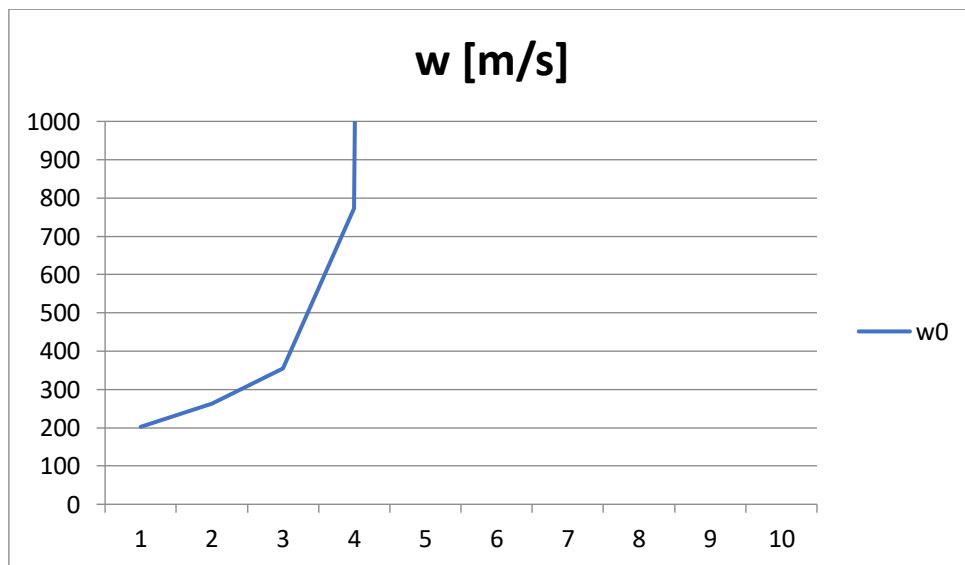
Graf 4-5 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik



Graf 4-6 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI

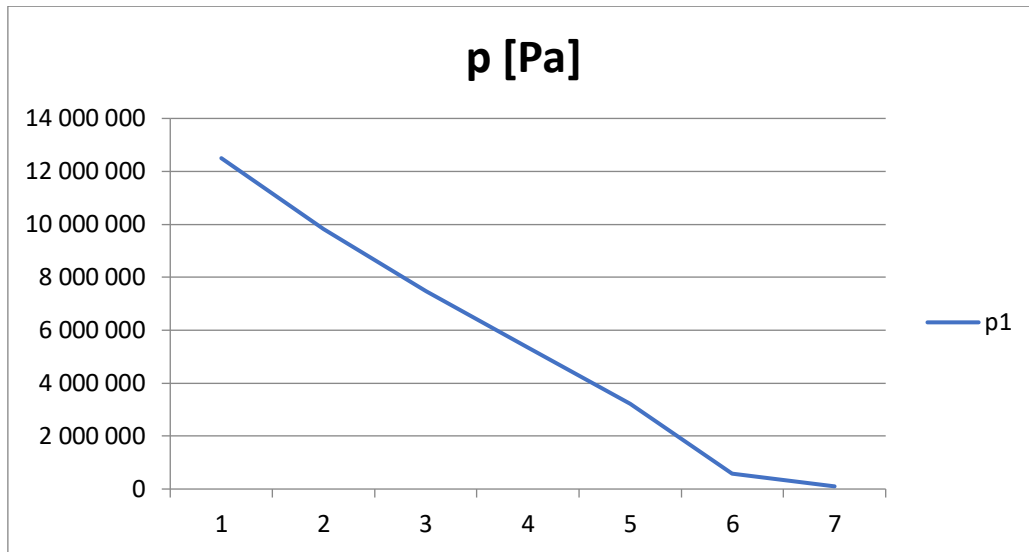


Graf 4-7 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik

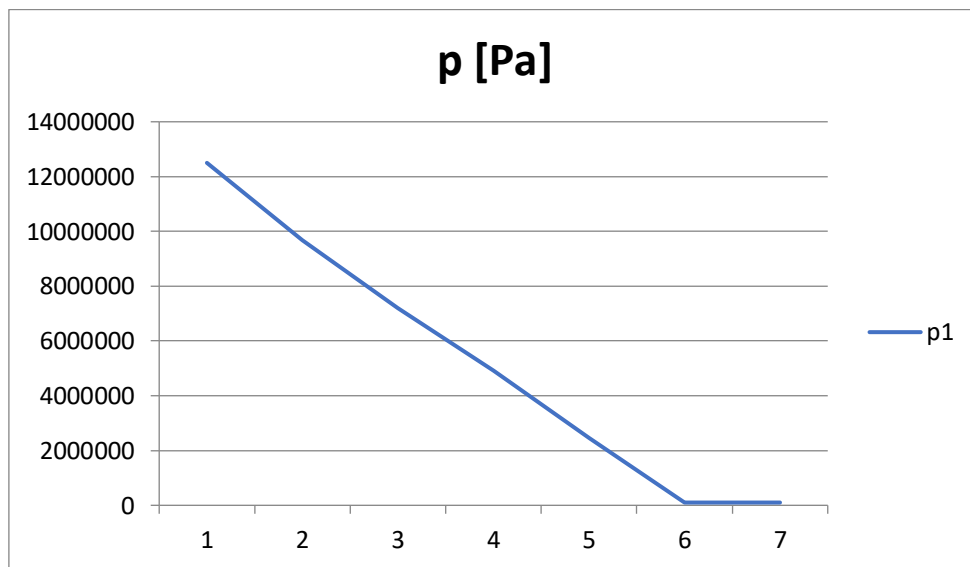


Graf 4-8 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI

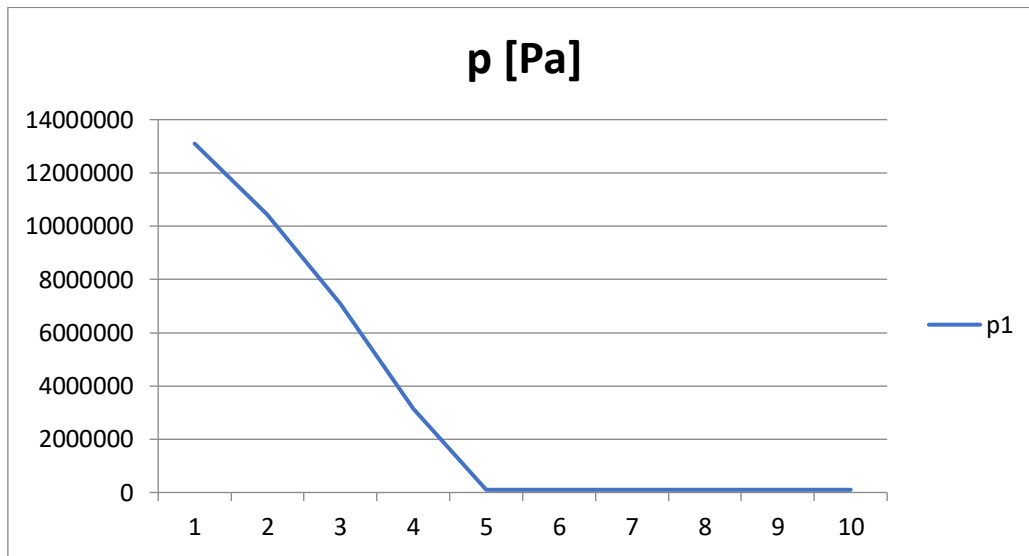
Důsledkem toho je prudký pokles tlaku patrný na grafech 4-9, 4-10, 4-11 a 4-12. Na svislé ose je hodnota tlaku, na vodorovné ose jsou pozice jednotlivých clon.



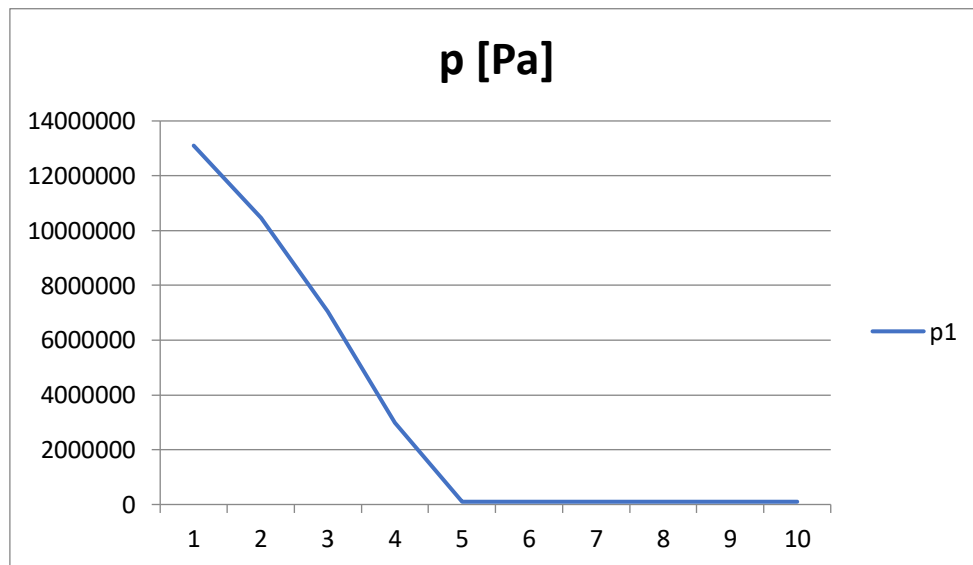
Graf 4-9 - vývoj tlaků za clonkou na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik



Graf 4-10 - vývoj tlaků za clonkou na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI

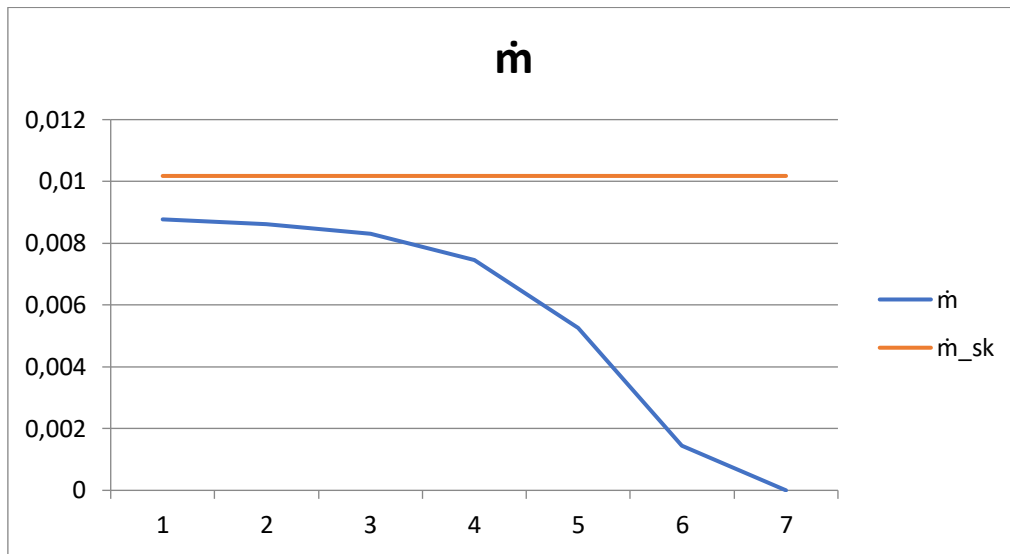


Graf 4-11 - vývoj tlaků za clonkou na maříči pro ETE, č. měření 10, Idelchik

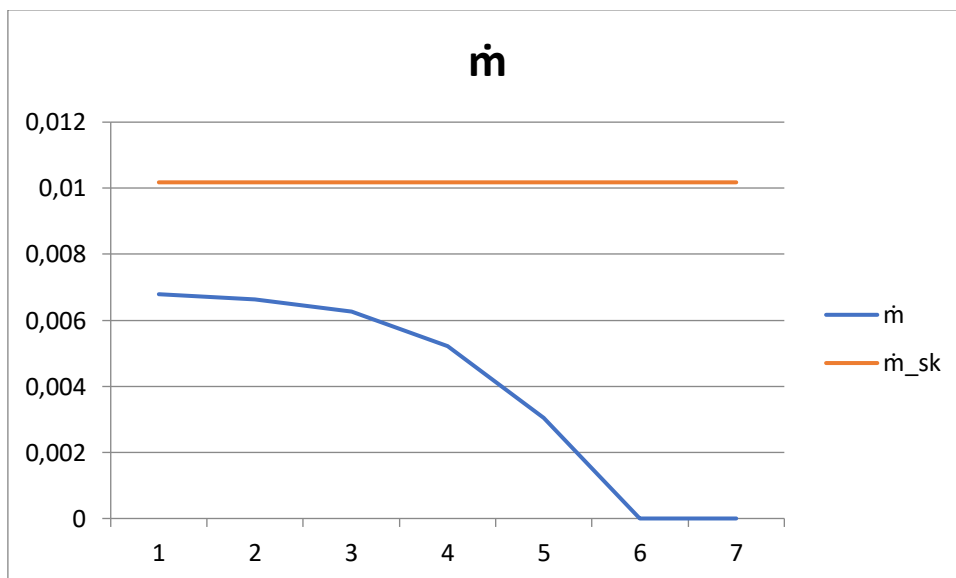


Graf 4-12 - vývoj tlaku za clonkou na maříči pro ETE, č. měření 10, VDI

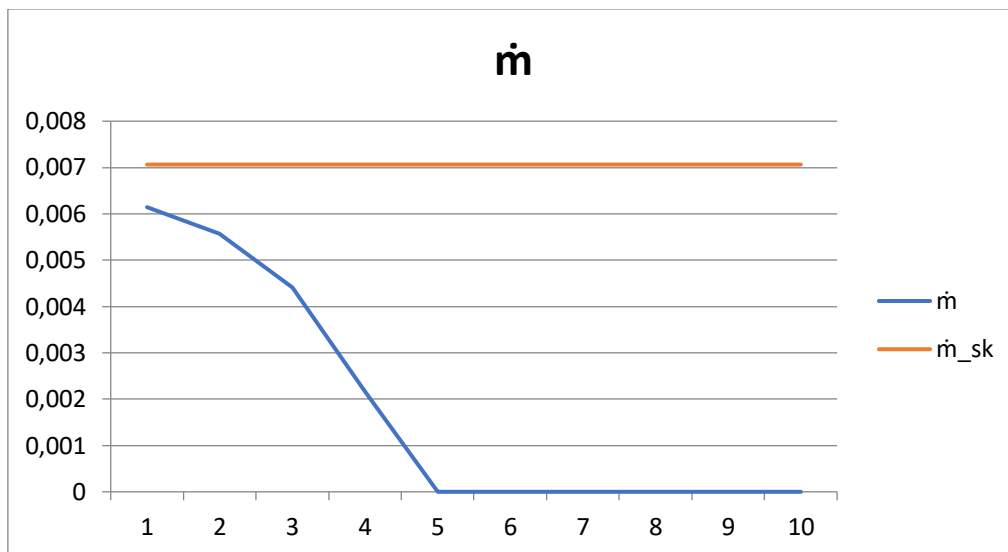
Všechny tyto faktory mají vliv na velký rozdíl ve skutečném a vypočteném hmotnostním průtoku.



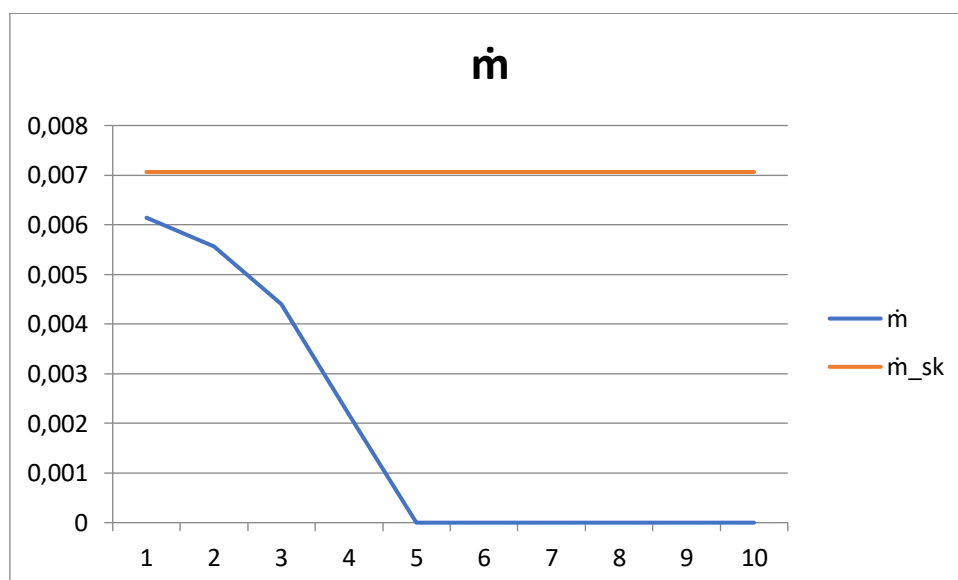
Graf 4-13 – porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik



Graf 4-14 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI



Graf 4-15 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik



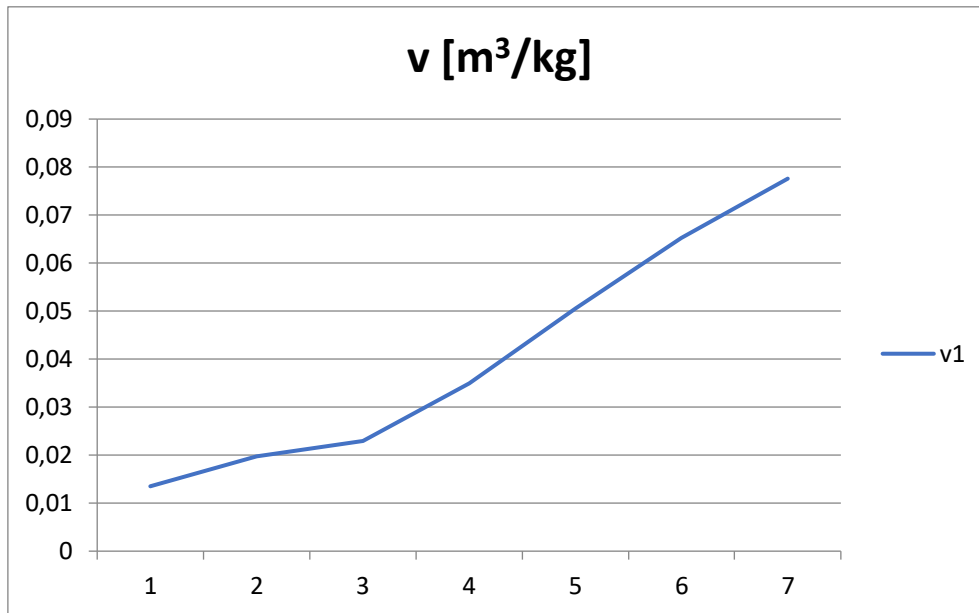
Graf 4-16 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI

4.3.2. Morris

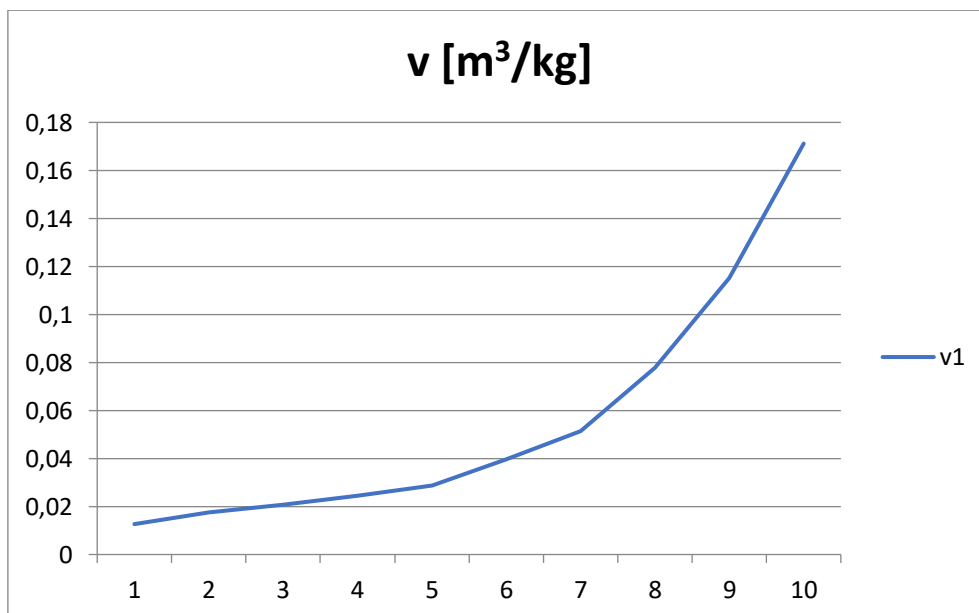
Oproti prvním dvěma přístupům je Morrisův způsob vyvinut přímo pro dvoufázové proudění. Zahrnuje v sobě i změnu parametrů ve cloně. Hmotnostní průtok je tedy dodržen ve všech případech. Parametrem, který se liší oproti experimentu je hodnota výstupního tlaku za poslední clonkou. Zde je na místě připomenout, že za mařičem byl při experimentu zapojen ještě chladič, v němž zbylá pára kondenzuje. Na něm také vzniká tlaková ztráta. Kondenzát vytéká do nádoby a prostředí s atmosférickým tlakem. Skutečný výstupní tlak by tedy bylo třeba měřit přímo za mařičem. Z uvedených skutečností je zřejmé, že je možné brát hodnotu výstupního tlaku pouze jako orientační.

Dalším tématem k diskusi je výskyt kritického tlakového poměru v některých clonách. Důvodem může být nepřesný odhad hustoty média ve cloně případně vliv proměny jiných parametrů ve cloně.

Typické vývoje jednotlivých veličin jsou patrné z následujících grafů.

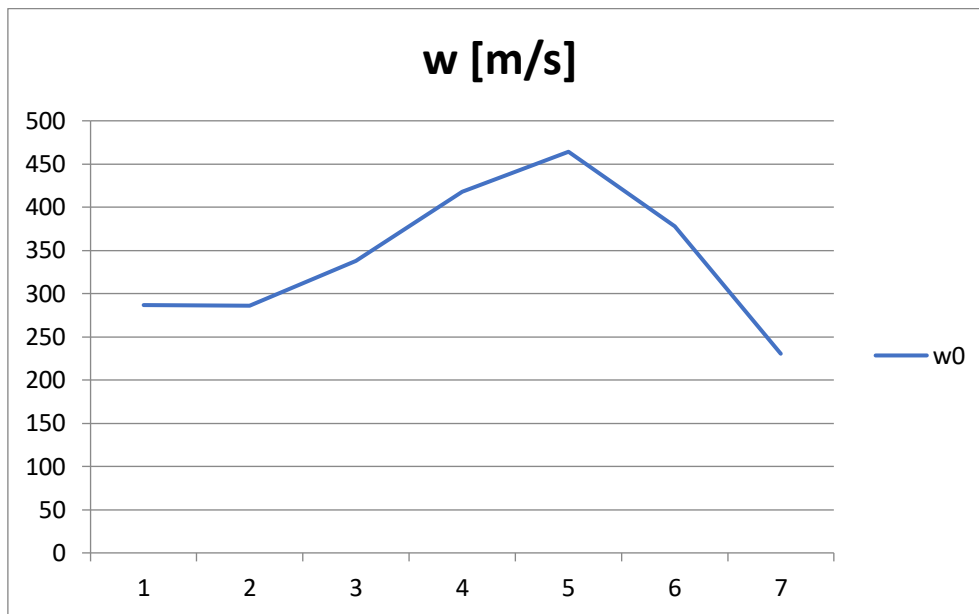


Graf 4-17 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, Morris

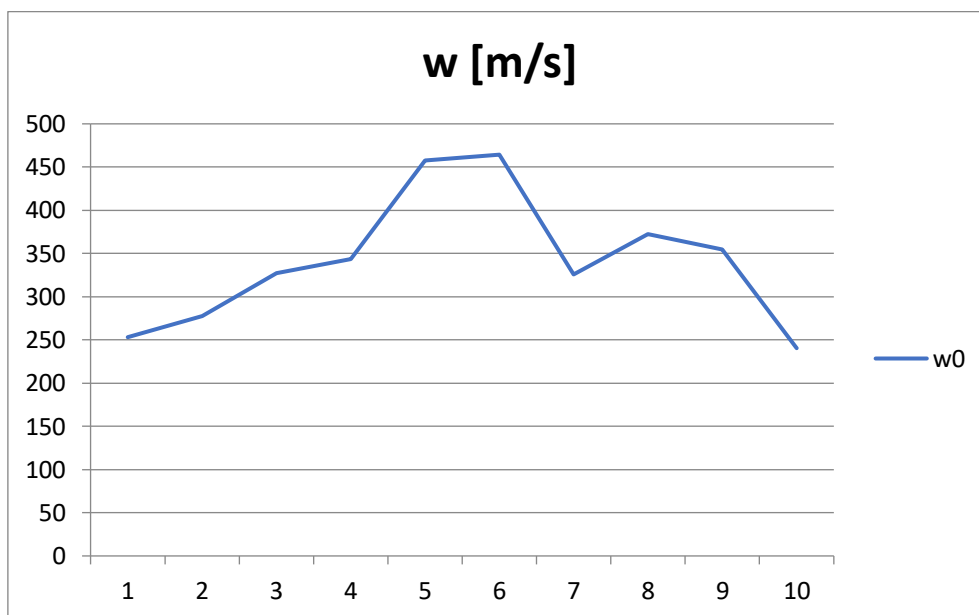


Graf 4-18 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, Morris

Na grafech s rychlostmi lze pozorovat vliv zvětšujících se otvorů v několika posledních clonách na rychlost.

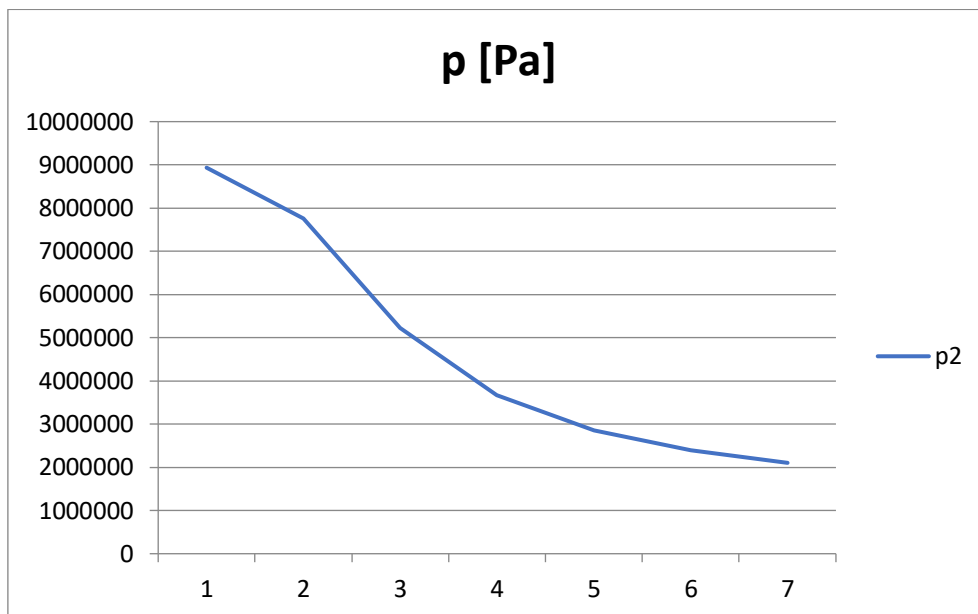


Graf 4-19 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, Morris

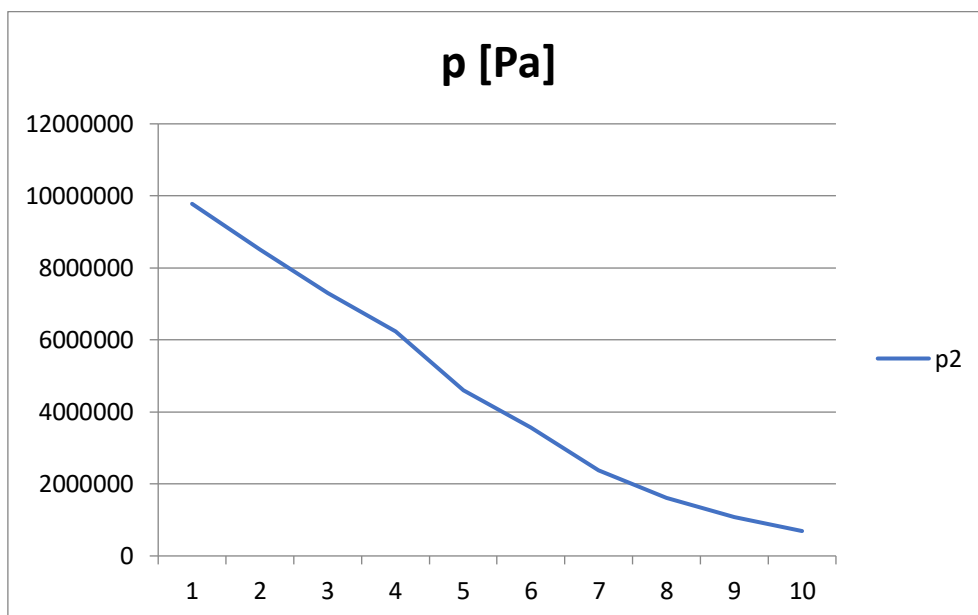


Graf 4-20 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, Morris

Hodnoty výstupních tlaků se podle výpočtu u mařiče pro mochoveckou elektrárnu pohybují kolem hodnoty 2 MPa, u mařiče pro temelínskou elektrárnu to je přibližně 1 MPa.



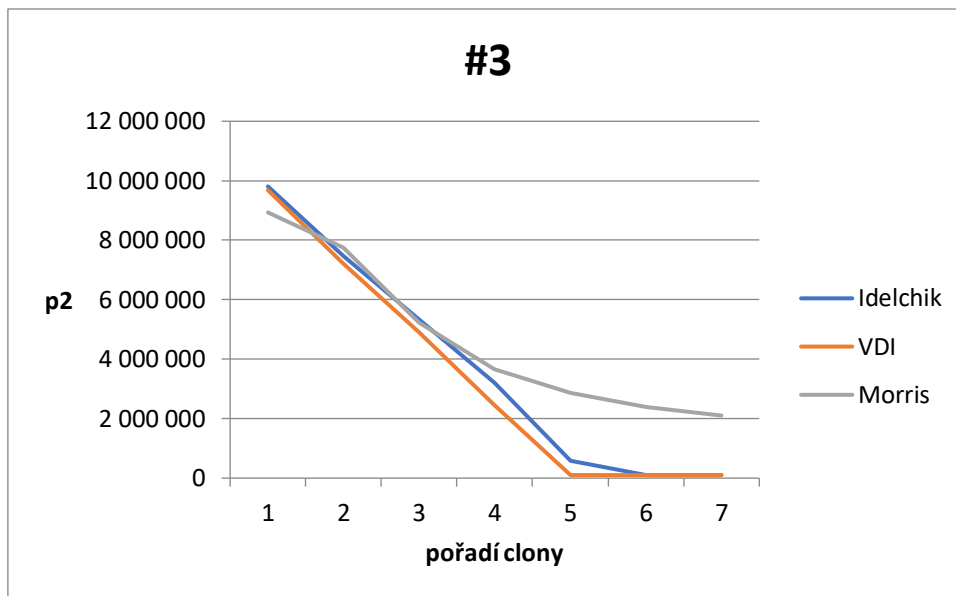
Graf 4-21 - vývoj tlaku za clonkou na maříči pro EMO, č. měření 3, Morris



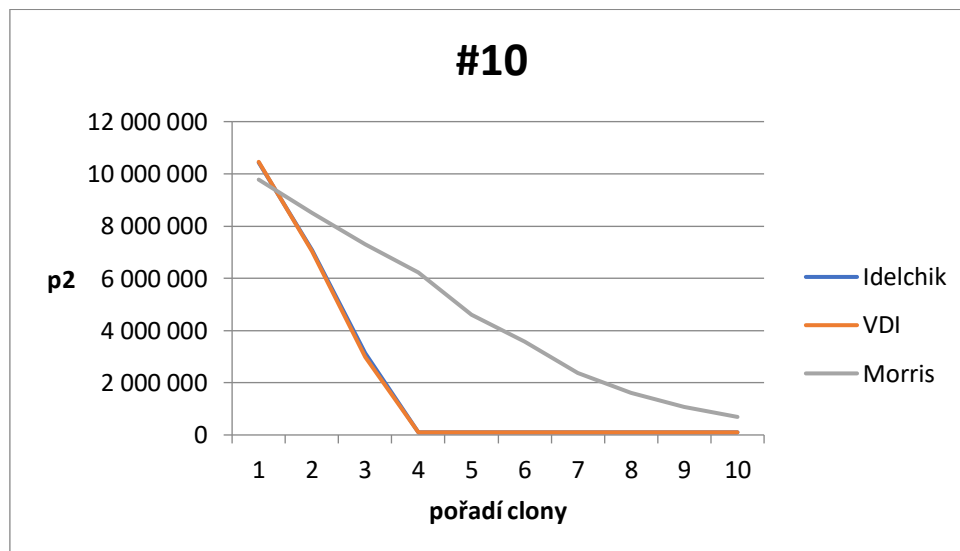
Graf 4-22 - vývoj tlaku za clonkou na maříči pro ETE, č. měření 10, Morris

4.3.3. Srovnání metod

Z uvedených skutečností plyne, že výpočtový model, který používá Morrisovy vzorce, se zřejmě blíží realitě o poznání více než modely založené na přímém výpočtu tlakové ztráty. Tento rozdíl je dobře patrný z porovnání vývinu tlaku za jednotlivými clonami v jednom grafu.

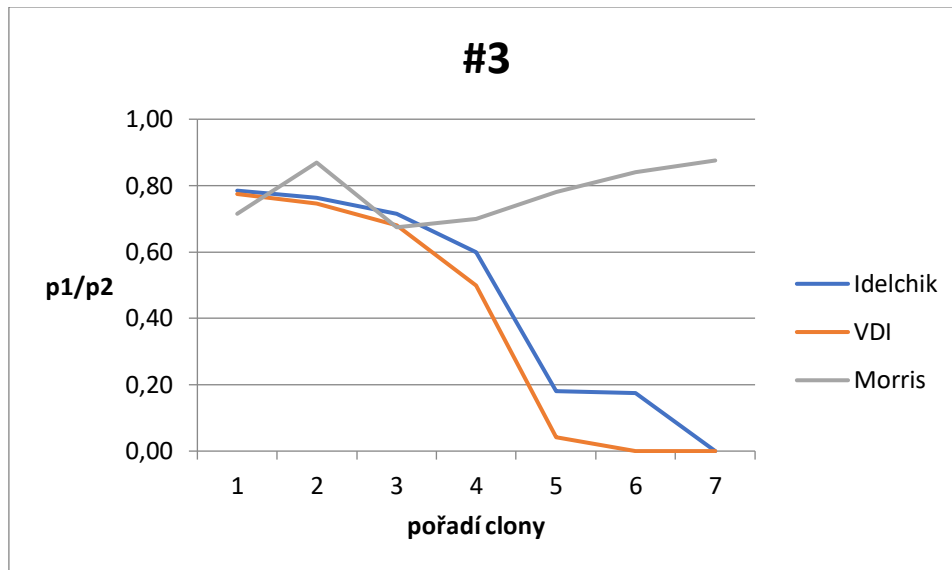


Graf 4-23 – porovnání vývoje tlaků za clonkami, č. měření 3, EMO

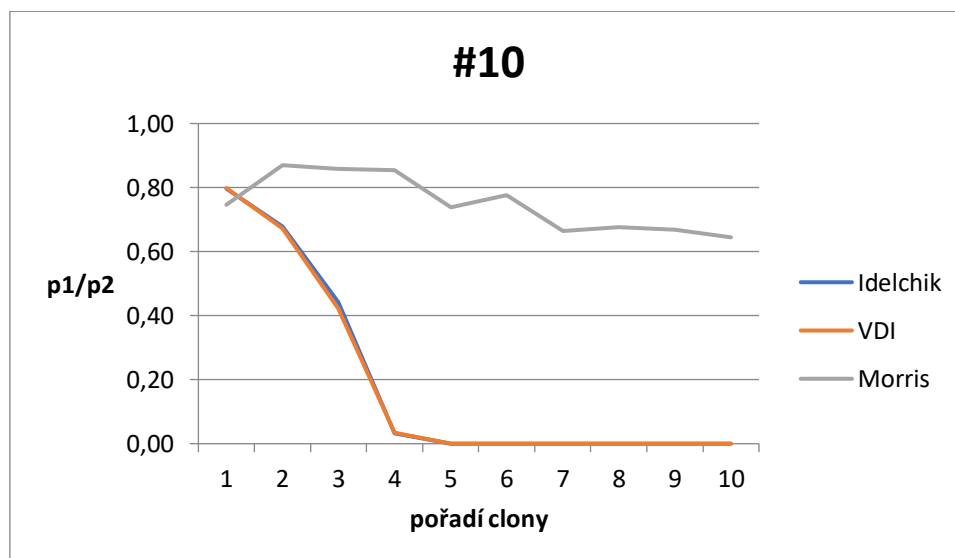


Graf 4-24 - porovnání vývoje tlaků za clonkami, č. měření 10, ETE

V porovnání s rozdílem oproti modelu „Morris“ lze oba modely založené na výpočtu ztrátového koeficientu označit za modely mající velmi podobné výsledky. Rozdíl oproti „Morrisovi“ je dobře patrný z porovnání tlakových spádů na jednotlivých clonách.



Graf 4-25 - porovnání vývoje tlakového spádu, č. měření 3, EMO



Graf 4-26 - porovnání vývoje tlakového spádu, č. měření 10, ETE

V písemné části této práce jsou uvedeny pouze některé průběhy jednotlivých veličin. Podrobné výsledky jsou obsaženy v Příloze č. 1 ve čtyřech listech s výstupy výpočtů.

4.4. Návrh mařiče energie

Je zřejmé, že použití dostatečně spolehlivého modelu místo experimentu ušetří při návrhu nového mařiče značné množství času i finančních prostředků. Z uvedených modelů lze vzhledem k jejich souladu s provedenými experimenty použít především model s Morrisovými vzorci. Druhé dva modely lze pro tento typ mařičů použít pro velmi hrubý odhad návrhu první clonky.

Výpočtový model „Morris“ lze použít pro návrh nových mařičů případně pro modifikaci velikosti otvorů clonek. Prvním krokem je stanovení požadovaného hmotnostního průtoku. Dále je potřeba zvolit tlakový spád na jednotlivých clonách. Výpočtář tak získá odhad parametrů ve cloně a volí průměr otvoru tak, aby rychlost média ve clonce byla dostatečně hluboko pod hodnotou rychlosti zvuku.

5 Závěr

V diplomové práci je zpracována problematika tlakové ztráty na mařiči energie. Médium v tomto druhu mařiče je především pára. Z tohoto důvodu je v úvodu práce akcentována problematika proudění plynů. Dalším krokem pak je výpočet ztrátových součinitelů především škrťících clon, ze kterých se mařiče energie skládají. Následuje technický popis funkce mařiče energie v systému pro spalování vodíku na jaderné elektrárně, technických řešení různých mařičů energie a materiálů pro ně vhodných. V další části je popsán experiment, na němž je založena validace výpočtových modelů. Tyto modely jsou popsány, aplikovány a jejich výstupy jsou porovnány se zmiňovaným experimentem. Součástí práce jsou výpočtové modely a výkresy dvou mařičů energie.

Mařič energie je z pohledu ověření výpočtových modelů „black boxem“. Z obecné povahy proudění tekutin vyplývá, že výpočtový model je skutečně pouze modelem. Výskyt dvoufázového proudění obtížnost výpočtu také značně zvyšuje. Průběžné parametry média na jednotlivých clonách se od modelů mohou lišit. Z porovnání tří použitých modelů však jasně vyplývá, že hodnotám získaným z experimentů se podstatně více blíží výpočtový model založený na vzorcích S. D. Morrise. Modely „Idelchik“ a „VDI“ jsou velmi nepřesné a použitelné pouze pro hrubý odhad stavu média za první clonou. Pro ještě přesnější ověření modelu „Morris“ by bylo vhodné provést větší počet experimentů. Tyto experimenty by mohly být ještě přínosnější než již provedené experimenty, pokud by byl měřen i tlak přímo na výstupu z mařiče a také pokud by byla měřena přímo teplota média, nikoliv pouze teplota povrchu potrubí, v němž médium proudí. Dalším krokem pro zpřesnění výpočtu by byl CFD výpočet.

Přínosem práce je vyvinutí modelů pro výpočet tlakové ztráty mařiče energie a ověření jeho hltnosti. Zároveň je práci doporučeno, pro jaké aplikace je vhodné tyto modely používat. Pomocí těchto modelů je také možné vytvořit návrh nových mařičů. Práce rovněž navrhuje kroky pro zpřesnění modelů. Dalším návrhem jsou také doporučení pro budoucí experimenty, aby mohly být lépe využity pro validaci modelů.

Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie*. Brno: Jiří Škorpík, 2006.
- [2] KALČÍK, Josef, SYKORA, Karel. *Technická termomechanika*. Praha: ACADEMIA, 1973.
- [3] BENEDICT, Robert P. *Fundamentals of Pipe Flow*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [4] LINHART, Jiří. *Mechanika tekutin I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7
- [5] NOSKIEVIČ, Jaromír a kol. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987.
- [6] KLIMKO, Marek. Ztráty při proudění potrubím, *Mechanika tekutin I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [7] CARO, C. G., PEDLEY, T. J., SCHROTER, R. C., SEED, W. A. *The Mechanics of The Circulation*. Oxford: Oxford University Press, 1978. ISBN 0-19-263323-6
- [8] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [9] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: ACADEMIA, 1969.
- [10] NATIVE DYNAMICS. *Cavitation in Restriction Orifices and Valves*. https://neutrium.net/fluid_flow/cavitation-in-restriction-orifices/. 2012.
- [11] <https://gurumavin.com/effect-of-cavitation-by-tiny-bubbles-over-tooth-cleaning-identified/cavitation-diagram-1/>
- [12] IDELCHIK, I. E. *Handbook of Hydraulic Resistanc*. 3. vydání, New York: Begell House 1996. ISBN 1-56700-074-6
- [13] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. *VDI-Wärmeatlas*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [14] PULC, Martin, SLACH, Jiří. *Systém kompenzace objemu – odvod vodíku z pojišťovacích a odlehčovacích ventilů u VVER 440 a VVER 1000*. Praha: České jaderné fórum, 2013.
- [15] Technická dokumentace Škoda JS a. s.
- [16] DELTAFLUID. *Datasheet: Multi-stage restriction orifice*. 2016. Dostupné z http://www.irimex.ru/files/catrubs/files/9511/deltafluid_restriction_orifice_multistages_rev2_april_2016.pdf.
- [17] <https://hma-worldwide.com/wp-content/uploads/2018/03/INS-DS-0044-Multistage-Restriction-Orifice-Assembly.pdf>
- [18] [http://www.snplus.co.kr/product/flow/down/SOP\(ORIFICE%20PLATE\).pdf](http://www.snplus.co.kr/product/flow/down/SOP(ORIFICE%20PLATE).pdf)
- [19] https://www.tmtectomatic.com/wp-content/themes/Tectomatic_AlessandroConti/brochures/Brochure_26_04_2018.pdf
- [20] https://en.wika.com/upload/DS_FL1006_en_co_50634.pdf
- [21] <http://www.baliga.com/img/products/190Meter%20Run%20Assembly.pdf>
- [22] ROUL, Manmatha K., DASH, Sukanta K. *Single-Phase and Two-Phase Flow Through Thin and Thick Orifices in Horizontal Pipes*. Bhadrak, Kharagpur: ASME, 2012.
- [23] HOLMGREN, Magnus. *IAPWS IF97 Excel Steam Tables ver 2.6*.
- [24] JANDOVÁ, Dagmar, FEKETE, Balazs, KASL, Josef, JÓNI, Bertalan. *Microstructure of 08Ch18N10T Austenitic Steel After Thermo-Mechanical Fatigue Tests*. Plzeň: VZÚ Plzeň, 2015.
- [25] SUCHÝ, Jakub. *Mařič tlakové energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017.
- [26] LINSTROM, P.J., MALLARD, W.G. *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [27] JINEK, Josef. *Součinitel výtoku rozměrově malých ostrohranných kruhových otvorů*. Brno: VUT v Brně, 2013.

- [28] BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968.
- [29] MORRIS, S. D. *Compressible Gas-Liquid Flow through Pipeline Restrictions*. Ispra: Commission of the European Communities, 1991.
- [30] Program TVVP. ČEZ a. s., 1995.

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 - škrčení tekutiny na cloně a průběh statického tlaku [1]	4
Obrázek 2-2 - i-s diagram škrčení [1].....	4
Obrázek 2-3 – škrčení mokré a přehřáté páry v i-s diagramu [2]	5
Obrázek 2-4 - škrčení syté páry v –is diagramu [2]	6
Obrázek 2-5 – škrčení mokré páry v T-s diagramu [2]	6
Obrázek 2-6 - i-s diagram škrčení reálného plynu [1].....	7
Obrázek 2-7 - schéma náhlého rozšíření proudu [6]	9
Obrázek 2-8 - vena contracta [7].....	11
Obrázek 2-9 - mechanismus kolabující kavitace [11]	13
Obrázek 2-10 - porovnání jedno- a vícestupňového maříče [10].....	14
Obrázek 2-11 - schéma clony s nezanedbatelnou tloušťkou a jinými průřezy přívodního a vývodního potrubí [12]	15
Obrázek 2-12 - schéma clony s nezanedbatelnou tloušťkou a stejnými průřezy přívodního a vývodního potrubí [12]	18
Obrázek 2-13 - průběh tlaku v cloně podle VDI Heat Atlas [13]	20
Obrázek 2-14 - náhlé zúžení proudu [13]	21
Obrázek 2-15 - konfigurace clon pro výpočet podle Roula a Dashe (nahore tenká, dole tlustá clona) [22].....	25
Obrázek 3-1 - 3D model subsystému pro odvod vodíku	32
Obrázek 3-2 - 3D model sybsystému pro odvod vodíku	32
Obrázek 3-3 - vizualizace CFD simulace maříče Deltafluid [16].....	34
Obrázek 3-4 - maříč energie Deltafluid [16].....	34
Obrázek 3-5 - maříč energie HMA Instrumentation [17].....	35
Obrázek 3-6 - maříč energie SOG-42, Seojin [18].....	35
Obrázek 3-7 - maříč energie Tecnomatic [19]	36
Obrázek 3-8 - 3D vizualizace maříče SOG-42, Seojin [18]	36
Obrázek 3-9 - maříč energie WIKA [20].....	37
Obrázek 4-1 - schéma zapojení měření maříče energie na syté páře [15]	39

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 - závislost τ na l/Dh	16
Tabulka 2-2 - hodnoty koeficientů pro rovnici (2.32) [12].....	19
Tabulka 2-3 – číselné hodnoty závislosti k_M na M_1 a f	26
Tabulka 3-1 - chemické složení oceli 08Ch18N10T v procentech [24].....	37
Tabulka 4-1 – experiment 20. 1. 2015.....	40
Tabulka 4-2 - průměry clonek po přestavení	40
Tabulka 4-3 – experiment 22. 1. 2015.....	40
Tabulka 4-4 – experiment 12. 4. 2016.....	40
Tabulka 4-5 – experiment 27. 4. 2016.....	41
Tabulka 4-6 - průměry clonek.....	41
Tabulka 4-7 – experiment 13. 11. 2017.....	41

Seznam grafů

Graf 2-1 - závislost na teplotě a tlaku [8]	3
Graf 2-2 - závislost λ na Re [12]	16
Graf 2-3 - závislost λ na Re [12]	16
Graf 2-4 – závislost τ na l/D_h [12]	17
Graf 2-5 - závislost ztrátového koeficientu náhlého zúžení na Reynoldsově čísle a poměrů průtočných průřezů [13]	21
Graf 2-6 - závislost ztrátového koeficientu trubek s nezanedbanou drsností na Re a relativní drsnosti [13]	23
Graf 2-7 - graf závislosti k_M na M_1 a f.	26
Graf 4-1 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik	44
Graf 4-2 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI	44
Graf 4-3 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik	45
Graf 4-4 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI	45
Graf 4-5 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik	46
Graf 4-6 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI	46
Graf 4-7 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik	47
Graf 4-8 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI	47
Graf 4-9 - vývoj tlaků za clonkou na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik	48
Graf 4-10 - vývoj tlaků za clonkou na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI	48
Graf 4-11 - vývoj tlaků za clonkou na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik	49
Graf 4-12 - vývoj tlaku za clonkou na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI	49
Graf 4-13 – porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro EMO, č. měření 3, Idelchik	50
Graf 4-14 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro EMO, č. měření 3, VDI	50
Graf 4-15 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro ETE, č. měření 10, Idelchik	51
Graf 4-16 - porovnání hmotnostního průtoku na mařiči pro ETE, č. měření 10, VDI	51
Graf 4-17 - vývoj měrného objemu na mařiči pro EMO, č. měření 3, Morris	52
Graf 4-18 - vývoj měrného objemu na mařiči pro ETE, č. měření 10, Morris	52
Graf 4-19 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro EMO, č. měření 3, Morris	53
Graf 4-20 - vývoj rychlosti ve clonce na mařiči pro ETE, č. měření 10, Morris	53
Graf 4-21 - vývoj tlaku za clonkou na mařiči pro EMO, č. měření 3, Morris	54
Graf 4-22 - vývoj tlaku za clonkou na mařiči pro ETE, č. měření 10, Morris	54
Graf 4-23 – porovnání vývoje tlaků za clonkami, č. měření 3, EMO	55
Graf 4-24 - porovnání vývoje tlaků za clonkami, č. měření 10, ETE	55
Graf 4-25 - porovnání vývoje tlakového spádu, č. měření 3, EMO	56
Graf 4-26 - porovnání vývoje tlakového spádu, č. měření 10, ETE	56

Seznam příloh

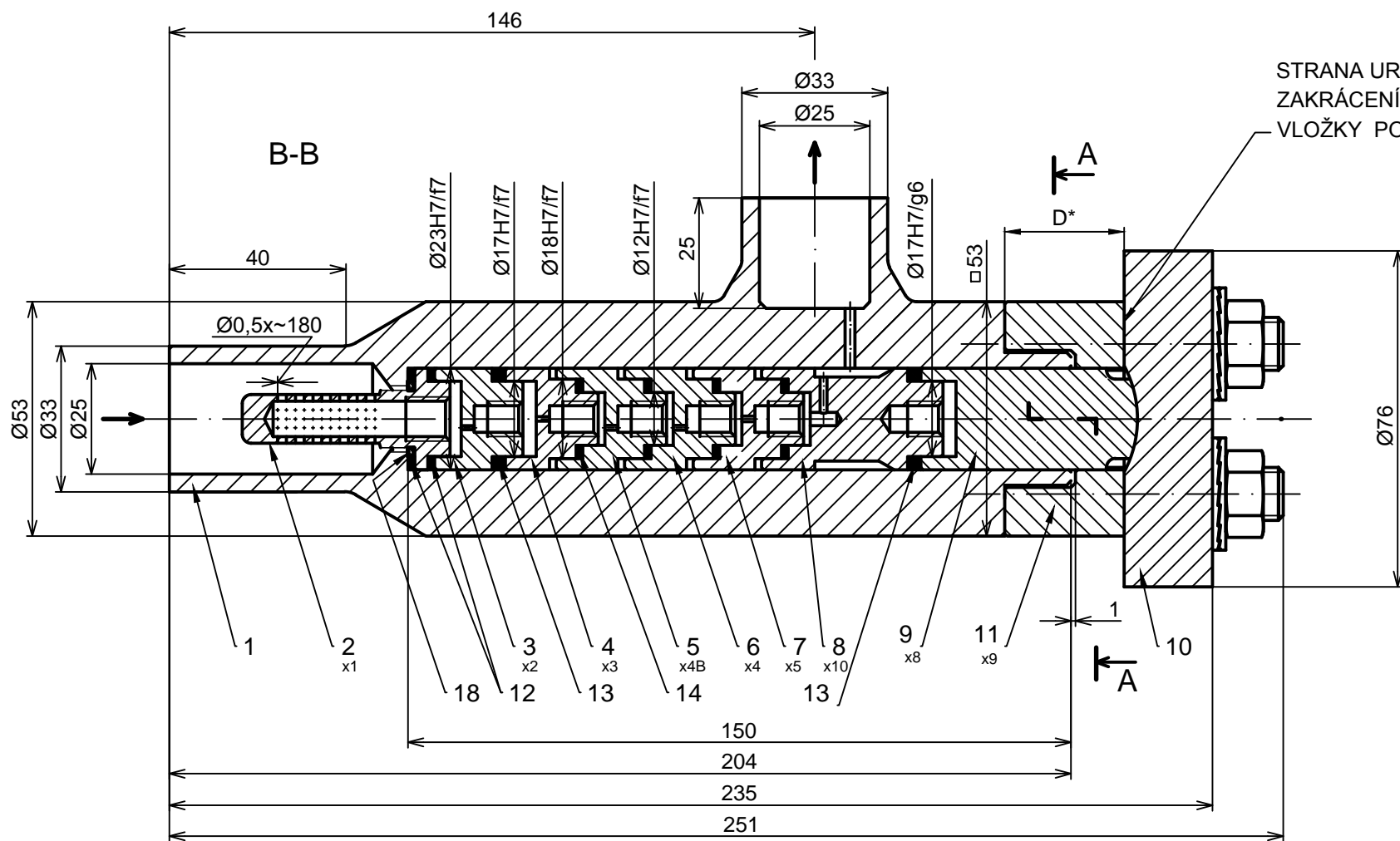
Příloha č.1 – Výpočtová tabulka Excel

Příloha č. 2 – Výkres mařiče pro EMO

Příloha č. 3 – Výkres mařiče pro ETE

PŘÍLOHA č. 2

Výkres maříče pro EMO



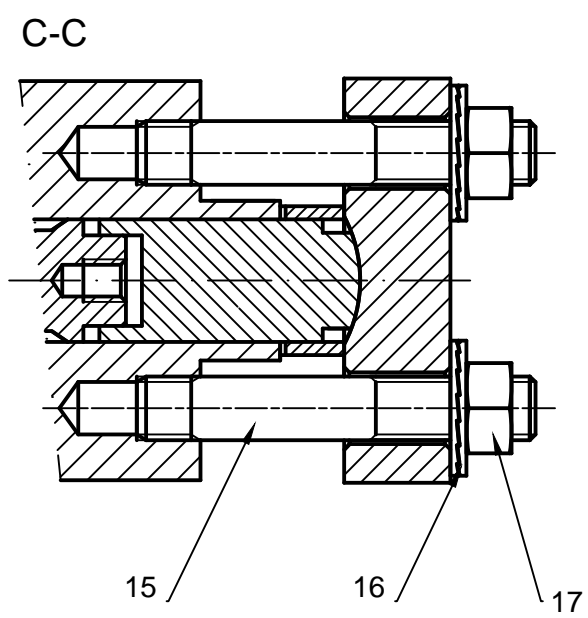
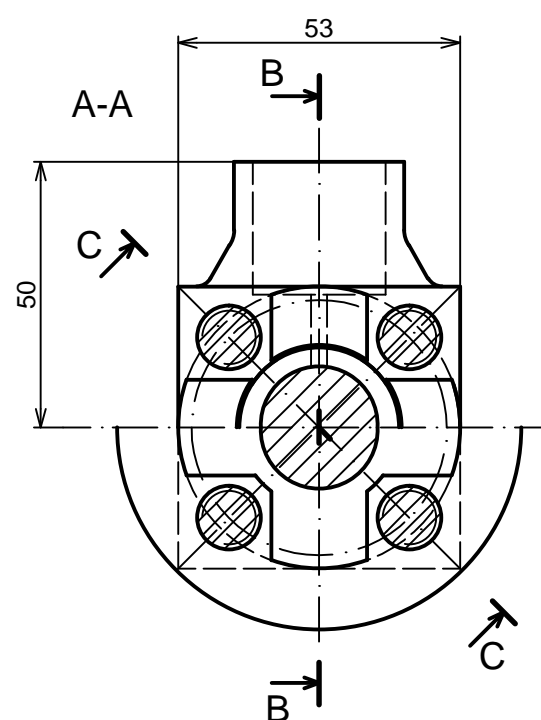
STRANA URČENÁ PRO
ZAKRÁCENÍ DÍSTANČNÍ
VLOŽKY POZ.11, * viz POZN.3

- POSTUP MONTÁŽE OMEZOVAČE PRŮTOKU DO POTRUBNÍHO SYSTÉMU:
- 1) DO TĚLESA OMEZOVAČE SE ZASUNOU TĚSNĚNÍ A VLOŽKY V POŘADÍ DLE SESTAVY OMEZOVAČE, PŘÍČEMŽ NESMÍ DOJÍT KE ZMĚNĚ POŘADÍ.
 - 2) PO ZASUNUTÍ TĚSNĚNÍ A VLOŽEK SE PROVEDE MONTÁŽ ZÁVRTNÝCH ŠROUBŮ POZ.15, DÍSTANČNÍ VLOŽKY POZ.11 A DISKU POZ.10. POTOM JE TŘEBA ZKONTROLOVAT DÉLKU D* VLOŽKY POZ.11. PŘI KONTROLE DÉLKY VLOŽKY D* JE NUTNÉ POSTUPOVAT DLE BODŮ 3) AŽ 5).
 - 3) DOTÁHNOUT SE MATICE POZ.17, LEHCE BEZ PŘEDPĚTÍ.
 - 4) ZMĚŘÍ SE SKUTEČNÁ VZDÁLENOST D MEZI DISKEM A TĚLESEM OMEZOVAČE.
 - 5) V PŘÍPADĚ POTŘEBY SE UPRAVÍ CELKOVÁ DÉLKA VLOŽKY POZ.11 ZE STRANY DISKU POZ.10 NA ROZMĚR D* = D - (2,5 až 3 mm).
 - 6) NASADÍ SE PODLOŽKY POZ.16 A DOTÁHNOUT MATICE POZ.17 UTAHOVACÍM MOMENTEM 50 Nm.
 - 7) TAKTO PŘIPRAVENÁ SESTAVA OMEZOVAČE SE PŘÍVAŘÍ K POTRUBÍ

VÝPOČTOVÝ TLAK: 14 MPa
VÝPOČTOVÁ TEPLOTA: 335°C
DOKUMENTACE DLE ČSN EN 10204-3.2
VÝROBA DLE ČSN 13480-4
ČISTOTA VNITŘNÍCH POVRCHŮ II dle PNM 34088033
*DOKUMENTACE DLE ČSN EN 10204-3.2
**DOKUMENTACE DLE ČSN EN 10204-3.1
NA ŠTÍTEK ZNAČIT: SJZ OMEZOVAČE PRŮTOKU, SJZ TRASY, LOMEK, POLOŽKA
VYBRANÉ ZAŘÍZENÍ DLE VYHLÁŠKY ÚJD SR 430/2011 Z.z. - BT2
TECHNICKÉ ZAŘÍZENÍ TLAKOVÉ DLE VYHLÁŠKY č.508/2009, SKUPINA I.C

Všecká práva k tomuto dokumentu patří výhradně MODRANY Power, a.s. Bez jejího souhlasu nesmí být kopírován, předán třetím osobám ani jiným způsobem zneužit.

MODRANY Power, a.s. reserves all rights to this document. Reproduction, use or disclosure to third parties without prior written consent is strictly forbidden.



1	KROUŽEK	4POT47336	08CH18N10T	0,01		18**
4	MATICE M12	DIN 934-A2-70 ČSN EN 10204-3.1		0,02		17**
4	PODLOŽKA NORD-LOCK SP 12	DIN NLSP-A4-S ČSN EN 10204-3.1		0,01		16**
4	ŠROUB M12x75-3n(3)	DIN 938-A2-70 ČSN EN 10204-3.1		0,07		15**
4	TĚSNĚNÍ 18x12x1,5	POWERgraf PR 1,6g/cm3, čist.99,85%	GRAFIT	0,001		14**
2	TĚSNĚNÍ 23x17x3	POWERgraf PR 1,6g/cm3, čist.99,85%	GRAFIT	0,001		13**
2	TĚSNĚNÍ 23x17x1,5	POWERgraf PR 1,6g/cm3, čist.99,85%	GRAFIT	0,001		12**
1	VLOŽKA ø55-30	4POT47329/B	08CH18N10T	0,6		11**
1	DISK ø76x20	4POT47210/A	08CH18N10T	0,71		10**
1	VLOŽKA VII ø23x49	4POT47213/A	08CH18N10T	0,14		9*
1	VLOŽKA VI ø23x41	4POT47204/A	08CH18N10T	0,09		8*
1	VLOŽKA IV ø23x25	4POT47202/A	08CH18N10T	0,04		7*
1	VLOŽKA III ø23x25	4POT47201/A	08CH18N10T	0,04		6*
1	VLOŽKA III ø23x25	4POT47201/B	08CH18N10T	0,04		5*
1	VLOŽKA II ø23x21	4POT47200/B	08CH18N10T	0,04		4*
1	VLOŽKA I ø23x20	4POT47199/B	08CH18N10T	0,04		3*
1	SÍTKO ø23x47	4POT47198/B	08CH18N10T	0,06		2*
1	TĚLESO OMEZOVAČE 204x53x76,5	3POT3472/C	08CH18N10T	2,81		1*

Poznámka: Celková čistá hmotnost kg : 4,33 Oddělení: 4.11

Měřítko: 1:1 Kreslil: Ing. P. PEČENÝ Přečtený
Přezkoušel: Ing. P. KOSTKA
Výrobně projednal:
Datum vydání: 28.11.2011 Typ:

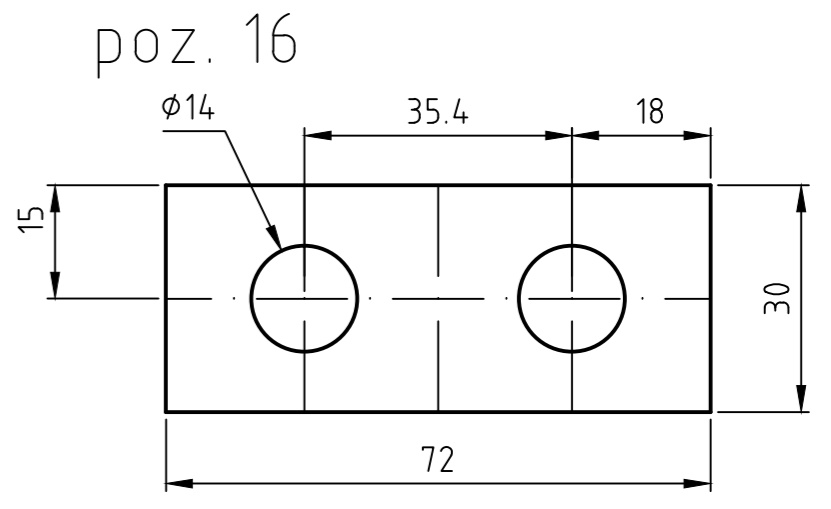
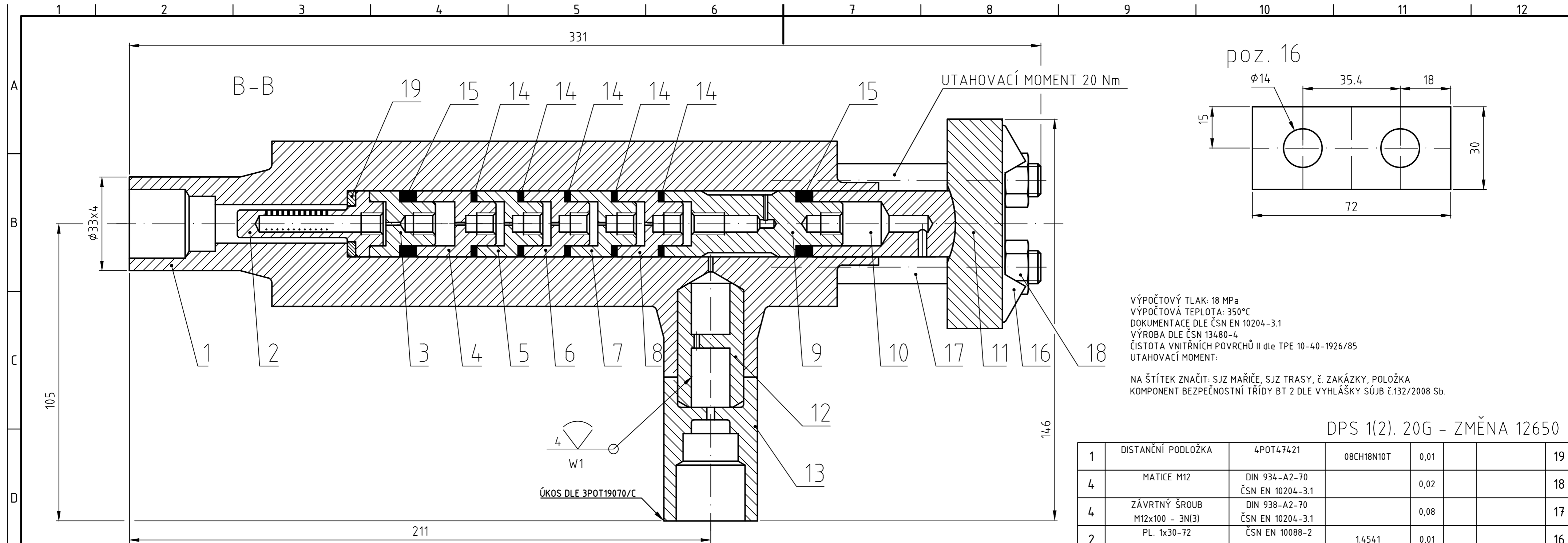
Číslo: 7.6.13
12.3.15
12.7.17

Index změny: A, B, C

Druh dokumentu: Název, doplňující název: OMEZOVAČ PRŮTOKU
Jazyk: CZ Starý výkres: Navision: List-1/1 Paré č.:
Číslo dokumentu: 2POT14613/C

PŘÍLOHA č. 3

Výkres maříče pro ETE

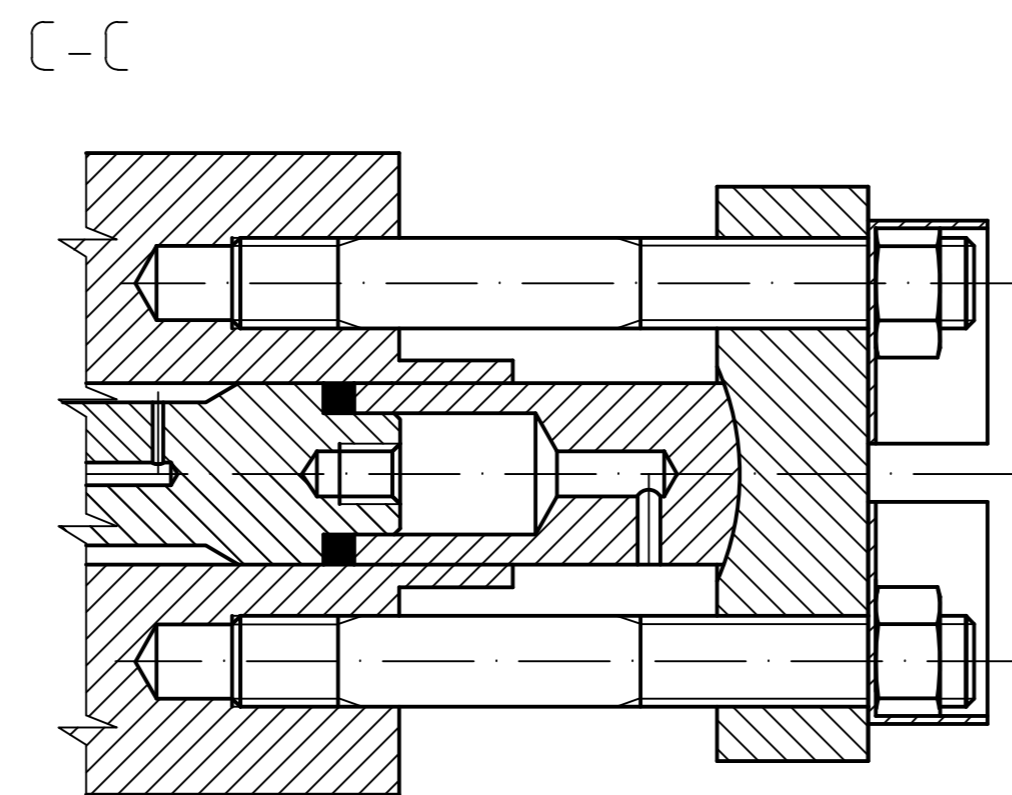
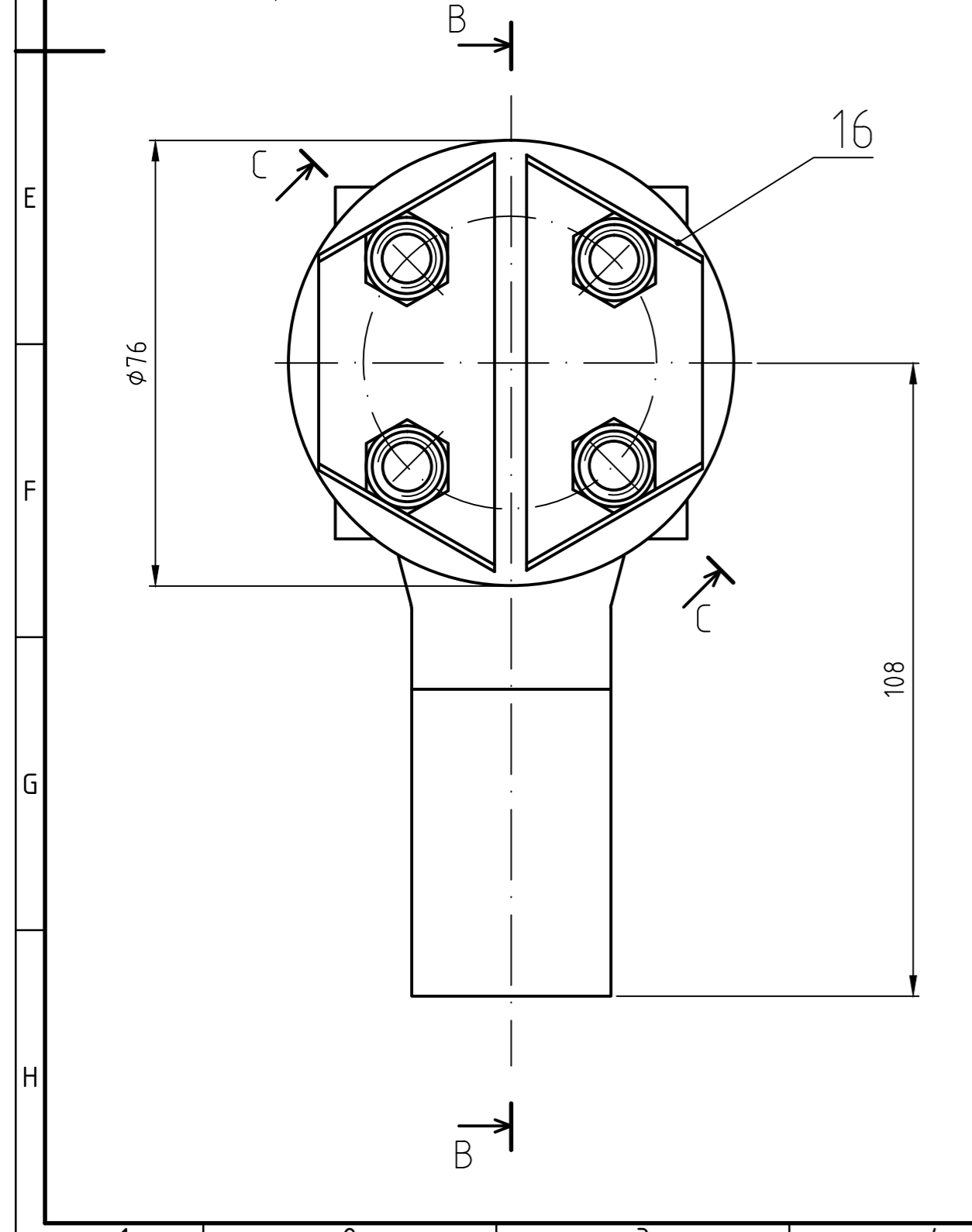


VÝPOČTOVÝ TLAK: 18 MPa
 VÝPOČTOVÁ TEPLOTA: 350°C
 DOKUMENTACE DLE ČSN EN 10204-3.1
 VÝROBA DLE ČSN 13480-4
 ČISTOTA VNITŘNÍCH POVRCHŮ II dle TPE 10-40-1926/85
 UTAHOVACÍ MOMENT:

NA ŠTÍTEK ZNAČIT: SJZ MAŘIČE, SJZ TRASY, ě. ZAKÁZKY, POLOŽKA
 KOMPONENT BEZPEČNOSTNÍ TŘÍDY BT 2 DLE VYHLÁŠKY SÚJB ě.132/2008 Sb.

DPS 1(2). 20G - ZMĚNA 12650

1	DISTANČNÍ PODLOŽKA	4POT47421	08CH18N10T	0,01		19
4	MATICE M12	DIN 934-A2-70 ČSN EN 10204-3.1		0,02		18
4	ZÁVRTNÝ ŠROUB M12x100 - 3N(3)	DIN 938-A2-70 ČSN EN 10204-3.1		0,08		17
2	PL. 1x30-72	ČSN EN 10088-2	1.4541	0,01		16
2	TĚSNĚNÍ SILNÉ 24x14x3	POWERgraf PR 1,6g/cm ³ , čist.99,85%	GRAFIT	0,001		15
5	TĚSNĚNÍ 24x14x1,5	POWERgraf PR 1,6g/cm ³ , čist.99,85%	GRAFIT	0,001		14
1	HRDLO	4POT47391	08CH18N10T	0,21		13
1	VLOŽKA DO HRDLA	4POT47402	08CH18N10T	0,11		12
1	DISK	4POT47401	08CH18N10T	0,64		11
1	VLOŽKA II	4POT47400	08CH18N10T	0,06		10
1	VLOŽKA I	4POT47399	08CH18N10T	0,06		9
1	CLONKA VI	4POT47398	08CH18N10T	0,06		8
1	CLONKA V	4POT47397	08CH18N10T	0,06		7
1	CLONKA IV	4POT47396	08CH18N10T	0,06		6
1	CLONKA III	4POT47395	08CH18N10T	0,06		5
1	CLONKA II	4POT47394	08CH18N10T	0,06		4
1	CLONKA I	4POT47393	08CH18N10T	0,06		3
1	SÍTKO	4POT47392	08CH18N10T	0,08		2
1	TĚLESO MAŘIČE	2POT14639	08CH18N10T	5,4		1



Veškerá práva k tomuto dokumentu patří výhradně MODRÁNY Power, a.s. Bez jejího souhlasu nesmí být kopírován, předán třetím osobám ani jiným způsobem zneužit.
 MODRÁNY Power, a.s. reserves all rights to this document. Reproduction, use or disclosure to third parties without prior written consent is strictly forbidden.

POZNÁMKA: Celková čistá hmotnost kg: 7,1 kg Oddělení: 330

Měřítka: Kreslil: J.PAŠEK
 NENÍ Přezkoušel: Ing. J.SLACH
 Výrobně projednal:
 Datum vydání: 9/2013 Typ:

Změna: Datum: Podpis: Index změny:

Druh dokumentu: Jazyk: CZ Starý výkres: Navision: Číslo dokumentu: List: 1/1 Parě ě:

MODRÁNY power Název, doplňující název: **MARIČ TLAKU 1(2)YP20E01** **2POT14638**