

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Projektová studie experimentální smyčky

Autor: **Andrea PŮTOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel ŽITEK**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Andrea PŮTOVÁ**  
Osobní číslo: **S09B0435P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Název tématu: **Projektová studie experimentální smyčky**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol:

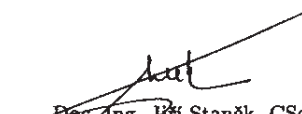
1. Navrhnout neaktivní experimentální smyčku pro solná média a vybrat vhodné materiály.  
 $T = 750 - 800^{\circ} \text{C}$ , sole typu LiNa,  $p = 0,2 \text{ MPa}$ .
2. Navrhnout odstředivé čerpadlo pro solná média, včetně výpočtu. Hustota  $2,6 - 4 \text{ kg/dm}^3$ .
3. Navrhnout způsob měření průtoku.
4. Provést výpočet nádob pro uvedené parametry.

Rozsah grafických prací: **výkresy**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

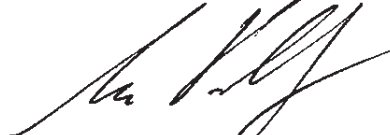
- **Hron M. a kol.: Jaderný transmutační systém SPHINX s kapalným jaderným palivem na bázi roztavených fluoridů, leden 2009**
- **Hron M. a kol.: Experimentální ověření transmutačních modulů na zmenšených modelech blízkých provozním, SÚRAO 2006**
- **Kobylka, D.: Odvod tepla z ADS systémů chlazených roztavenými solemi jako palivo-chladivo, disertační práce, ČVUT v Praze, 2005**
- **Chochlovský I., Jílek M.: SPHINX - experiment BLANKA - 451, koncepce, příprava a studijní dokumentace, Praha, květen 2005**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Žitek**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miroslav Jílek**  
ŠKODA JS a.s. Plzeň

Datum zadání bakalářské práce: **5. listopadu 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. listopadu 2012

## **Prohlášení o autorství**

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 27.6.2013

Andrea Půtová

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Půtová	Jméno Andrea	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulu) Ing. Žitek.	Jméno Pavel	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Projektová studie experimentální smyčky		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	53	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	45	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem experimentální smyčky. Dokument obsahuje čtyři hlavní části. První část je věnována konstrukčnímu řešení celého zařízení. V další části je navrženo odstředivé čerpadlo, které bude zajišťovat cirkulaci tekutin uvnitř smyčky. Následující oddíl se zabývá různými způsoby na měření průtoku, přičemž je zvolena nejvhodnější varianta. Na závěr je uveden výpočet nádob, které byly navrženy v první části práce. Součástí této bakalářské práce jsou i výkresy důležitých částí smyčky. Tyto výkresy jsou uvedeny v příloze.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Experimentální smyčka, odstředivé čerpadlo, indukční průtokoměr, ultrazvukový průtokoměr, tenkostěnné skořepiny</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Půtová	Name Andrea	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek	Name Pavel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The project study of experimental loop		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	53	<b>TEXT PART</b>	45	<b>GRAPHICAL PART</b>	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This Bachelor Thesis dealing with design of experimental loop. Document consists of four main parts. The first part is about construction solution of the whole equipment. In the next part is designed centrifugal pump that will ensure liquid circulation inside the loop. Other part shows different options of flow measuring and then the most suitable option is chosen. Vessels that were designed at the beginning are calculated in the last part. The Bachelor thesis also includes the drawings of main components. You can find these drawings in attachment.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Experimental loop, centrifugal pump, induction flowmeter, ultrasonic flowmeter, thin-walled shell</p>

## Obsah

<b>Seznam obrázků a tabulek.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Cíl bakalářské práce .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Návrh experimentální smyčky .....</b>	<b>11</b>
3.1. POČÁTEČNÍ NÁVRH .....	11
3.2. VÝBĚR MATERIÁLU.....	11
3.3. ZÁKLADNÍ SMYČKA.....	12
3.3.1. <i>Levá větev – experimentální kanál.....</i>	<i>13</i>
3.3.2. <i>Horní větev – měřicí nádoby.....</i>	<i>15</i>
3.3.3. <i>Pravá větev – chlazení.....</i>	<i>17</i>
3.3.4. <i>Dolní větev – výtok .....</i>	<i>17</i>
3.4. TAVICÍ/SBĚRNÁ NÁDOBA.....	17
3.5. TOPNÁ TĚLESA .....	18
3.6. UMÍSTĚNÍ SMYČKY.....	19
3.6.1. <i>Úložná bedna .....</i>	<i>19</i>
3.6.2. <i>Hermetický box s obslužnou plošinou .....</i>	<i>19</i>
<b>4. Návrh odstředivého čerpadla .....</b>	<b>21</b>
4.1. POSTUP NÁVRHU.....	21
4.2. MATERIÁL A ZÁKLADNÍ PARAMETRY .....	21
4.3. NÁVRH VHODNÉHO ŘEŠENÍ.....	21
4.3.1. <i>Radiální odstředivé čerpadlo.....</i>	<i>21</i>
4.3.2. <i>Základní díly a jejich rozměry.....</i>	<i>22</i>
4.4. VÝPOČET ČERPADLA .....	25
4.4.1. <i>Rychlosti v oběžném kole .....</i>	<i>25</i>
4.4.2. <i>Shrnutí základních poznatků .....</i>	<i>27</i>
4.4.3. <i>Vstupní parametry .....</i>	<i>27</i>
4.5. ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ.....	30
<b>5. Návrh měření průtoku .....</b>	<b>31</b>
5.1. ROZDÍL TLAKŮ.....	31
5.2. BEZKONTAKTNÍ PRŮTOKOMĚRY .....	32
5.2.1. <i>Indukční – elektromagnetické průtokoměry .....</i>	<i>32</i>
5.2.2. <i>Ultrazvukový průtokoměr.....</i>	<i>34</i>
5.3. DOPPLERŮV JEV .....	34
5.4. ZÁVĚREČNÉ STANOVISKO .....	36
<b>6. Pevnostní výpočet nádob .....</b>	<b>37</b>

6.1. VÝPOČET TENKOSTĚNNÝCH SKOŘEPIN .....	37
6.1.1. <i>Určení meridiánového a tečného napětí</i> .....	38
6.2. PEVNOSTNÍ VÝPOČET NÁDOB .....	40
<b>7. Závěr</b> .....	<b>43</b>
<b>8. Seznam literatury a informačních zdrojů</b> .....	<b>44</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>45</b>



## Seznam obrázků a tabulek

TABULKA 1: POROVNÁNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ HASTELLOY N A INCONEL 622 [2,3] .....	12
OBR. 3.1: ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE SMYČKY .....	12
OBR. 3.2: LEVÁ VĚTEV - EXPERIMENTÁLNÍ KANÁL .....	13
OBR. 3.3: SPOJOVACÍ NÁTRUBEK LEVÉHO KANÁLU .....	14
OBR. 3.4: DNO EXPERIMENTÁLNÍHO KANÁLU - ŘEZ .....	14
OBR. 3.5: PLOTÉNKA .....	14
OBR. 3.6: ŘEZ GRAFITOVÝM BLOKEM .....	15
OBR. 3.7: VÍKO NÁDOBY .....	15
OBR. 3.8: DNO NÁDOBY .....	16
OBR. 3.9: LEVÝ NÁTRUBEK ODTOKOVÉHO KANÁLU .....	17
OBR. 3.10: PRAVÝ NÁTRUBEK ODTOKOVÉHO KANÁLU .....	17
OBR. 3.11: ZÁKLADNÍ SMYČKA S TAVICÍ NÁDOBOU A TOPNÝMI TĚLESY .....	18
OBR. 3.12: HERMETICKÝ BOX .....	20
OBR. 3.13: UMÍSTĚNÍ SMYČKY V HERMETICKÉM BOXU .....	20
OBR. 4.1: SCHÉMA Odstředivého čerpadla [4] .....	22
OBR. 4.2: LOPATKOVÉ KOLO .....	23
OBR. 4.3: LEVÝ NÁTRUBEK ODTOKOVÉHO KANÁLU .....	23
OBR. 4.4: UMÍSTĚNÍ VÍČKA U DNA NÁDOBY .....	24
OBR. 4.5: HŘÍDEL S MATICÍ .....	24
OBR. 4.6: RYCHLOSTI V OBĚŽNÉM KOLE .....	25
OBR. 4.7: ROZLOŽENÍ RYCHLOSTI V ZÁVISLOSTI NA TLAKU .....	26
OBR. 4.8: RYCHLOSTNÍ TROJÚHELNÍK TEORETICKÝCH A REÁLNÝCH RYCHLOSTÍ .....	27
TABULKA 2: TYP LOPATEK V ZÁVISLOSTI NA STŘEDNÍCH OTÁČKÁCH [5] .....	29
OBR 5.1: SCHÉMA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU .....	33
OBR 5.2: MODERNÍ PRŮTOKOMĚR [9] .....	33
OBR 5.3: ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR- DOPPLERŮV JEV .....	35
OBR 5.4: ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR - MĚŘENÍ DOBY PRŮCHODU SIGNÁLU .....	35
OBR 5.5: DVOUDRÁHOVÉ MĚŘENÍ [10] .....	36
OBR 5.6: PĚTIDRÁHOVÉ MĚŘENÍ [10] .....	36
OBR 6.1: TENKOSTĚNNÁ SKOŘEPINA - ZOBRAZENÍ ŘEZŮ, [11] .....	37
OBR 6.2: SÍLY PŮSOBÍCÍ NA MERIDIÁNOVÝ ŘEZ .....	38
OBR 6.3: ZOBRAZENÍ ŘEZŮ U TENKOSTĚNNÉHO VÁLCE [11] .....	40
OBR 6.4: GRAF MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ INCONEL 622, V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ [12] .....	41

## 1. Úvod

Výzkum jaderných reaktorů odstartoval Enrico Fermi, když v roce 1942 v Chicagu uvedl do provozu první jaderný reaktor. Během druhé světové války se rozběhl jaderný program v řadě zemí, především však z důvodu vyrobitelnosti jaderných zbraní pomocí štěpné reakce. Po válce se výzkum reaktorů zaměřil na jejich komerční využití. V Americe byly spuštěny první jaderné elektrárny, např. Shippingport a Dresden, na evropském kontinentu budovali Britové elektrárny typu Magnox.

Tyto prototypové elektrárny můžeme označit jako I. generaci, která v podstatě ověřovala energetické využití jádra. Z koncepce I. generace vychází reaktory tzv. II. generace, kde nalezneme téměř všechny v současnosti pracující komerční elektrárny. Můžeme sem tedy zařadit typy LWR, PWR, BWR, VVER, RBMK, CANDU, AGR. Reaktory III. generace se pochopitelně vyvíjejí z některých typů generace druhé. Mají však mnohem lepší bezpečnostní opatření, s důrazem především na pasivní ochranu, zároveň jsou stávající elektrárny druhé generace doplňovány o bezpečnostní prvky, aby splňovaly zvyšující se bezpečnostní požadavky. Jaderné palivo je využíváno mnohem intenzivněji a i životnost elektráren se prodlužuje.

Dalším vylepšením těchto typů a jejich následovníkem je generace III+, sem řadíme reaktory AP 1000, MIR 1200, EPR a další, které mají ještě dokonalejší pasivní ochranu. V případě maximální projektové havárie jsou tyto reaktory schopné dosáhnout bezpečného stavu automaticky bez jakýchkoliv aktivních částí.

Současné jaderné reaktory umějí využívat palivo mnohem efektivněji, než jak tomu bylo na začátku jejich vývoje, avšak stále je palivo využíváno jen z velmi malé části. Po vyhoření jaderného paliva zde zůstává velké množství radioaktivního odpadu. Tuto otázku by mohly vyřešit nové typy reaktorů, takzvané IV. generace. Právě tyto reaktory by měly využít veškerý potenciál obsažený v jaderném palivu, umožnily by „spálení“ všech vznikajících transuranů, tím by se zmenšil jak objem, tak i aktivita a nebezpečnost jaderných odpadů. [1]

Reaktory IV. generace samozřejmě vycházejí ze zkušeností získaných z provozu reaktorů předchozích generací, jedná se však o zcela nové typy a koncepce, proto je nejprve nutné provést důkladný výzkum, i za tímto účelem vznikla tato práce. Reaktorů IV. generace je několik typů, tato práce se však zaměřuje na podporu rozvoje typu s tekutými solemi, takzvaný MSR (Molten Salt Reactor).

## 2. Cíl bakalářské práce

Cílem této práce je návrh řešení experimentální smyčky. Tato smyčka bude naplněna solným médiem typu LiNa, se kterým bude dále pracováno. Navržená konstrukce musí splňovat všechny technické požadavky. Musí být vyrobena z vhodného materiálu, který bude odolný vůči solnému médiu a bude vhodný i do vysokých teplot. Zvolená konstrukce musí být samozřejmě bezpečná, to bude podloženo pevnostním výpočtem nádob.

Experimentální smyčka by měla být i uživatelsky snadno přístupná, ovladatelná, ale zároveň bezpečně uložená. Z tohoto důvodu je do následující studie zahrnut i návrh na umístění zařízení do hermetického boxu s nosným rámem a obslužnou plošinou pro výzkumné pracovníky.

Další části práce jsou zaměřeny na průtok solného média smyčkou. Musíme zajistit cirkulaci solí, to bude splněno pomocí čerpadla, jehož konstrukce bude v následujících kapitolách

popsána a posléze i vypočítána. Zda se nám podařilo zajistit potřebný průtok, bude potřeba změřit, k tomu nám poslouží vhodný typ průtokoměru. Tato práce se tedy bude zabývat i výběrem vhodného způsobu pro měření průtoku.

### 3. Návrh experimentální smyčky

#### 3.1. Počáteční návrh

Na počátku navrhování základní konstrukce smyčky bylo třeba znát hrubé rozměry, ze kterých budeme vycházet a které budeme postupně upravovat a zpřesňovat dle konkrétních požadavků a návrhů. Faktorů, které budou ovlivňovat finální podobu a rozměry, je hned několik. Například průměry trubek dodávané od výrobce, jehož materiál zvolíme jako nejvhodnější, dále řešení spojovacích částí, volba topných těles a v neposlední řadě požadavky od pracovníků, kteří budou smyčku obsluhovat a provádět výzkum. To vše musíme zohlednit a navrhnout neoptimálnější řešení.

První rozměr, který je pevně daný, je délka trubky, která bude simulovat jeden kanál v reaktoru. V této části bude umístěn grafitový blok a zároveň to bude úsek smyčky s největším průměrem.

Dalším požadavkem na uspořádání jsou tři měřicí nádoby, umístěné na horní větvi tak, aby byly přístupné obsluze. V jedné z těchto nádob bude umístěno čerpadlo, které bude zajišťovat proudění tekutiny v celé smyčce. Následovat bude úsek s chladičem a dále odtokový kanál. Vše bude uspořádáno tak, aby vznikla uzavřená smyčka. Bližší rozměry a specifikace jsou uvedeny níže.

Abychom mohli smyčku naplnit médiem, je třeba k ní připojit ještě sběrnou tavicí nádobu. Celou smyčku bude nutné ohřát na požadovanou teplotu a samozřejmě zaizolovat, aby se docílilo minimálních teplotních ztrát. Takto ošetřená konstrukce se umístí do skříně, která bude kryt izolací a topná tělesa smyčky. Tato bedna bude posléze umístěna v obslužném boxu. Ten bude hermeticky uzavřen a zároveň bude nést obslužnou plošinu.

#### 3.2. Výběr materiálu

Konstrukční materiál bude především namáhán vysokou teplotou, konkrétně 750 - 800 °C. Současně musí odolávat korozní činnosti ze strany proudícího média. Materiál by měl mít i v těchto extrémních podmínkách stále stejné vlastnosti, které budou konstantní i v dlouhodobém časovém horizontu.

V americké laboratoři Oak Ridge National Laboratory byla vyvinuta speciální slitina, která je přímo určena pro výrobu reaktorů s tekutými solemi. Tato jedinečná niklová slitina nese název HASTELLOY N a je odolná vůči fluoridovým i jiným solím, které mají snahu s běžnými materiály oxidovat a tím degradovat jejich vlastnosti. [2]

HASTELLOY N by byla pro naši konstrukci naprosto ideální, bohužel je tato slitina velice drahá a v současné době nedostupná. Pro toto experimentální zařízení není tato slitina přímo nutná, neboť nebudeme pracovat s neutronovým zářením atd. Naše smyčka nebude v provozu několik desítek let, jako jsou například reaktory v komerčních elektrárnách, pro které by tento materiál byl jistě bezesporu nejvhodnější. Nami konstruované experimentální zařízení ale bude v provozu pravděpodobně jen několik let. Pro takto krátký provoz bude postačovat konstrukce z materiálu, který má obdobné složení a vlastnosti jako HASTELLOY N, avšak bude mnohem levnější a dostupnější. Hledáme tedy niklovou slitinu s nízkým obsahem chromu, aby co nejméně reagovala s proudícími solemi, byla v běžné cenové relaci a dostupná v České republice.

Vhodnou alternativou k americké speciální slitině by mohl být materiál označovaný jako INCONEL, který byl vyvinut americkou společností Special Metals Corporation. Obecně jsou

to chrom-niklové slitiny, které jsou korozi-vzdorné a své vlastnosti si uchovávají i za velmi vysokých teplot. Slitiny INCONEL nabízejí mnoho variant o různém procentuelním zastoupení niklu, chromu a dalších přidaných prvků, přičemž každá z nich má své specifické vlastnosti. [3]

Na výrobu smyčky byl vybrán INCONEL alloy 622. Tento typ má výbornou odolnost vůči oxidaci a přetrvává i v prostředí kyselin. Navíc je tato slitina dostupná, lze ji zakoupit od firmy BIBUS s.r.o., která je výhradním distributorem těchto materiálů pro ČR. [3]

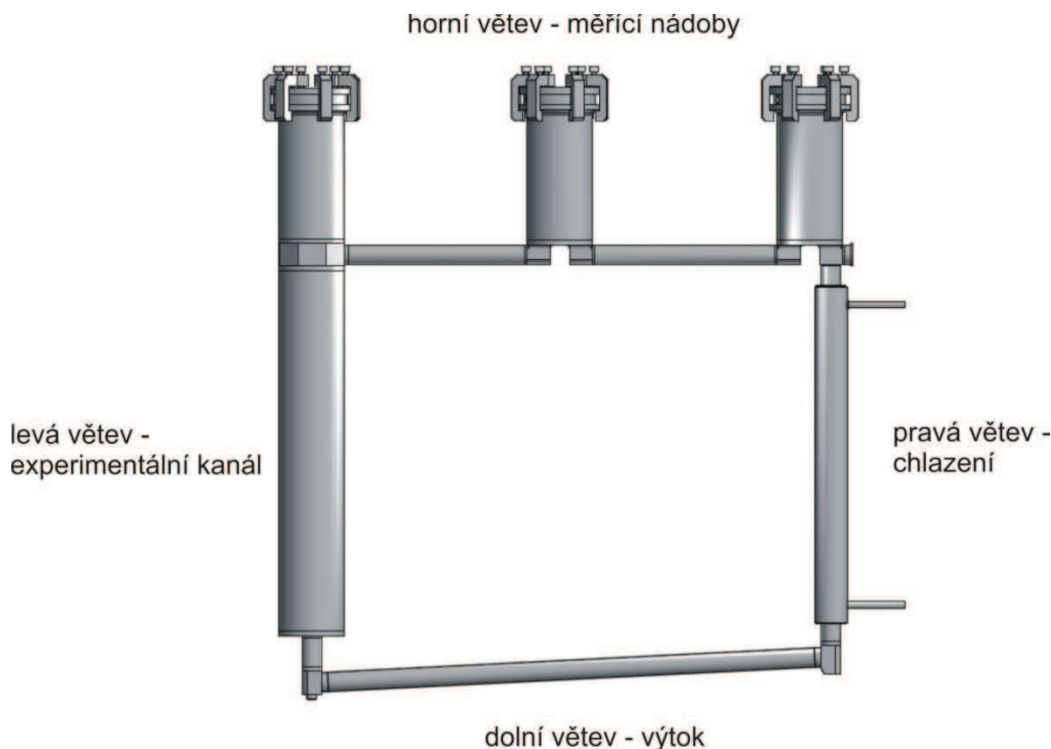
Procentuelní zastoupení prvku u materiálů HASTELLOY N a INCONEL alloy 622 je uvedeno v následující tabulce.

Slitina	Nikl	Chrom	Molybden	Železo	Uhlík
HASTELLOY N	71	7	16	5	0,08
INCONEL 622	56-64	20-22	12.5-14.5	2-6	0,015

Tabulka 1: Porovnání vlastností materiálů Hastelloy N a Inconel 622 [2,3]

### 3.3. Základní smyčka

Jak již bylo uvedeno výše, samotnou smyčku můžeme rozdělit na čtyři vzájemně propojené části. Levou větev, která simuluje reálný kanál reaktoru s grafitovou vložkou, horní část s měřicími nádobami, pravou větev s chladičem a v neposlední řadě odtokový kanál.

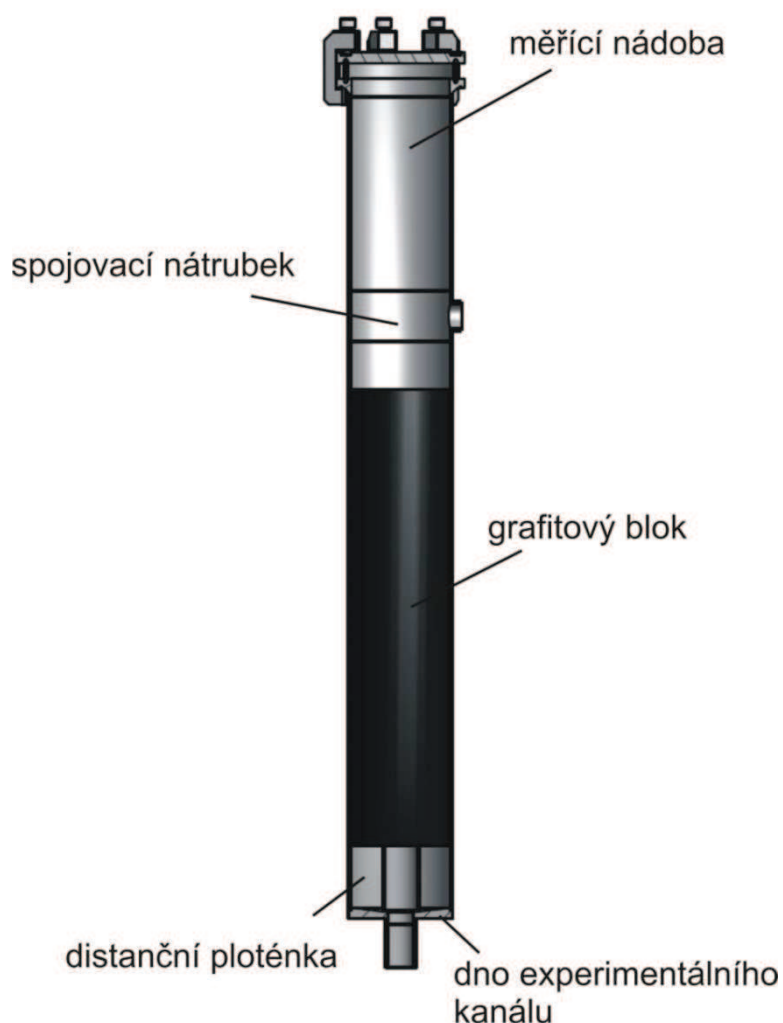


Obr. 3.1: Základní konstrukce smyčky

Celá konstrukce je sestavena z několika trubek a spojovacích součástí. Konkrétně jsou použity dva průměry trubek, větší průměr pro úsek s grafitem a pro nádoby. Trubky s menším průměrem jsou použity na propojení nádob a konstrukci pravého a odtokového kanálu. Přesné průměry jsou zvoleny dle katalogu výrobce, tedy větší kanál je tvořen trubkou  $\text{Ø}114,0 \times 3,05$  mm, ostatní kanály jsou vyrobeny z trubek  $\text{Ø}33,4 \times 2,77$  mm. Součásti pro spojení jednotlivých dílů kanálů jsou vyrobeny z tyčoviny, ta je však výrobcem dodávána jen v určitých rozměrech. Proto musíme při navrhování těchto spojovacích částí myslet na to, z jakého polotovaru se budou vyrábět. Je zde snaha vyrobit z jedné tyče o určitém průměru co nejvíce součástí, aby se na každý spojovací článek nemusel kupovat jiný průměr polotovarové tyče. Základní konstrukce celé smyčky je zobrazena na obrázku 3.1. Řešení jednotlivých dílů bude popsáno v následujících kapitolách.

### 3.3.1. Levá větev – experimentální kanál

Levá část smyčky má za úkol simulovat reálný kanál v reaktoru. (Obr. 3.2) Ten je tvořen trubkou o vnějším průměru 114,0 mm, v níž je umístěn grafitový blok délky 500 mm. Tato trubka v horní části plynule přechází do měřicí nádoby o stejném průměru.



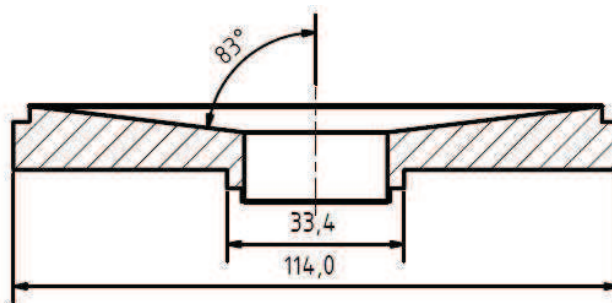
Obr. 3.2: Levá větev - experimentální kanál

Pro tento přechod je použita spojovací část, která zároveň umožňuje výtok kapaliny do horní větve smyčky. (Obr 3.3)



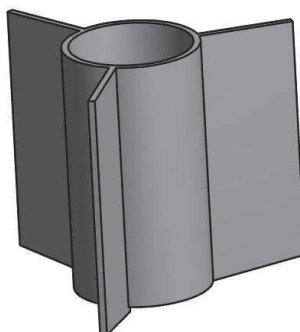
Obr. 3.3: Spojovací nátrubek levého kanálu

Dolní část levé větve musí navazovat na spodní úsek smyčky, ten je však tvořen menším průřezem. Napojení rozdílných průměrů trubek je provedeno opět přes spojovací části. V tomto případě je součást velmi jednoduchá. Experimentální kanál ukončíme dnem o průměru 114 mm. Uprostřed dna, je vyroben otvor, na nějž dále navazuje trubka  $\text{Ø}33,4$ . Dno kanálu bude k tomuto otvoru vyspádováno (dle obrázku 3.4), tak aby při vypuštění smyčky nezůstávali soli na dně experimentálního kanálu.



Obr. 3.4: Dno experimentálního kanálu - řez

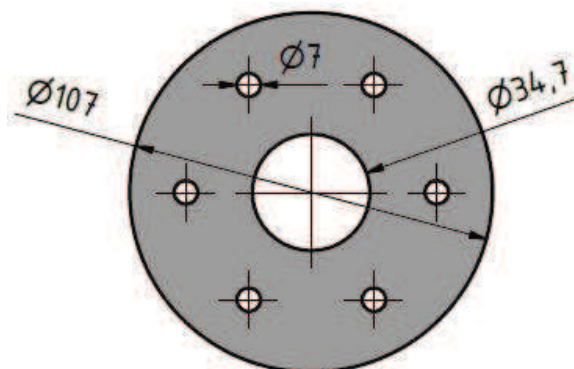
Na dno kanálu ještě umístíme takzvanou ploténku (obr. 3.5), na kterou následně usadíme grafitový blok. Je totiž nežádoucí, aby byl grafit přímo na dně kanálu. Musíme zajistit, aby se vstupující proud nejprve usměrnil a poté rovnoměrně protékal skrz grafit. Křídélka ploténky jsou na spodní straně zkosená pod stejným úhlem, jako je spád dna, to nám zajistí pohodlné umístění ploténky na dno kanálu.



Obr. 3.5: Ploténka

Ve středu kanálu je umístěný grafitový blok, který má za úkol simulovat reálný kanál reaktoru. Blok má tvar válce o rozměrech  $\text{Ø}107 \times 500$  mm. Ve středu válce je vyvrtána díra o

průměru 34,7 mm, dále je na roztečné kružnici o průměru 74 mm vyvrtáno 6 děr  $\text{Ø}7\text{mm}$ , tyto díry jsou rovnoměrně rozmístěny na tomto průměru, tedy přesně po  $60^\circ$ . Konkrétní úpravy lze vidět v průřezu na obrázku 3.6.



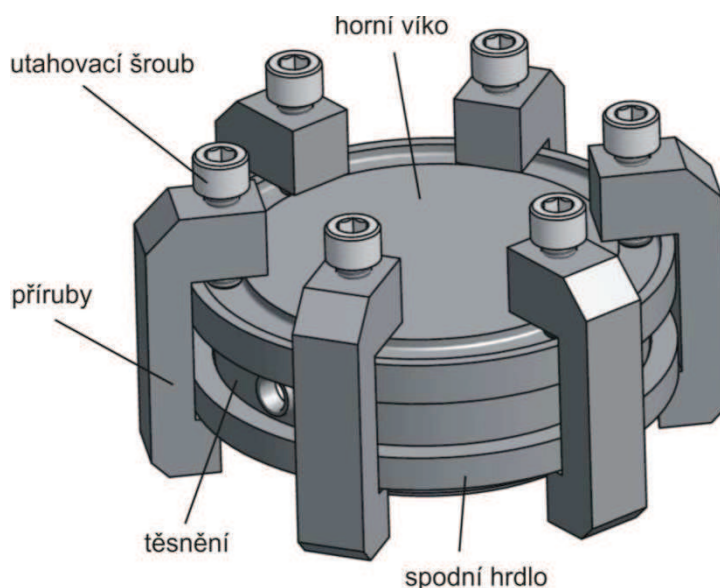
Obr. 3.6: Řez grafitovým blokem

### 3.3.2. Horní větev – měřicí nádoby

Horní část smyčky tvoří tři měřicí nádoby, které jsou přes dna vzájemně propojeny pomocí úzkých trubek. Všechny nádoby jsou totožné a jsou složeny ze třech dílů – víka nádoby, těla a dna. Vzájemně se odlišují jen v určitých detailech, například levá nádoba je připojena pomocí součásti dle obrázku 3.3, zbývající dvě nádoby jsou propojeny pomocí dna, které bude popsáno níže. Rozdíl je také ve víku nádob, zde se odlišuje pravá nádoba pouze tím, že zde má otvor pro vývod čerpadlové hřídele. Konstrukce prostřední nádoby je zobrazená v příloze č. 3. V následujícím textu budou popsány jednotlivé části hrnce, kromě těla, které je tvořeno pouze trubkou  $\text{Ø}114\text{ mm}$ .

#### Víko nádoby

Víko je tvořeno pěti částmi – spodním hrdlem, těsněním, horním víkem, přírubami a utahovacími šrouby. (Obr. 3.7)



Obr. 3.7: Víko nádoby



Spodní hrdlo je konstruováno tak, aby se dalo přivařit na trubku, která tvoří samotnou nádobu, má tedy stejný vnější průměr 114 mm. Z tohoto průměru se hrdlo rozšiřuje až na rozměr 135 mm. Zespodu hrdla je vyroben zápch pro správné přiložení přírub, na opačné straně, tedy na horním povrchu hrdla je zhotovena drážka pro vložení těsnění.

Do takto připravené drážky je umístěno ocelové těsnění, ve kterém jsou vytvořeny otvory pro zavedení měřících sond, termočlánků a jiných zařízení.

Horní víko tvoří kruhová deska o stejném průměru, jako má hrdlo, tedy 135 mm. Na dolní straně je opět drážka pro těsnění a na druhé zahlobnutí k dosednutí utahovacích šroubů.

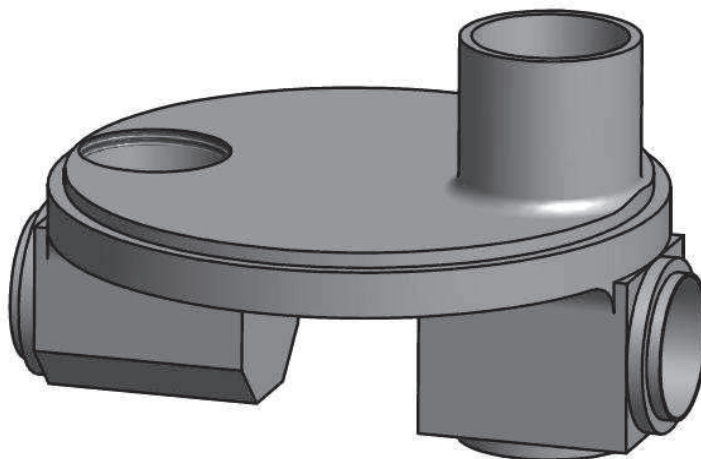
Spodní hrdlo, ocelové těsnění a horní víko jsou po vzájemném sestavení osazeny šesti přírubami, každá z nich má v horní části závit, do kterého se umístí utahovací šroub. Po dotažení všech šroubů je víko pevně smontováno.

### Dno nádoby

Napojení levé krajní nádoby na experimentální kanál již bylo popsáno v předchozím textu, zaměříme se tedy teď na konstrukci dna prostřední a pravé krajní nádoby.

Do prostřední nádoby přitéká tekutina trubkou  $\varnothing 33,4$  mm a vytéká trubkou o stejném průměru. Dno tedy musí mít otvory pro vtok a výtok s příslušnými rozměry. Další úkol při návrhu dna je dodržení rozměrů základního polotovaru, vychází se tedy z průměru 160 mm, z kterého je již navrženo připojení levého kanálu. Tvar musí být zkonstruován tak, aby šel přivařit jak k tělu nádoby, tak k přívodním trubkám, svary musí být takové, aby šly zkontrolovat rentgenem. Zároveň by dno nemělo mít velký objem materiálu, aby bylo možné smyčku snadno prohřát na provozní teplotu. Navíc bylo požadováno, aby otvory pro vtok a výtok byly od sebe pokud možno co nejvíce vzdáleny a výtokový otvor byl vyvýšen nad povrch dna a měl vnitřní průměr upraven do kuželu. Takto upravený výtok lze dále použít pro další výzkumnou činnost, například do kuželovitého zahlobnutí zasunout hadičku atd.

Krajní pravá nádoba bude mít použité totožné dno, jako bylo navrženo pro nádobu prostřední, s tím rozdílem, že bude otvor pro výtok provrtán skrz. (obr 3.8) Výtok tedy nebude pokračovat do pravého úhlu, ale bude probíhat axiálně. Otvor, kterým by vytékala tekutina u prostřední nádoby, bude v tomto případě ukončen jednou zátkou, která bude k otvoru přivařena.



Obr. 3.8: Dno nádoby

### 3.3.3. Pravá větev – chlazení

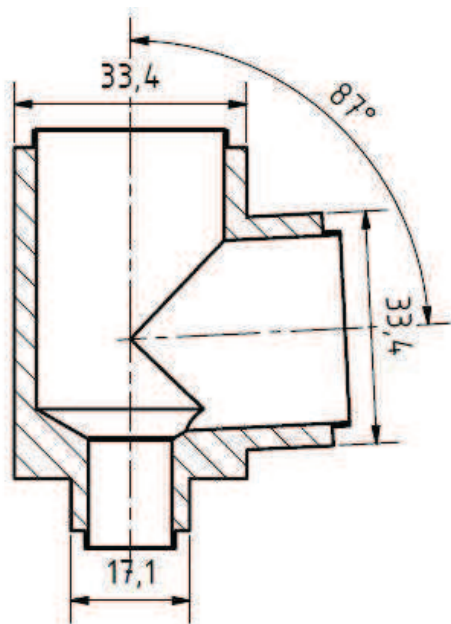
Konstrukce pravé větve je velice jednoduchá, úzká trubka ( $\text{Ø}33,4$ ) navazuje přímo na dno pravé krajní nádoby a vede až ke spojovacímu dílu se spodní částí. Na pravé větvi je umístěn chladič, ten se stává z trubky o průměru 50 mm a délky 580 mm. U okrajů jsou přidělané dvě trubičky, jedna pro přívod chladiva, druhá pro odvod chladiva. Chladič má simulovat sekundární okruh, který odebírá teplo produkované v primárním okruhu – ve smyčce. Délka pravé větve je taková, aby ve spodní odtokové větvi vycházel spád 5%.

### 3.3.4. Dolní větev – výtok

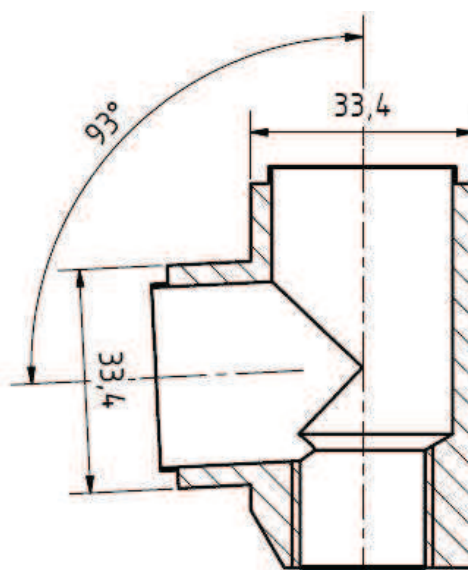
Poslední částí základní smyčky je dolní větev, ta slouží k plynulému toku solí. Aby vše probíhalo správně, musí být splněno klesání 5%. Rozteč mezi pravým a levým kanálem činí 900 mm, jestliže známe tento rozměr, není problém spočítat výškový rozdíl a z toho plynoucí úhel sklonu, aby bylo požadované klesání splněno. Spodní odtokovou trubku tedy připojíme přes spojovací součásti se zbytkem smyčky. Do těchto spojovacích dílů musíme zakomponovat vypočtený úhel pro klesání 5%.

Připojení k levé smyčce bude realizováno pomocí levého spojovacího kusu dle obrázku 3.9. Nátrubek, přes který je připojen odtokový kanál, je odkloněn od osy levého kanálu o  $87^\circ$ . Zároveň je v této součásti zhotoven otvor, který bude navazovat na trubku  $\text{Ø}17,1$  mm. Přes tuto malou trubičku bude celá smyčka spojena s plnicí nádrží.

K pravé části smyčky bude výtokový kanál připojen přes součást dle obrázku 3.10. Zde je otvor nátrubku vyvrtán pod úhlem  $93^\circ$  od pravé nádoby, otvor který osově navazuje na pravou část smyčky je opatřen závitem.



Obr. 3.9: Levý nátrubek odtokového kanálu



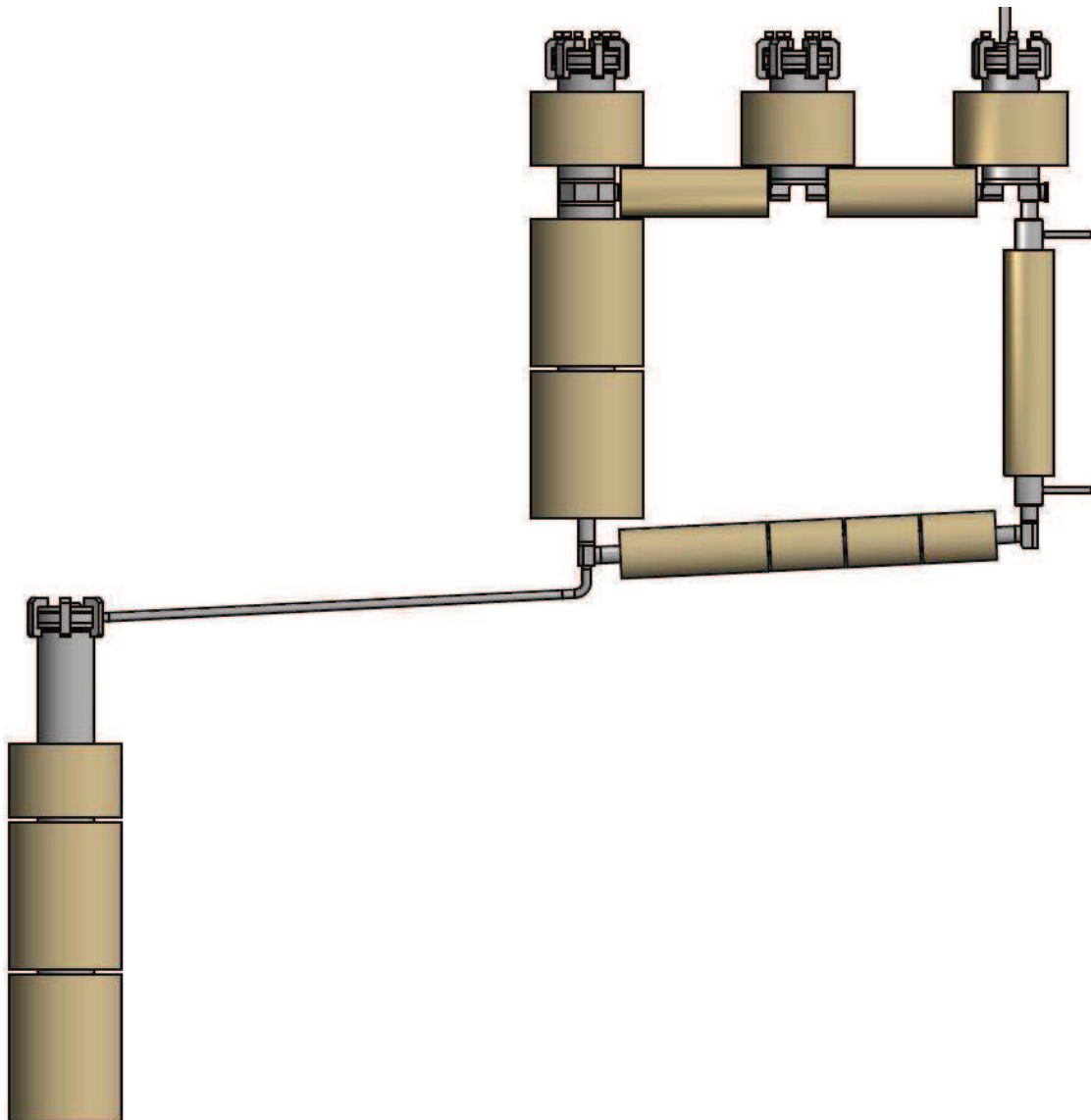
Obr. 3.10: Pravý nátrubek odtokového kanálu

## 3.4. Tavicí/sběrná nádoba

Abychom mohli smyčku poprvé naplnit nebo ji poté vypustit, musíme mít k dispozici nádobu, ve které budou soli umístěny a následně přepuštěny do smyčky. Nádobu zkonstruujeme podobným způsobem, jako měřicí nádoby na samotné smyčce. Plnicí nádoba tedy bude mít tělo tvořené

trubkou  $\varnothing 114,3$  mm, jako dno bude stačit přivařený kruhový disk a víko bude naprosto stejné jako u měřicích nádob. Výška sběrné nádoby musí být dostatečně velká, aby se do nádoby vešel celý objem smyčky, která má být naplněna.

Plnicí nádoba je se základní smyčkou propojena pomocí úzké trubky  $\varnothing 17,1$ . Tato trubka bude napojena v levé dolní části smyčky, již zmíněným otvorem a do nádoby bude ústít skrz otvor v ocelovém těsnění. Propojení smyčky a nádoby bude opět s klesáním 5%. (Obr 3.11)



Obr. 3.11: Základní smyčka s tavicí nádobou a topnými tělesy

### 3.5. Topná tělesa

Aby mohl experiment být uskutečněn, je potřeba konstrukci celého zařízení zahřát. Ve smyčce totiž budou putovat soli s teplotou okolo  $750^{\circ}\text{C}$ . Kdybychom takto horké soli pustili rovnou do smyčky o pokojové teplotě, konstrukční materiál by tento teplotní šok nemusel vydržet. Proto musíme celou smyčku nejprve přehřát a poté teprve naplnit solemi.

Ohřátí smyčky lze provést různými způsoby. Jedna z možností je například uzavřít celou smyčku do elektrické pece a pomocí ní materiál ohřát. Umístění do pece ale není příliš vhodné, jelikož uprostřed smyčky je hluché místo, které by se ohřívalo zbytečně, což je neekonomické. Odizolování hluchého místa je také problematická záležitost.

Proto bylo rozhodnuto, že se smyčka prohřeje pomocí topných těles, takto obalená smyčka je již vidět na obrázku 3.11. Tělesa mohou být zakoupena v různých velikostech, tudíž půjdou pokrýt i rozdílné průměry jednotlivých větví smyčky. Topná tělesa jsou válce s tloušťkou stěny 50 mm, válce lze navíc rozdělit na dvě poloviny, díky tomu můžeme těmito tělesy obalit smyčku až po jejím sestavení a svaření.

Jestliže jsou na konstrukci nainstalována topná tělesa, můžeme dále celou smyčku ještě finálně zaizolovat, to provedeme pomocí izolační vaty, kterou celou smyčku omotáme, aby tepelné ztráty byly co nejmenší.

Samozřejmě bude takto ošetřena i plnicí nádoba. Bude obklopena jak topnými tělesy, tak izolačním materiálem.

### **3.6. Umístění smyčky**

Máme hotovou konstrukci, zajištěné její prohrátí a dostatečnou tepelnou izolaci. Dalším krokem tedy je vytvořit hermetický box, ve kterém bude celá konstrukce uzavřena. Samotná smyčka nebude v tomto boxu viset jen tak, ještě před tím ji umístíme do bedny, která bude sloužit jako bezpečnostní bariéra a zároveň bude i vylepšovat vizuální podobu smyčky.

#### **3.6.1. Úložná bedna**

Konstrukce bedny není nikterak složitá. Záda bedny kopírují tvar smyčky, tedy jsou obdélníkového tvaru s otvorem uprostřed. Bočnice mají vyříznuté otvory pro vyústění měřicích nádob, vstup a výstup pro chladič a otvor pro spojovací trubičku mezi smyčkou a plnicí nádobou. Bočnice jsou kolmo přivařeny ke dnu. Rozměry bedny jsou navrženy tak, aby smyčka šla do bedny snadno umístit a nebyla uložena příliš na těsno. Celá bedna půjde uzavřít pomocí dvou dvířek ve tvaru písmene C, která se setkávají uprostřed konstrukce.

#### **3.6.2. Hermetický box s obslužnou plošinou**

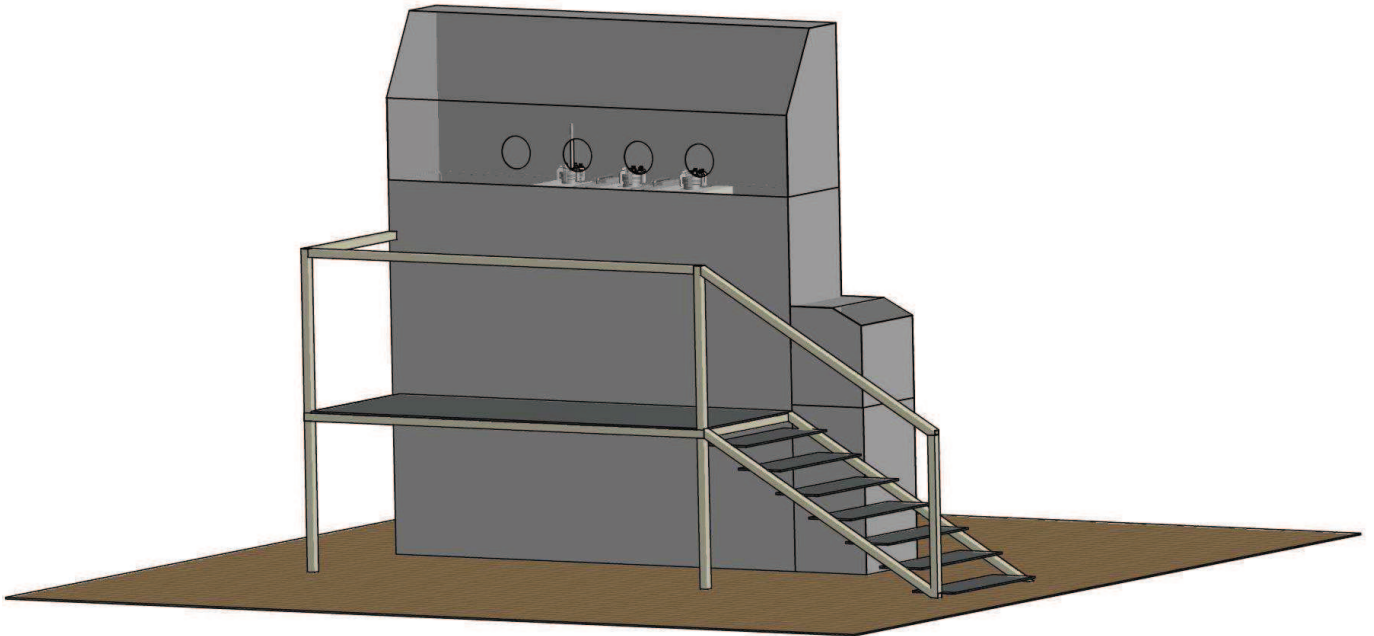
Smyčka uzavřená v bedně, spolu s plnicí nádobou se uzavřou do hermetického boxu. Přece jenom budou ve smyčce proudit soli s velmi vysokou teplotou, přičemž tyto soli jsou navíc toxické a není tedy žádoucí, aby vědečtí pracovníci mohli přijít do přímého kontaktu s roztavenými solemi. Kdyby náhodou došlo k porušení konstrukce smyčky, tento hermetický box by měl pracovníky ochránit.

Box je tvořen nosnou konstrukcí, ta je sestavena z jeklů různých délek. Na tuto konstrukci jsou přidělány plechy. Horní část boxu je pokryta plexisklem, aby obsluha viděla na smyčku. Plexisklo přímo proti měřicím nádobám je opatřeno otvory, ke kterým budou přidělány gumové rukavice. Díky těmto otvorům může obsluha manipulovat s měřicími nádobami. Jelikož výška celého boxu je 3286 mm, je box opatřen obslužnou plošinou, na kterou vystoupá obsluha po schodech. Plošina je v takové výšce, aby obsluhování smyčky bylo pohodlné.

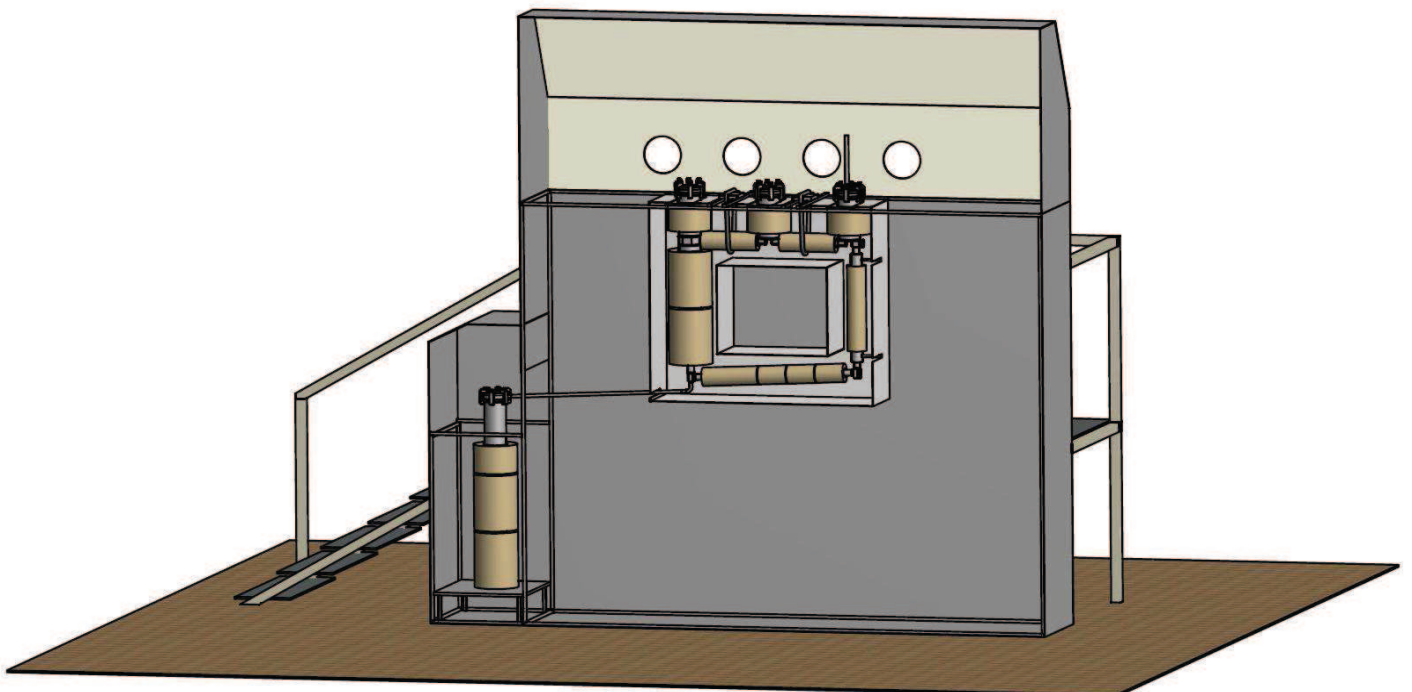
Bedna se smyčkou je tedy zavěšena na nosné konstrukci tak, aby víka měřicích nádob byla umístěná v dosahu otvorů s rukavicemi. Plnicí nádoba plynule navazuje na smyčku a končí u podlahy boxu. Smyčka je zavěšena na dvou pružných lanech, aby mohla vlivem teplotní roztažnosti dilatovat.

Okolo těchto dvou nejdůležitějších částí experimentálního zařízení zbývá ještě dostatek prostoru pro uskladnění dalších elementů pro bezchybné fungování, jako je například elektroinstalace topných těles, vývody termočlánků a dalších měřicích zařízení.

Na obrázku 3.12 je zobrazen výsledný návrh hermetického boxu. U obrázku 3.13 jsou sejmuty zadní kryty boxu a dvířka bedny, aby bylo vidět umístění smyčky uvnitř boxu. Rozměry celého hermetického boxu jsou uvedeny v příloze č. 2.



Obr. 3.12: Hermetický box



Obr. 3.13: Umístění smyčky v hermetickém boxu

## 4. Návrh odstředivého čerpadla

Základní konstrukce smyčky bude naplněna roztavenými solemi. Tyto soli budou dále předmětem zkoumání a dalších experimentů. Bude zjišťováno jejich chování v různých částech smyčky, zda nedochází někde k jejich usazování a zda jejich parametry odpovídají teoretickým předpokladům. Aby se mohla všechna tato měření uskutečnit, je nutné zajistit plynulou cirkulaci solí v celé smyčce, k tomuto účelu musíme navrhnout odpovídající čerpadlo.

### 4.1. Postup návrhu

Čerpadlo, které bude ve smyčce využíváno, musí odolat vysoké teplotě, která bude okolo 750°C, a zároveň musí být odolné vůči agresivnímu prostředí. Celá smyčka je totiž naplněna solným roztokem, který by mohl reagovat s materiálem čerpadla a následně celé zařízení poškodit a znemožnit jeho správnou činnost. Z tohoto důvodu nemůžeme do smyčky ponořit standardní čerpadlo, které je běžně dostupné na trhu. V úvahu přichází dvě varianty, nechat si od výrobce čerpadel vyrobit čerpadlo odpovídajících parametrů, nebo si čerpadlo navrhnout ve zjednodušené formě sami, ze stejného materiálu, který jsme použili na výrobu samotné smyčky. Samozřejmě byla zvolena druhá varianta, jelikož zakázková výroba u jiné firmy by byla poměrně nákladná a navíc požadavky na čerpadlo jsou velmi specifické.

### 4.2. Materiál a základní parametry

Materiál na výrobu čerpadla bude stejný jako ten, který byl použit na celou konstrukci experimentální smyčky, tedy Inconel 622. Čerpadlo umístíme do pravé krajní nádoby. Zde bude usazeno v malé vzdálenosti ode dna, aby přímo navazovalo na vtok a výtok. Jelikož jsme se rozhodli umístit čerpadlo do měřicí nádoby, jsou nyní rozměry čerpadla limitovány vnitřním rozměrem trubky, která tvoří tělo nádoby. Vnější rozměr čerpadla tedy nesmí být větší než 107 mm.

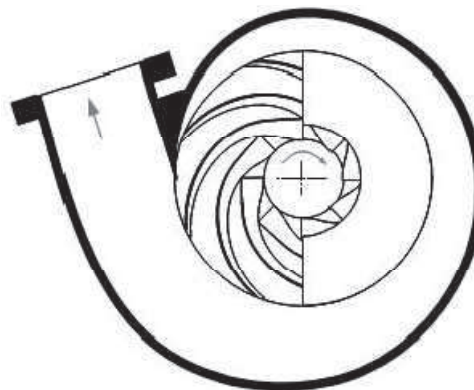
### 4.3. Návrh vhodného řešení

Jelikož budou rozměry čerpadla značně atypické, rozhodli jsme se nejprve vytvořit návrh čerpadla tak, aby především splňoval rozměrové požadavky. Teprve poté bude tento návrh podložen výpočtem, zda bude čerpadlo schopné zajistit potřebný průtok. Jestliže výpočet prokáže opak, bude nutné stávající konstrukci předělat a znovu provést výpočet, dokud nebude výsledek uspokojující.

Začneme tedy výběrem vhodného typu čerpadla. Jelikož chceme čerpadlo umístit do trubky, přičemž vtok a výtok jsou umístěny rovnoběžně s osou této trubky, jeví se jako vhodný typ radiální odstředivé čerpadlo. Jedná se o klasické čerpadlo, které se běžně používá například na zahrádkách k čerpání vody.

#### 4.3.1. Radiální odstředivé čerpadlo

Tento druh čerpadla se nazývá radiální, protože proud vystupuje z oběžného kola radiálně. Konstrukce odstředivého čerpadla využívá oběžné lopatkové kolo, které je poháněno motorem, toto lopatkové kolo můžeme také nazývat rotorem čerpadla. Statorem je difuzor, který má obvykle spirálovitý tvar. Schematické zobrazení tohoto čerpadla je vidět na obrázku 4.1. Do středu otáčejícího lopatkového kola je přiváděna kapalina, která je unášena lopatkami a vlivem odstředivých sil získává větší kinetickou energii. Kapalina je poté hnána do spirálovitého difuzoru, kterým putuje ven z čerpadla. [4]



Obr. 4.1: Schéma odstředivého čerpadla [4]

V našem případě musíme návrh statoru a celé konstrukce uzpůsobit tak, aby kapalina v oblasti výtlačku nepokračovala kolmo na osu otáčení rotoru, ale aby směřovala rovnoběžně s touto osou. Musíme totiž docílit toho, aby tekutina pokračovala do výtoku, který je umístěn na dně nádoby, jehož osa je rovnoběžná s osou vtoku. Aby tekutina proudila tam, kam chceme, dosáhneme pomocí vhodného tvaru čerpadla.

#### 4.3.2. Základní díly a jejich rozměry

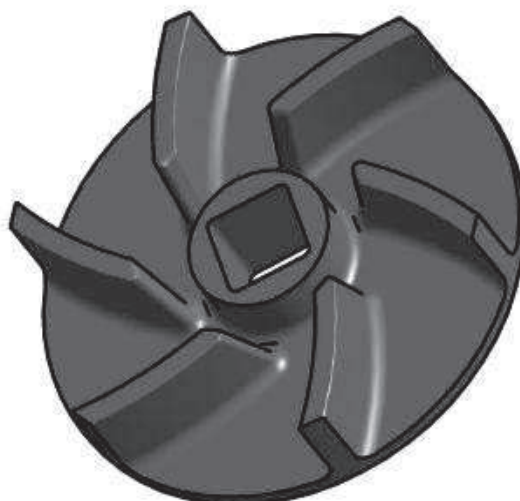
Abychom mohli čerpadlo vyrobit bez pomoci speciálních obráběcích strojů, musíme ho navrhnout pokud možno co nejjednodušeji, ale aby i přesto bylo funkční. Čerpadlo se tedy bude skládat z těchto dílů:

- Lopatkové kolo
- Tělo čerpadla
- Víčko čerpadla
- Hnací soustava

#### Lopatkové kolo

Nejdůležitější součástí čerpadla je lopatkové kolo. Obvykle se skládá z několika zahnutých lopatek, jejichž tvar má posléze vliv na rychlost média, které bude skrz tyto lopatky protékat. Jelikož se jedná o odstředivé čerpadlo, můžeme lopatkové kolo také nazývat rotorem čerpadla.

Návrh lopatkového kola byl inspirován reálným lopatkovým kolem, které se používá v malých čerpadlech. Jako vzor bylo použito čerpadlo z osobního automobilu. Celkový průměr rotoru byl navržen na 68 mm, počet lopatek je 6 a jsou symetricky rozmístěné po obvodu. Uprostřed lopatkového kola je vyroben otvor, který má tvar čtyřhranu. Přes tento čtyřhran bude připojena hřídel se stejným čtyřhranem, která bude celým rotorem otáčet. Finální tvar lopatkového kola je zřetelný na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Lopatkové kolo

### Tělo čerpadla

Druhou nejdůležitější součástí je samotné tělo čerpadla. Čerpadlové tělo bývá většinou vyráběno jako odlitek, který má poměrně složitý tvar. Naše čerpadlo ale musí být jednoduché, aby šlo co nejnázne vyrobit, a zároveň se musí vejít do vnitřního průměru trubky, tedy může mít maximální průměr 107 mm.

V těle čerpadla je umístěno lopatkové kolo, přičemž zde musí být i prostor pro výtlač kapaliny, to vše musíme při návrhu zohlednit. Po zvážení všech aspektů byl zvolen kruhový tvar čerpadla. Tento tvar je výhodný z několika důvodů. Především se bez problémů vejde do nádoby, kde má být čerpadlo umístěno, navíc se maximálně využije nabízeného prostoru. Další obrovská výhoda kruhového tvaru je snadno dostupný polotovár, součást půjde jednoduše vyfrézovat z kulatiny příslušného rozměru.

Polotovarová kulatina bude tedy vyfrézována tak, aby vznikla skořepina s vnitřním spirálovitým tvarem s prostorem pro výtlač kapaliny, dle obrázku 4.3.

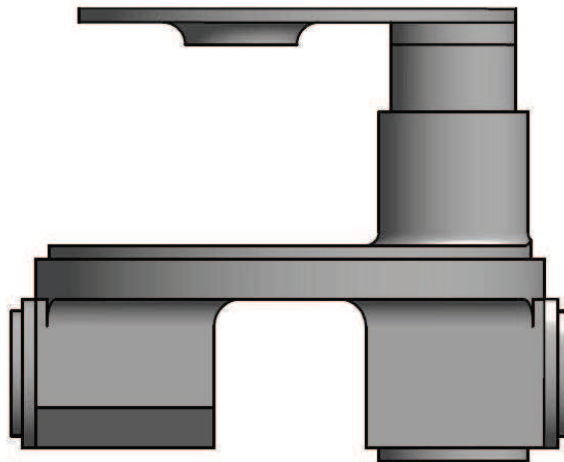


Obr. 4.3: Levý nátrubek odtokového kanálu



### Víčko čerpadla

Tělo čerpadla spolu s lopatkovým kolem bude zakryto kulatým víčkem. To se zasadí na připravené osazení na těle čerpadla a následně k celému tělu přivaří. Ve víčku jsou zhotovené dva otvory pro usměrnění proudu kapaliny. Jeden otvor bude sloužit pro vtok do čerpadla a bude umístěn pod středem lopatkového kola. Druhý otvor slouží k výtoku kapaliny ven z čerpadla a je umístěn pod výtlačným prostorem. K otvoru pro výtok bude přivařena ještě krátká trubka, která bude následně zasunuta do kuželovitého výtoku, který je součástí dna nádoby. Tímto máme zajištěné, že tekutina z čerpadla bude putovat dál do smyčky a nebude cirkulovat jen v nádobě. Zasazení víčka do dna nádoby je znázorněno na obrázku 4.4.

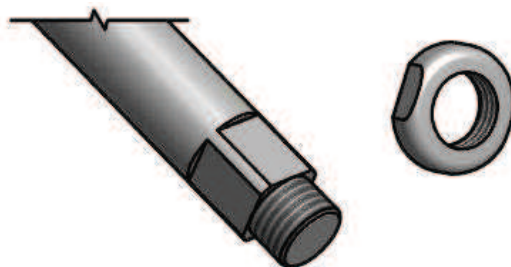


Obr. 4.4: Umístění víčka u dna nádoby

### Hnací soustava

Jak již bylo zmíněno výše, princip odstředivého čerpadla spočívá v otáčení lopatkového kola, které má zakřivené lopatky. Odstředivou silou je zajišťován průtok média. Abychom ale docílili otáčení rotoru, musíme k němu přivést točivý moment. Ten je přenášen pomocí hřídele, která je přes měkkou spojku přímo napojena na elektromotor.

Tato hřídel je nasunuta na lopatkové kolo přes čtyřhran, čímž se zamezí prokluzování hřídele a zároveň nám tento čtyřhran umožní přenos točivého momentu. Konec hřídele je opatřen závitem, na nějž je našroubována matice, která zajistí správnou polohu lopatkového kola a také zamezí jeho sklouznutí z hřídele. (Obr 4.5)



Obr. 4.5: Hřídel s maticí

Aby byla zajištěná poloha rotující hřídele vůči nerotujícím součástem čerpadla a nádoby, budou použita ložiska z grafitu. Hřídel spolu s ložisky bude usazena v ochranné trubce, která bude přivařena jak k tělu čerpadla, tak k víku nádoby, ve které je čerpadlo umístěno.

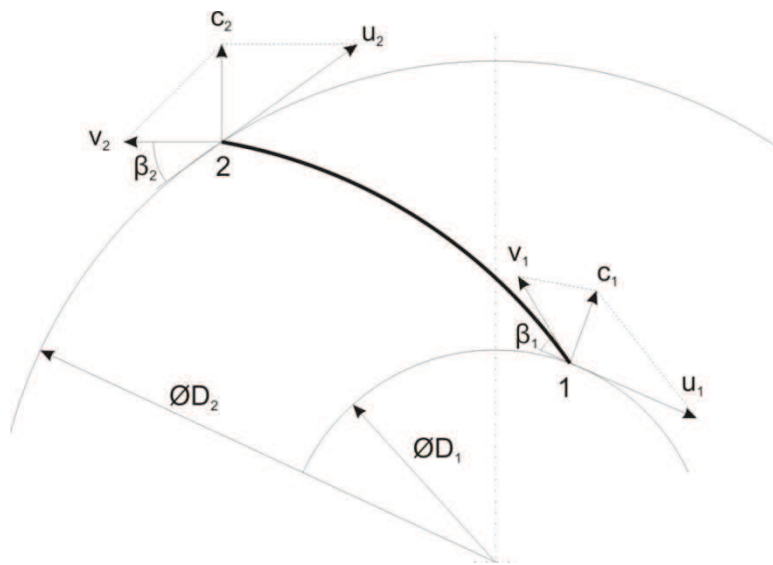
Celková sestava čerpadla, včetně uložení jednotlivých komponent je k nahlédnutí v příloze číslo 4.

#### 4.4. Výpočet čerpadla

Jestliže jsme vypracovali návrh čerpadla čistě ze zkušeností a dle čerpadla, které se reálně používá, měli bychom tento návrh podpořit i početně. Případně můžeme podle výpočtů stávající návrh pozměnit, aby vyhovoval požadovaným parametrům. Následující část tedy bude kombinovat současný návrh spolu s výpočty. Především zde budou vypočítány vstupní a výstupní rychlosti v lopatkovém oběžném kole. Dle těchto rychlostí bude dále upřesněn návrh tvaru lopatek, který vychází z jejich velikostí a směrů.

##### 4.4.1. Rychlosti v oběžném kole

Tekutina vtékající do rotoru má určitou rychlost, vlivem otáčení oběžného kola se tato rychlost rozloží na dvě složky, jednou je rychlost obvodová  $u$ , druhou je rychlost relativní  $v$ . Na obrázku 4.6, je tento rychlostní rozklad naznačen v oběžném kole.



Obr. 4.6: Rychlosti v oběžném kole

Kapalina vstupuje do oběžného kola na průměru  $D_1$ , přičemž vstupní rychlost je zde označena jako celková  $c_1$ . Tato rychlost se následně rozloží na dvě složky –  $u_1$ ,  $v_1$ . Rychlost  $u_1$  je obvodová, je tedy definována průměrem  $D_1$  a velikostí otáček  $n$ , kterými se rotor otáčí. Druhou složkou celkové rychlosti je relativní  $v_1$ , tato složka je tečná k začátku lopatky, na kterou nabíhá vstupní proud tekutiny.

Stejně jako se celková rychlost na vstupu do rotoru rozloží na jednotlivé složky, tak se na výstupu z rotoru opět z těchto rychlostí složí. Celková výstupní rychlost  $c_2$  je tedy výslednicí rychlostí  $v_2$  a  $u_2$ .

Základní rovnice

Základní rovnice vychází z upravené Bernoulliho rovnice 4.1, která uvažuje současně průtok sací částí, rotorem a výtlačnou částí, přičemž je použito značení rychlostí dle obrázku 4.6. [5]

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = \frac{H_{man}}{\eta_{man}} = H \quad 4.1$$

Kde  $H_{man}$ , je manometrická dopravní výška a  $\eta$  je manometrická účinnost, která se u jednostupňových nízkotlakých čerpadel přibližně určuje jako  $\eta = 0,55 \div 0,65$ .

Z obrázku 4.6 dále vyplývá, že můžeme rychlosti  $v_1$  a  $v_2$  vypočítat pomocí kosinové věty, rovnice 4.2 a 4.3. Takto vyjádřené rychlosti dosadíme zpět do rovnice 4.1, a přepíšeme do tvaru rovnice 4.4.

$$v_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1c_1 \cos \alpha_1 \quad 4.2$$

$$v_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2u_2c_2 \cos \alpha_2 \quad 4.3$$

$$c_1^2 + u_1^2 - 2u_1c_1 \cos \alpha_1 - c_2^2 - u_2^2 + 2u_2c_2 \cos \alpha_2 + u_2^2 - u_1^2 + c_2^2 - c_1^2 = \frac{2gH_{man}}{\eta_{man}} \quad 4.4$$

$$u_2 \underbrace{c_2 \cos \alpha_2}_{c_{u2}} - u_1 \underbrace{c_1 \cos \alpha_1}_{c_{u1}} = \frac{gH_{man}}{\eta_{man}} \quad 4.5$$

Jelikož voda vstupuje do oběžného kola radiálně, víme tedy že  $\alpha_1=90^\circ$ , z toho plyne  $\cos \alpha_1=0$ , rovnice 4.5 tedy získá tvar rovnice 4.6, kterou dále vyjádříme pro dopravní výšku  $H$ . Jak je patrné z rovnice 4.5, rychlost  $c_{u2}$  můžeme měnit tvarem lopatek, v praxi se nejlépe osvědčily lopatky s úhlem  $35^\circ$ , my zvolíme pro pozdější výpočty  $\beta=30^\circ$ . Další poznatek z praxe je takový, že nejlépe pracují čerpadla, která mají rychlost  $c_{u2}=0,65 \cdot u_2$ . [5]

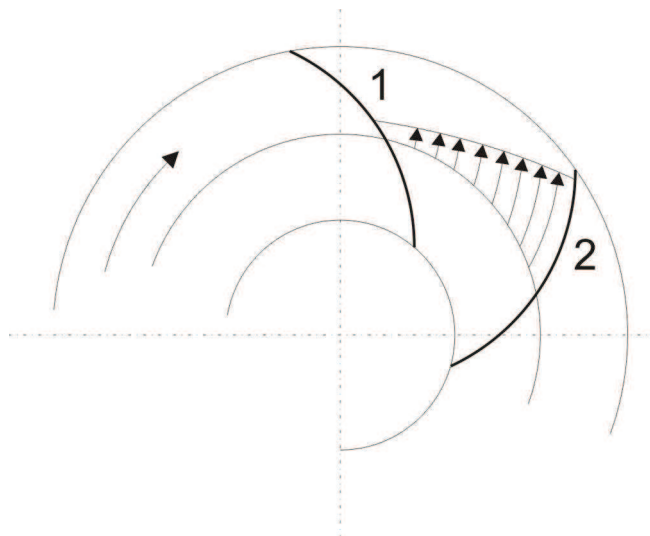
$$\frac{gH_{man}}{\eta_{man}} = u_2 c_{u2} = 0,65 \cdot u_2^2 \quad 4.6$$

$$H = H_{man} = \frac{0,65 \cdot u_2^2 \cdot \eta_{man}}{g} \quad 4.7$$

Pro zjednodušení rovnice zavedeme konstantu  $\mu$ , která je známá pro lopatky se zvoleným úhlem  $\beta=30^\circ$ . Hodnoty pro tento druh čerpadel jsou:  $\mu=0,7$  až  $0,9$ . Rovnice 4.7 se tedy změní na výslednou rovnici 4.8. [5]

$$H = \mu \frac{u_2^2}{2g} \quad 4.8$$

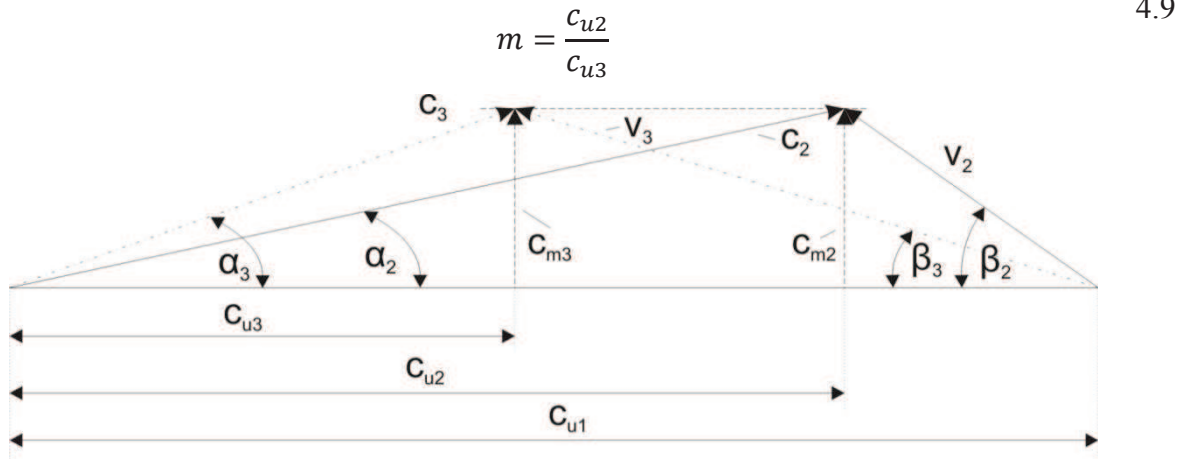
Kanál mezi lopatkami se směrem k výstupu rozšiřuje. Obrázek 4.7 demonstruje průběh rychlostí v mezilopatkovém kanále, které jsou ovlivněny tlakem od lopatek. Hřbet lopatky číslo 1 tlačí na proudící tekutinu, je zde tedy vyšší tlak, zatímco na vyduté stěně lopatky číslo 2 se tlak snižuje. Z Bernulliho zákona víme, že při klesajícím tlaku se zvětšuje rychlost a opačně. [5]



Obr. 4.7: Rozložení rychlosti v závislosti na tlaku

Důsledkem nesterjnoměrné rychlosti v mezilopátkovém kanále je i jiná výstupní rychlost, než je udávána rychlostním trojúhelníkem na obrázku 4.6. Rychlosti v tomto trojúhelníku nyní označíme jako teoretické. [5]

Teoretická relativní rychlost  $v_2$  je vlivem nesterjnoměrné rychlosti uvnitř kanálu strhávána proti směru otáčení rotoru, tím se přemění na  $v_3$ . Analogicky se změní i celková výstupní rychlost  $c_2$  na  $c_3$ , tuto změnu můžeme vyjádřit poměrem z rovnice 4.9. Rychlostní trojúhelník teoretických rychlostí se přemění na skutečný rychlostní trojúhelník dle obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Rychlostní trojúhelník teoretických a reálných rychlostí

#### 4.4.2. Shrnutí základních poznatků

Výpočet čerpadla nám umožňuje Bernoulliho rovnice, kterou jsme upravili pro výpočet dopravní výšky. Ukázali jsme si rozklad rychlostí na vstupu a výstup do lopátkového kola. Také byla vysvětlena změna teoretické rychlosti  $c_2$  na reálnou rychlost  $c_3$ . Výše uvedené rovnice a poznatky budeme nyní aplikovat na náš konkrétní případ a provedeme výpočet.

#### 4.4.3. Vstupní parametry

Abychom mohli provést početní návrh, musíme znát alespoň některé základní parametry, ze kterých budeme vycházet. V našem případě známe dopravní výšku  $H$ , čímž je myšlen celý vodní sloupec, ve kterém bude čerpadlo pracovat a kde musí dopravovat kapalinu. Dále máme zadán průtočný objem  $Q$ , kterým by přibližně měla tekutina proudit. Jelikož návrh čerpadla je limitován rozměry, použijeme jako další vstupní parametr již dříve navržený vnější průměr oběžného kola  $D_2$ , a zvolíme si velikost sacího otvoru  $D_s$ .

$$H = 900 [mm] = 0,9[m]$$

$$D_2 = 68 [mm] = 0,068 [m]$$

$$Q = 1,2 [l/sec] = 0,0012 [m^3/sec]$$

$$D_s = 45 [mm] = 0,045 [m]$$

Nejprve použijeme rovnici 4.8, kterou si vyjádříme pro rychlost  $u_2$ . Velikost konstanty  $\eta$  zvolíme 0,8. [5]

$$H = \mu \frac{u_2^2}{2g} \rightarrow u_2 = \sqrt{2g \frac{H}{\eta}} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{0,9}{0,8}} \quad 4.10$$

$$\underline{u_2 = 4,69 [m/s]} \quad 4.11$$

Základní rovnice 4.1-4.5 jsou psané pro teoretické rychlosti, jak už ale víme, výstupní rychlost se změní z  $c_2$  na  $c_3$ . Změna těchto rovnic je jen formální, přepíšeme index 2 na index 3, k výpočtu tedy použijeme následující rovnici 4.12.

$$c_{u3} = \frac{g \cdot H_{man}}{\eta_{man} \cdot u_2} \quad 4.12$$

Manometrickou účinnost  $\eta_{man}$  odhadneme ve velikosti  $\eta_{man} = 0,68$ .

$$c_{u3} = \frac{9,81 \cdot 0,9}{0,68 \cdot 4,69} \quad 4.13$$

$$\underline{c_{u3} = 2,76 [m/s]} \quad 4.14$$

Nyní vezmeme v úvahu vztah, který již byl uveden v předchozí kapitole a to:

$$c_{u2} = 0,65 \cdot u_2 = 0,65 \cdot 4,69 \quad 4.15$$

$$\underline{c_{u2} = 3,05 [m/s]} \quad 4.16$$

V dalším výpočtu budeme vycházet opět z rychlostních trojúhelníků dle obrázku 4.8. Na tomto obrázku jsou zavedeny meridiální složky celkové rychlosti  $c_{m3}$  a  $c_{m2}$ , obě složky mají stejnou velikost. Dle obrázku 4 můžeme psát následující rovnici, přičemž zde použijeme již dříve zvolené  $\beta = 30^\circ$ .

$$c_{m2} = c_{m3} = (u_2 - c_{u2}) \operatorname{tg} \beta = (4,69 - 3,05) \operatorname{tg} 30^\circ \quad 4.17$$

$$\underline{c_{m2} = c_{m3} = 0,95 [m/s]} \quad 4.18$$

Jestliže známe hodnotu  $c_{m3}$  a  $c_{u3}$ , můžeme nyní vypočítat celkovou výstupní rychlost  $c_3$ , tento vztah je také patrný z obrázku 4.8.

$$c_3 = \sqrt{c_{u3}^2 + c_{m3}^2} = \sqrt{2,75^2 + 0,95^2} \quad 4.19$$

$$\underline{c_3 = 2,92 [m/s]} \quad 4.20$$

Vyřešili jsme tedy rychlost výstupního proudu na vnějším poloměru lopatkového kola. Nyní musíme navrhnout vnitřní rozměr lopatek, konkrétně nás zajímá, jaký by měl být průměr, kde budou začínat lopatky a jaká zde bude vstupní rychlost. Začneme tedy tím, že vypočítáme otáčky  $n$  rotoru z obvodové rychlosti  $u_2$ . Z těchto otáček můžeme následně vypočítat specifické otáčky  $n_s$ , díky nimž můžeme určit, jaký by měl být tvar oběžného kola.

$$n = \frac{u_2 \cdot 60}{\pi \cdot D_2} = \frac{4,69 \cdot 60}{\pi \cdot 0,068} \quad 4.30$$

$$\underline{n = 1320 [ot/min]} \quad 4.31$$

$$n_s = 3,65 \cdot \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} = 3,65 \cdot \frac{1320\sqrt{0,0012}}{\sqrt[4]{0,9^3}} \quad 4.32$$

$$\underline{n_s = 180 \text{ [ot/min]}} \quad 4.33$$

Následující tabulka porovnává typy oběžných kol v závislosti na specifických otáčkách a poměru průměrů  $D_2/D_0$ . Přičemž průměr  $D_0$  je zpravidla jen o něco málo menší než průměr  $D_1$ , na kterém začínají lopatky oběžného kola. Průměr  $D_1$  se určí ze vzorce 4.34.

$n_s$	40 - 80	80 - 150	150 - 300	300 - 600	600 - 1200
$D_2/D_0$	2,5	2	1,8 - 1,4	1,2 - 1,1	0,8
Typ oběžného kola	Pomaluběžné	Normální	Rychloběžné	Diagonální	axiální

Tabulka 2: Typ lopatek v závislosti na středních otáčkách [5]

$$D_1 = D_0 + 1 \text{ až } 10 \text{ mm} \quad 4.34$$

Z uvedené tabulky můžeme snadno určit, že oběžné kolo bude rychloběžné. Poměr  $D_2/D_0$  se pohybuje v rozmezí 1,8 až 1,4. Jelikož otáčky jsou spíše u dolní hranice, zvolíme větší z nabízených poměrů, tedy 1,8. Z tohoto tedy můžeme vypočítat velikost průměru  $D_0$  a následně i průměr  $D_1$ .

$$D_0 = \frac{D_2}{1,8} \quad 4.35$$

$$D_0 = 37,7 \text{ [mm]} \quad 4.36$$

$$\underline{D_1 = 40 \text{ [mm]}} \quad 4.37$$

Známe-li průměr počátku lopatek a otáčky celého kola můžeme snadno vypočítat obvodovou rychlost  $u_1$  dle 4.38.

$$u_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,04 \cdot 1320}{60} \quad 4.38$$

$$\underline{u_1 = 2,76 \text{ [m/s]}} \quad 4.39$$

Jelikož neznáme další vstupní rychlosti, určíme si nejprve sací rychlost  $c_s$ , která závisí na průtočném množství  $Q$  a na průměru sacího potrubí  $D_s$ . Obojí známe, tudíž můžeme sací rychlost vypočítat z následujícího vztahu.

$$c_s = \frac{4Q}{\pi D_s^2} = \frac{4 \cdot 0,0012}{\pi \cdot 0,045^2} \quad 4.40$$

$$c_s = 0,76 \quad 4.41$$

Známe-li sací rychlost, můžeme odhadnout vstupní rychlost  $c_l$  do lopatkového kola. Jelikož víme, že rychlost má vzrůstat pozvolna určíme vstupní rychlost o něco málo větší než je vypočítané  $c_s$ .

$$\underline{c_1 = 0,95 \text{ [m/s]}} \quad 4.42$$

V dalším kroku zjistíme hodnotu úhlu  $\beta_1$ , tento úhel je důležitý pro konstrukci zakřivení lopatky. Zároveň je tento úhel odchylkou relativní rychlosti  $v_1$  od obvodové rychlosti  $u_1$ . Můžeme ho ale také vyjádřit pomocí rovnice 4.34. Jako poměr celkové rychlosti  $c_1$  k obvodové rychlosti  $u_1$ .

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{c_1}{u_1} = \frac{0,95}{2,76} = 0,3442 \quad 4.43$$

$$\beta = 19^\circ \quad 4.44$$

#### 4.5. Závěrečné vyhodnocení

Při početním návrhu čerpadla byly použity vstupní parametry, díky nimž jsme mohli dané rovnice aplikovat. Při úpravě rovnic často docházelo k určitému zjednodušení a zavádění konstant, které jsou určeny praxí nebo podloženy jinými výpočty. Můžeme ale konstatovat, že tato zjednodušení nevnese do výpočtu příliš velikou chybu. Proto bychom mohli považovat tyto výpočty za dostačující. Přesvědčili jsme se, že dříve navržené čerpadlo může reálně fungovat. Při otáčkách 1320 ot/min bude výstupním průřezem dodávána rychlost 2,92 m/s. Z výše popsanych rovnic můžeme také snadno zkonstruovat správný tvar lopatek oběžného kola. Tyto výpočty můžeme tedy použít pro přesnější návrh lopatkového kola.

Samozřejmě musíme mít stále na mysli, že celá smyčka je především experimentální zařízení, u kterého lze zatím pouze předpokládat, jak se vše vlastně bude chovat. I toto čerpadlo je více méně experimentální, proto bude vhodnější ověřit funkčnost čerpadla raději v praxi, nežli pouze výpočtem. Výše uvedený výpočet je čistě orientační, jaký průtok ve skutečnosti čerpadlo zajišťuje, bude zjišťováno pomocí průtokoměrů. Návrh na měření tohoto průtoku je uveden v následující kapitole.

## 5. Návrh měření průtoku

Hlavním úkolem celé smyčky je pojmoutí roztavených solí a zajištění jejich cirkulace. Tyto soli budou zároveň zkoumány z několika aspektů. Jedním z nich bude i zjišťování, jaký je průtok solí v základní smyčce. Abychom mohli tento průtok změřit, musíme zvolit vhodné zařízení, které bude splňovat jisté konstrukční požadavky a zároveň bude poskytovat dostačující výsledky pro daný výzkum.

Pro měření průtoku lze použít velké množství zařízení a také měřících metod. Nejprve si však nadefinujeme, co to vlastně průtok je, co tedy vlastně budeme měřit.

Pojmem průtok můžeme označovat buď rychlost proudění tekutiny v daném objemu, nebo ho můžeme měřit jako objemový, či hmotnostní průtok. Objemový průtok představuje objem tekutiny, který proteče daným průřezem, za jednotku času, například  $\text{m}^3/\text{s}$ . Hmotnostní průtok udává hmotnost tekutiny, která proteče daným průřezem za jednotku času, například  $\text{kg}/\text{s}$ . Hmotnostní průtok je přímo úměrný objemovému průtoku. Jestliže objemový průtok vynásobíme hustotou protékající kapaliny, získáme tímto průtok hmotnostní. Pro zjištění průtoku tedy můžeme měřit jak rychlost proudění tekutiny, tak objemový průtok, či hmotnostní průtok. Mezi nejčastější metody měření průtoku však patří metoda měření rozdílů tlaků před a za měřícím elementem. [6]

Abychom zvolili tu nejlepší a nejvhodnější metodu měření průtoku, musíme nejprve provést vyhodnocení všech metod, které jsou dostupné, a poté vybrat tu, která bude ideální pro naše zařízení.

### 5.1. Rozdíl tlaků

Jak již bylo zmíněno, nejčastěji se průtok měří pomocí rozdílů tlaků před a za měřícím elementem průtokoměru, tímto elementem může být například clona, dýza či Venturiho trubice. Tento element se vloží do potrubí, důsledkem toho je změna průřezu, kterým musí měřená tekutina protéct. V případě clony se jedná zpravidla o kovovou desku, která má uprostřed kruhový otvor, jímž bude nyní tekutina protékat, před a za clonu se umístí snímací zařízení, která měří tlak v oblasti před a za clonou. [7]

Princip tohoto měření je založen na Bernoulliho rovnici. Jestliže do proudu vložíme desku s průtokovým otvorem menším než je průřez potrubí, bude tímto otvorem tekutina protékat s vyšší rychlostí a zároveň dojde v tomto místě k poklesu tlaku. Tento tlakový pokles měříme. Průtok clonou musí zároveň splňovat rovnici kontinuity nestlačitelného proudění, tedy množství, které teče před clonou, musí za clonou také vytékat, toto vyjadřuje rovnice 5.1. Současně ale také vznikají jisté tlakové ztráty, které se při výpočtu musejí zohlednit. Můžeme tedy napsat Bernoulliho rovnici ve formě tlaků, přičemž index 1 označuje vstupní hodnoty a index 2 výstupní, ke kterým jsou zahrnuty i ztráty, viz rovnice 5.2. [6]

$$w_1 S_1 = w_2 S_2 \quad 5.1$$

$$p_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} + \zeta \rho \frac{w_2^2}{2} \quad 5.2$$

kde:  $p$  – tlak

$\rho$  – hustota proudícího média

$w$  – rychlost

$\zeta$  – ztrátový součinitel



Zajímá nás, jaká je rychlost za clonou, tudíž dosadíme rovnici 5.1 do rovnice 5.2. Poměry průřezů a ztrátový součinitel nahradíme takzvaným průtokovým součinitelem  $\mu$ , který uplatníme ve výsledné upravené rovnici 5.3

$$w = \mu \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad 5.3$$

.Hodnotu průtokového součinitele můžeme dohledat v tabulkách. Rozměry clony jsou určeny normou, aby měření bylo směrodatné, musí být úseky před a za clonou, dostatečně dlouhé. Délku těchto úseků můžeme taktéž najít v příslušné normě. [7]

Nyní, když víme, jak tato metoda funguje, můžeme se rozhodnout, zda jí budeme uvažovat jako vhodnou pro naši konstrukci.

Vzhledem k tomu, že ve smyčce budou proudit roztavené soli o teplotě okolo 700°C, musela by být clona z materiálu, který by této teplotě odolal. Tento problém by šel vyřešit vyrobením clony ze stejného materiálu, jako je celá konstrukce smyčky. Avšak je nežádoucí cokoli vkládat do vnitřního prostoru smyčky, protože se jedná o experiment, kde se bude zkoumat také usazování solí v jednotlivých částech tohoto zařízení. Vložením clony bychom tedy tento jev mohli výrazně ovlivnit a soli by se mohly v této oblasti nežádoucně usazovat.

Další, pro nás nevhodný, požadavek je na umístění clony. Ta musí být v potrubí umístěna tak, aby před i za clonou byl dostatečně dlouhý uklidňovací úsek. Při rozměrech naší smyčky však nejsme schopni tento požadavek zajistit.

Závěrečné stanovisko tedy je, že použití průtokoměru se clonou není vhodné použít pro měření průtoku v naší smyčce. Stejně tak vyloučíme z navrhovaných řešení všechny průtokoměry, u kterých je nutné vložit měřící zařízení přímo do proudu, či jinak mechanicky upravovat potrubí, vše kvůli výše zmíněným důvodům. Musíme se tedy zaměřit na průtokoměry, které nevyžadují zásadní zásahy do konstrukce.

## 5.2. Bezkontaktní průtokoměry

### 5.2.1. Indukční – elektromagnetické průtokoměry

Měření průtoku pomocí indukčních průtokoměrů vyžaduje, aby měřená tekutina byla vodivá a zároveň zaplňovala celý průřez potrubí. Obě tyto podmínky jsou v našem případě splněny, proto se můžeme touto metodou zabývat hlouběji.

Princip této metody vyjadřuje Faradayův zákon. Ten hovoří o tom, že pohybem vodiče v homogenním magnetickém poli se indukuje elektrické napětí. Faradayův zákon je popsán rovnicí 4.

$$U_i = B \cdot D \cdot w \quad 5.4$$

Kde  $U_i$  – Indukované napětí

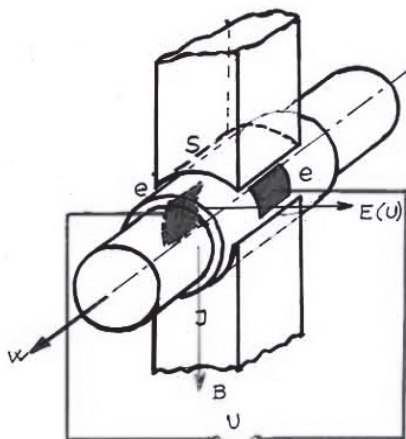
$B$  – magnetická indukce

$D$  – průměr potrubí (délka vodiče) vzdálenost mezi magnety

$w$  – rychlost vodiče

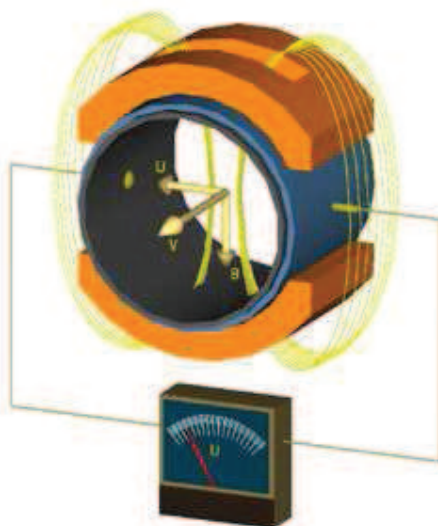
Abychom mohli použít tento průtokoměr, musíme splnit několik základních podmínek. Zprvė mít pohyblivý vodič, v našem případě bude tuto úlohu splňovat tekutina proudící ve smyčce. Roztavené soli jsou elektricky vodivé a pohybují se určitou rychlostí, která by měla

být dostatečná pro měření. Za druhé musíme vytvořit homogenní magnetické pole; to lze získat několika způsoby. Nejčastěji lze magnetické pole vytvořit pomocí permanentních magnetů, ty se přiloží na trubku z obou stran a tím vytvoří magnetické pole. Kolmo k magnetickému poli se umístí elektrody. V těchto elektrodách vzniká napětí, od pohybu vodivé kapaliny magnetickým polem. Princip tohoto jednoduchého průtokoměru je patrný z obrázku 5.1. [8]



Obr 5.1: Schéma indukčního průtokoměru

Homogenní magnetické pole lze také vytvořit pomocí cívky, do které budeme přivádět buď střídavý, nebo stejnosměrný proud. Jestliže použijeme stejnosměrný proud, může mezi elektrodami vznikat kromě indukovaného napětí ještě polarizační napětí (kapalina může fungovat jako elektrolyt). Toto nám vnáší do měření určitou chybu, která bude zatěžovat měření průtoku. Proto je vhodnější, když bude magnetické pole buzeno střídavým napětím, měření poté bude přesnější. Na obrázku 2 je vyobrazen indukční průtokoměr firmy Elis, který se skládá z magnetické a nevodivé trubky. [9]



Obr 5.2: Moderní průtokoměr [9]

Střídavé magnetické pole je buzeno pomocí dvou cívek a elektrody jsou umístěny kolmo na směr magnetických siločar. Velikost indukovaného napětí nám zobrazí připojený měřicí přístroj. Z již uvedené rovnice č. 4 si vypočteme rychlost proudění, jelikož všechny ostatní

veličiny jsou známé. Pokud známe rychlost proudění, můžeme snadno dopočítat objemový průtok  $Q_v$ , dle rovnice 5.5. [8]

$$Q_v = w \cdot S \quad 5.5$$

Kde  $Q_v$  – objemový průtok

$w$  – rychlost proudu

$S$  – průřez potrubí

Tato varianta měření průtoku se zdá být celkem vhodná pro naše zařízení. Avšak je zde problém s umístěním tohoto zařízení. Firma Elis, která se zabývá výrobou těchto průtokoměrů, má v nabídce spoustu rozměrů. Avšak průtokoměr, který by průměrem odpovídal potrubí, kde se bude průtok měřit, má délku 104 mm. My musíme vzít v úvahu, že po celé smyčce budou umístěna topná tělesa, která smyčku zahřívají na vysokou teplotu. Umístění průtokoměru mezi topné těleso a trubku samotné smyčky nepřipadá v úvahu. Museli bychom tedy průtokoměr umístit mezi dvě topná tělesa. Je zde ale prostor k zamyšlení, zda se dané místo bez topných těles nebude prohřívát jinak, než okolní místa pod topnými tělesy a zda tato asymetrie nebude působit nějaké komplikace. Dále musíme vzít v úvahu, zda existuje na trhu tak odolný průtokoměr, jenž by šel připevnit na trubku, která bude mít teplotu okolo 700°C, a pokud takto odolný průtokoměr objevíme, další otázkou bude jeho cena. Jelikož se jedná o experimentální zařízení, u kterého je snaha, aby náklady byly co nejnižší, bude tato otázka hrát jistě velikou roli při výběru.

Shledáváme tedy tento způsob měření jako vhodný, ale pokusíme se ještě nalézt vhodnější a levnější řešení.

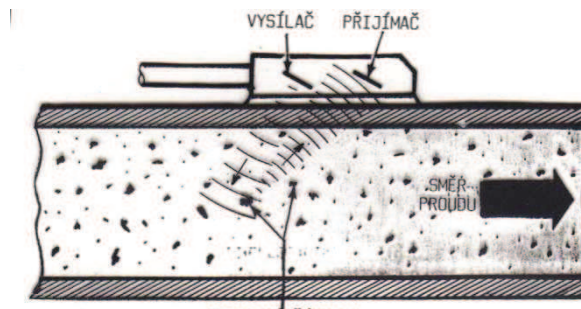
### 5.2.2. Ultrazvukový průtokoměr

Dalšími zástupci bezkontaktního měření průtoku jsou ultrazvukové průtokoměry. Ty jsou založeny na dvou principech. Jeden funguje na základě Dopplerova efektu a druhý měří dobu průchodu akustického signálu médiem

## 5.3. Dopplerův jev

Průtokoměry založené na tomto jevu můžeme používat, pouze pokud měřené médium obsahuje jisté nehomogenity. Například obsahuje-li tekutina nějaké tuhé částice, bublinky, či jiné nečistoty. Těchto částic by mělo být alespoň 25 na milion částic čisté tekutiny a jejich minimální velikost by měla být alespoň 30  $\mu\text{m}$ . [8]

Dopplerův jev je totiž založen na rozdílné frekvenci vyzařovaného signálu oproti přijímanému signálu. Vysílač i přijímač ultrazvukového signálu je obvykle umístěn v jednom pouzdru, odtud je vyslán signál o určité frekvenci do proudící tekutiny. Jestliže v této tekutině proudí i již zmíněné množství nehomogenit, vlna ultrazvuku se od této částice odrazí a vrátí se zpět do pouzdra k přijímači. Vzhledem k pohybu nehomogenních částic spolu s tekutinou, je frekvence odraženého vlnění odlišná od frekvence vysílané vlny. Rozdíl těchto frekvencí je pak i přímo úměrný rychlosti proudící kapaliny. Princip měření průtoku za pomoci Dopplerova efektu je naznačen na obrázku 5.3.

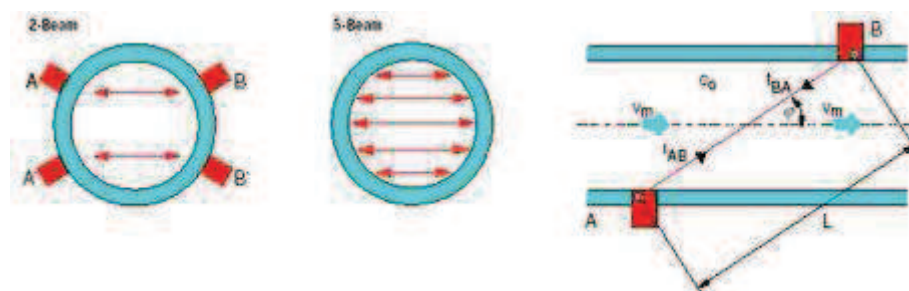


Obr 5.3: Ultrazvukový průtokoměr- Dopplerův jev

### Měření doby průchodu médiem

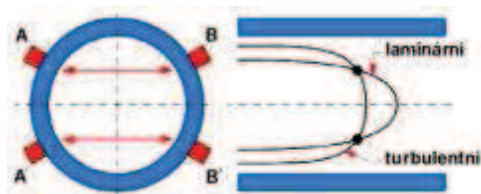
Ultrazvukový průtokoměr, který měří, za jak dlouho projde signál médiem, se používá převážně pro čisté kapaliny. Na potrubí, ve kterém chceme měřit průtok, umístíme 2 měřící jednotky a to tak, že budou za sebou v určité vzdálenosti a ve směru proudění. Obě budou současně jak přijímat signál, tak vysílat. Akustické vlnění, které se šíří po směru proudění, urazí vzdálenost mezi měřícími jednotkami rychleji, než vlnění, které se bude šířit proti proudu. Rozdíl mezi dobou průchodu vlnění po proudu a proti proudu je přímo úměrný rychlosti proudění média. [6]

Přesnost měření tímto průtokoměrem také závisí na rychlostním profilu sledované tekutiny. Záleží tedy také na tom, kam přesně sondy umístíme, v které části rychlostního profilu se bude vlnění pohybovat. Aby se měření co nejvíce zpřesnilo, používá se většinou více sond na jeden úsek, akustické vlnění poté prochází více oblastmi rychlostního profilu. Hodnoty z těchto měření se následně vyhodnotí tak, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího výsledku. Umístění sond a princip měření jsou zřetelné na následujícím obrázku (5.4), pravý obrázek zobrazuje klasické dvoudráhové řešení, zatímco prostřední zachycuje přesnější pětidráhové použití, krajní obrázek zobrazuje průchod vlny v podélném řezu. [10]

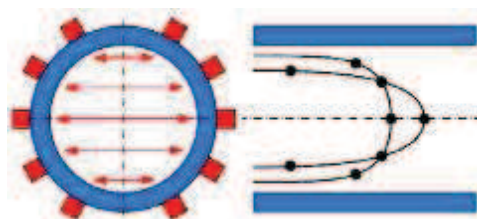


Obr 5.4: Ultrazvukový průtokoměr - měření doby průchodu signálu

Obrázky 5.5 a 5.6 zachycují, kudy prochází akustické vlnění vzhledem k rychlostnímu profilu. V levé části obrázků je vždy zobrazen příčný řez s naznačeným rozmístěním měřících jednotek, pravá část obrázků ukazuje rychlostní profil v podélném řezu, přičemž černé puntíky znázorňují body, kudy bude procházet akustické vlnění. [10]



Obr 5.5: Dvoudráhové měření [10]



Obr 5.6: Pětidráhové měření [10]

### Zhodnocení ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry nejsou nikterak konstrukčně náročné, ať už fungují na Dopplerově jevu nebo měří dobu průchodu vlnění. Tento fakt je pro naši konstrukci velice důležitý. Vzhledem k topným tělesům máme jen omezený prostor, kam můžeme umístit měřicí jednotky. Ty jsou u ultrazvukových průtokoměrů poměrně kompaktní, tudíž by se do těchto nevelkých prostorů mohly vejít. Jediné, co je třeba zajistit, je přesné umístění sond, aby nedocházelo k únikům signálu do okolí, což by ovlivňovalo kvalitu výsledků. Dále budeme muset najít takové měřicí zařízení, které by odolávalo vysokým teplotám, které jsou na povrchu potrubí. Nabízí se také možnost umístění sond, které vysílají akustický signál do dostatečné vzdálenosti, kde již nebude tak vysoké teplotní namáhání. Přičemž by se akustický signál přiváděl do tekutiny přes distanční materiál, který by zároveň zajišťoval tuto bezpečnou vzdálenost.

Zda bude použit vícesondový průtokoměr nebo průtokoměr s Dopplerovým jevem, záleží na druhu proudícího média. Prakticky by šly použít oba dva, ale z hlediska přesnosti měření bude lépe vyhovující průtokoměr, který měří dobu průchodu signálu, jelikož zde můžeme zohlednit i zda je proudění turbulentní, či laminární.

### 5.4. Závěrečné stanovisko

Použití clony je nevhodné z konstrukčního hlediska. Clona by se musela vložit přímo do proudu, což by mohlo negativně ovlivňovat průběh celého experimentu.

Elektromagnetický – indukční průtokoměr je již o něco vhodnější než clona, ale měřicí zařízení je poměrně robustní a umístění na konstrukci smyčky by bylo obtížné. Navíc v místě s průtokoměrem nemůžeme již použít topná tělesa, což by mohlo vést ke špatnému prohřátí konstrukce v tomto místě.

Za nejvhodnější způsob měření průtoku tedy budeme považovat měření pomocí ultrazvuku. Měřicí sondy se dají umístit do prostoru mezi dvě topná tělesa, což je pro nás v současné době nejdůležitější kritérium.

## 6. Pevnostní výpočet nádob

Základní konstrukci smyčky již máme hotovou, splňuje veškeré požadavky, které na ni byly kladeny. Finální návrh je tedy uspokojivý a mohl by být takto zadán do výroby. Nežli se toto uskuteční, musíme si nejprve ověřit, že návrh smyčky je bezpečný. Velké nádoby Ø114 budou naplněny roztavenými solemi o tlaku 0,2 MPa, které budou stěnu namáhat, a mohlo by dojít k jejímu poškození. Proto u těchto nádob provedeme pevnostní výpočet, zda namáhání nádoby nepřesáhne bezpečné dovolené napětí. Nádoby budeme počítat jako tenkostěnné skořepiny.

### 6.1. Výpočet tenkostěnných skořepin

Tenkostěnné skořepiny nazýváme rotačně symetrická tělesa, kde je tloušťka stěny nádoby tak malá, že ji vzhledem k průměru nádoby můžeme zanedbat. Zároveň takto tenká stěna není schopna přenášet ohybový moment, proto se také někdy tato metoda označuje jako tzv. bezmomentová teorie skořepin.

Tato teorie bude nyní popsána na tělese tvaru rotačního paraboloidu, jelikož je to nejnázornější. Výpočet se provádí pomocí Laplaceovy rovnice (6.1).

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{t} \quad 6.1$$

Kde  $\sigma_m$  – Meridiánové napětí

$\sigma_t$  – Tečné napětí

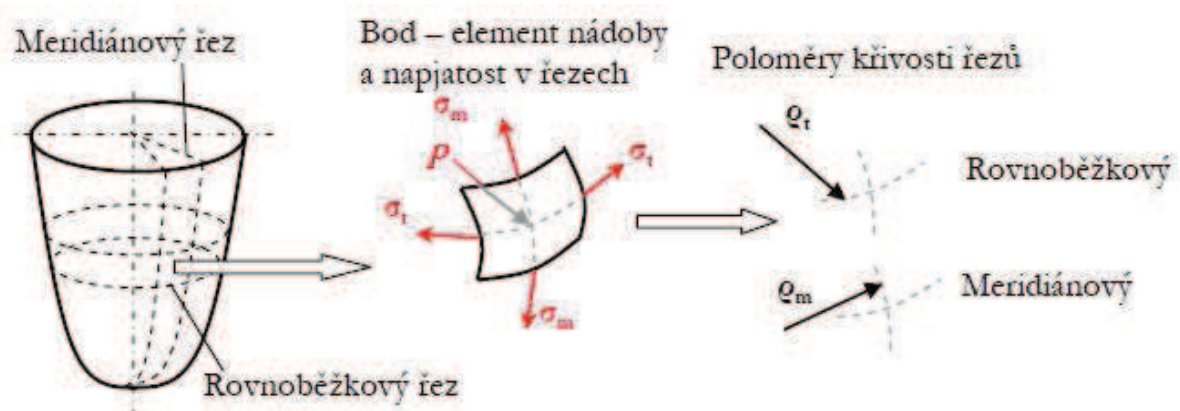
$\rho_m$  – Meridiánový poloměr křivosti

$\rho_t$  – Tečný poloměr křivosti

$p$  – Vnitřní tlak na stěnu

$t$  – Tloušťka stěny

Uvedené veličiny jsou názorně vidět na obrázku 6.1



Obr 6.1: Tenkostěnná skořepina - zobrazení řezů, [11]

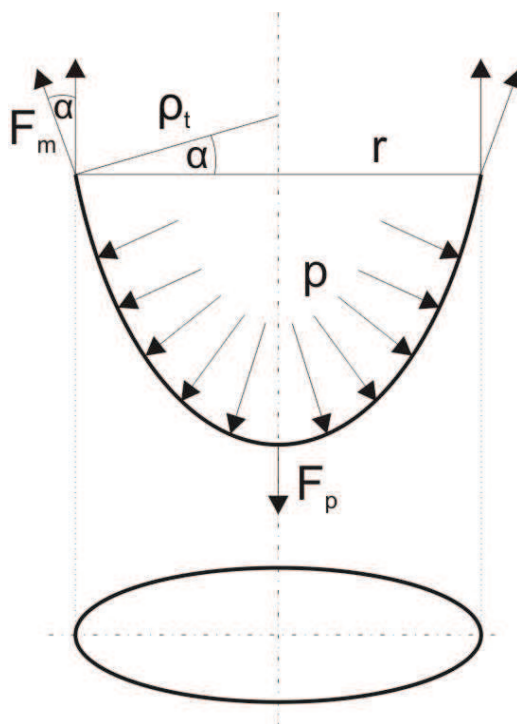
Vlevo na obrázku 6.1 je zobrazen rotační paraboloid, na němž jsou znázorněny dva meridiánové řezy, které prochází osou rotace, a dva rovnoběžkové řezy, které jsou na tuto osu kolmé. Budou-li si tyto dva meridiánové řezy nekonečně blízké a zároveň i oba rovnoběžkové řezy budou také nekonečně blízké, vznikne protnutím těchto řezů nekonečně malá plocha,

kteřá se již blíží bodu. Pro lepší názornost je takto vzniklý bod zvětšen uprostřed obrázku 6.1, kde jsou také interpretována napětí, která na daný bod působí. Poloměry křivosti jsou kolmé k ploše tohoto malého elementu. Na prostředním obrázku jsou viditelné jako osový kříž, pro jasnější představu jsou raději tyto poloměry popsány v levé části obrázku 6.1.

Z Laplaceovy rovnice (6.1) zatím známe jen tlak, tloušťku stěny a také budeme mít zadané poloměry. Co nám ale dosud schází, jsou velikosti napětí, stačí nám tedy odvodit meridiánové napětí, abychom dopočítali napětí tečné.

### 6.1.1. Určení meridiánového a tečného napětí

Meridiánové napětí určíme z podmínky rovnováhy ve směru osy skořepiny. Rozložení sil v této ose je zobrazeno na obrázku 6.2.



Obr 6.2: Síly působící na meridiánový řez

Meridiánové napětí působí tečně k meridiánovému řezu, je tedy dle obrázku 6.2 sklopeno od osy rotace o úhel  $\alpha$ . Meridiánové napětí působí na plochu stěny po celém jejím obvodu, tímto napětím je tedy vyvolávána síla  $F_m$ . Tuto sílu rovnou převedeme do směru osy rotace, tedy vynásobíme ji  $\cos\alpha$ , dle rovnice 6.2.

$$F_m = \sigma_m \cdot 2\pi r \cdot t \cdot \cos\alpha \quad 6.2$$

Kde  $F_m$  - síla od meridiánového napětí na obvod tělesa

$\sigma_m$  - Meridiánové napětí

$2\pi r$  - obvod kruhu v místě řezu

$t$  - tloušťka stěny nádoby

$\alpha$  - úhel sklonu od osy rotace

Další síla, která působí ve směru osy rotace, je síla vyvolaná vnitřním tlakem tekutiny. Tento tlak působí na celé ploše v daném řezu, dle obrázku 6.2. Síla vyvolaná od tohoto tlaku je popsána rovnicí 6.3.

$$F_p = p \cdot \pi r^2 \quad 6.3$$

Kde  $F_m$  - síla vyvolaná tlakem  
 $p$  - tlak  
 $\pi r^2$  - plocha tekutiny v místě řezu

Rovnice rovnováhy v ose rotace je poté následující:

$$\sum F_i = 0 \quad 6.4$$

Dosazením rovnic 6.2 a 6.3 do rovnice rovnováhy 6.4 získáme následující vztah 6.5, přičemž respektujeme, že síla  $F_p$  směřuje na opačnou stranu než  $F_m$ , tudíž bude znaménko opačné.

$$\sigma_m \cdot 2\pi r \cdot t \cdot \cos\alpha - p \cdot \pi r^2 = 0 \quad 6.5$$

Pomocí jednoduchých úprav získáme z rovnice 6.5  $\sigma_m$ .

$$\sigma_m = \frac{pr}{2t\cos\alpha} \quad 6.6$$

Jak je ale patrné z obrázku 6.2, můžeme přepsat  $r/\cos\alpha$  na tečný poloměr křivosti  $\rho_t$ .

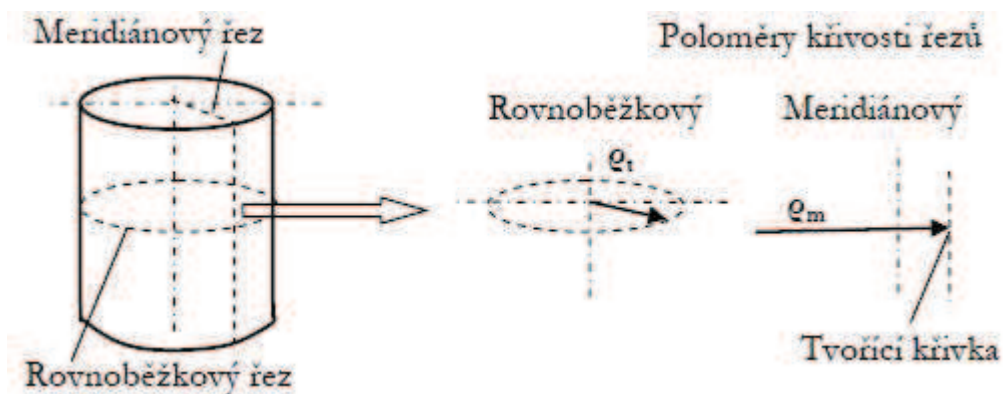
$$\sigma_m = \frac{p\rho_t}{2t} \quad 6.7$$

Meridiánové napětí tedy již známe. Dosazením rovnice 6.7 do rovnice 6.1 získáme zbývající tečné napětí  $\sigma_t$ .

$$\sigma_t = \frac{p}{t} \cdot \left[ 1 - \frac{\rho_t}{2\rho_m} \right] \quad 6.8$$

Všechny výše popsané rovnice jsou platné pro obecný výpočet rotačních skořepin. Nyní si tyto rovnice upravíme pro naši nádobu, tedy na válcovou rotační skořepinu. Především se tedy změní poloměry křivosti. Tečný poloměr křivosti bude totožný s vnitřním poloměrem nádoby, zatímco meridiánový poloměr křivosti bude nekonečně velký. Tento jev je způsoben tím, že meridiánový řez bude nyní přímkou a poloměr křivosti přímky je nekonečný. Všechny tyto skutečnosti jsou znázorněny na obrázku 6.3.





Obr 6.3: Zobrazení řezů u tenkostěnného válce [11]

Přepíšeme tedy nyní rovnice 6.7 a 6.8 pro napětí, která budou působit na tenkostěnný válec. Přičemž tedy  $\rho_t = r$  a  $\rho_m = \infty$

$$\sigma_m = \frac{pr}{2t} \quad 6.9$$

$$\sigma_t = \frac{pr}{t} \quad 6.10$$

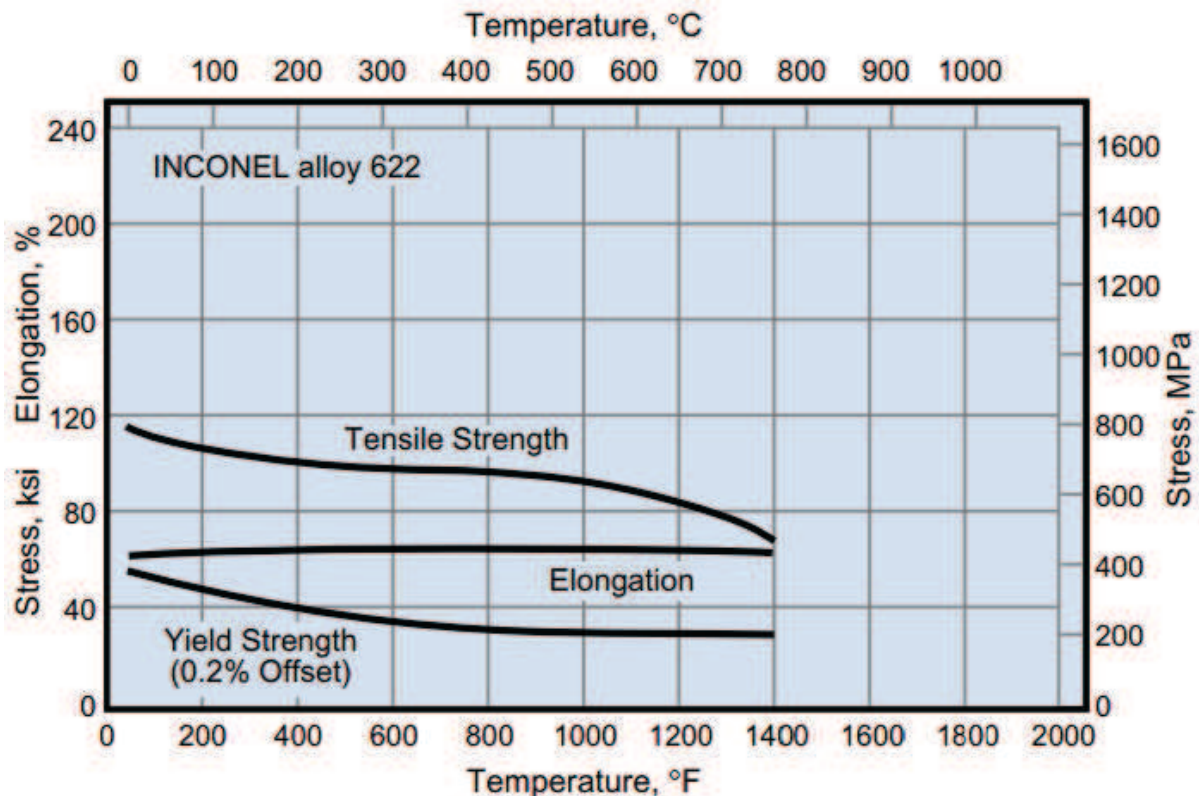
Z rovnic 6.9 a 6.10 jasně vyplývá, že u válcových tenkostěnných skořepin je tečné napětí dvakrát větší než napětí meridiánové.

$$\sigma_t = 2\sigma_m \quad 6.11$$

## 6.2. Pevnostní výpočet nádob

Základní rovnice pro výpočet napětí v tenkostěnné rotační nádobě tedy máme stanovené. Nyní aplikujeme tyto znalosti na naši nádobu a spočítáme, zda dané namáhání vydrží. Abychom mohli zahájit výpočet, musíme si nejprve zjistit základní informace o materiálu, z kterého je naše nádoba vyrobena. Především nás bude zajímat jakou má materiál mez kluzu a mez pevnosti. Nádoba bude navíc ještě namáhána teplotně, tudíž nás budou zajímat především meze kluzu a pevnosti při pracovní teplotě nádoby. Tyto informace nalezneme v katalogu výrobce.

Grafy na obrázku 6.4 uvádějí typické mechanické vlastnosti materiálu Inconell 622, které uvádí výrobce tohoto materiálu. Vertikální osy představují teplotu ve stupních Celsia a Fahrenheita, horizontální osy určují prodloužení (levá stupnice) a napětí (pravá stupnice). Horní křivka nám říká, jaká je pevnost materiálu v tahu (Tensile Strength) v závislosti na teplotě. Prostřední křivka představuje míru prodloužení (Elongation). Spodní čára ukazuje smluvní mez kluzu (Yield Strength), u nás známou jako  $R_{p0,2}$  což je takové napětí, které způsobí, 0,2% trvalé deformace.



Obr 6.4: Graf mechanických vlastností INCONEL 622, v závislosti na teplotě [12]

Bohužel výrobce uvádí grafy těchto hodnot jen do teploty zhruba 750°C, počítaná nádoba může být ale provozována až na 800°C, musíme tedy mez kluzu a pevnosti přibližně odhadnout pro takto vysokou teplotu.

Odhadujeme tedy, že mez pevnosti bude dále klesat zhruba na hodnotu 400 MPa. Smluvní mez kluzu bude přibližně 200 MPa.

$$R_m = 400 \text{ [MPa]}$$

$$R_{p0,2} = 200 \text{ [MPa]}$$

Dovolené namáhání můžeme určit dvěma způsoby. Buď vydělíme mez pevnosti koeficientem bezpečnosti, který bude mít hodnotu okolo 2-3. Nebo použijeme podíl smluvní meze kluzu s koeficientem bezpečnosti o hodnotě 1,5. My vypočítáme obě hodnoty pro dovolené namáhání a jako směrodatnou zvolíme nižší z obou hodnot.

Dovolené napětí pro  $R_m = 400 \text{ MPa}$ ,  $k = 2,5$

$$\sigma_D = \frac{R_m}{k} = \frac{400}{2,5} = 160 \text{ [MPa]} \quad 6.12$$

Dovolené napětí  $R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$ ,  $k = 1,5$

$$\sigma_D = \frac{R_{p0,2}}{k} = \frac{200}{1,5} = 133 \text{ [MPa]} \quad 6.13$$

Budeme tedy dále uvažovat, že dovolené napětí má hodnotu:  $\sigma_D = 133 \text{ [MPa]}$

Nyní dosadíme do vzorců 6.9 a 6.10 vstupní hodnoty, abychom zjistili, jakými napětími je nádoba ve skutečnosti namáhána.

$p = 0,2$  [MPa] tlak uvnitř nádoby  
 $t = 3,05$  [mm] tloušťka stěny nádoby  
 $r = 53,95$  [mm] poloměr vnitřního průměru

$$\sigma_m = \frac{pr}{2t} = \frac{0,2 \cdot 53,95}{2 \cdot 3,05} = 1,77 \text{ [MPa]} \quad 6.9$$

$$\sigma_t = 2\sigma_m = 3,54 \text{ [MPa]} \quad 6.10$$

Jelikož jsme počítali víceosé namáhání, máme meridiánové a tečné napětí, musíme zvolit hypotézu pevnosti, díky které vypočteme redukované napětí  $\sigma_{red}$ . Redukované napětí můžeme poté přímo porovnat s napětím dovoleným.

Zvolíme si Hypotézu HMM, jelikož se ve zkoumaném bodu, pro který jsme stanovili rovnice pro  $\sigma_t$  a  $\sigma_m$ , nenachází žádné smykové napětí, můžeme rovnou stanovit, že meridiánové a tečné napětí jsou zároveň hlavními napětími, tedy:

$$\sigma_m = \sigma_1 \quad 6.14$$

$$\sigma_t = \sigma_2 \quad 6.15$$

Hypotéza HMM:  $\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} = \sqrt{1,77^2 + 3,54^2 - 1,77 \cdot 3,54} \quad 6.16$

$$\sigma_{red} = 3,06 \text{ [MPa]} \quad 6.17$$

Výsledné redukované napětí 6.17 porovnáme s dovoleným napětím 6.13.

$$\sigma_{red} = 3,06 \text{ [MPa]} \quad \sigma_D = 133 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{red} < \sigma_D \quad 6.18$$

Redukované napětí, které jsme vypočítali, je výrazně nižší, než napětí dovolené. Bezpečnostní podmínka je tedy splněna a můžeme s klidem konstatovat, že navržené nádoby jsou bezpečné a při jejich naplnění nedojde k materiálovému porušení.

## 7. Závěr

V bakalářské práci byla zpracována projektová studie experimentální smyčky. Byla navržena základní konstrukce, ze které se bude smyčka skládat. Dále byl navržen vhodný konstrukční materiál na její výrobu. Experimentální zařízení je tvořeno základní smyčkou s tavicí nádobou. Především jsme se zaměřili na konstrukční návrh jednotlivých komponent základní smyčky. Všechny tyto součásti byly vymodelovány v programu AutoDesk Inventor a následně popsány v jedné z kapitol této práce.

Celé experimentální zařízení je uloženo v hermetickém boxu. Tento box byl také v této práci navržen. Zároveň s tím bylo vymyšleno i uložení smyčky v tomto boxu.

Experimentální smyčka bude naplněna tekutými solemi, k zajištění jejich cirkulace je věnována další část této práce, která se zabývá návrhem čerpadla. Po uvážení všech požadavků bylo navrženo odstředivé čerpadlo, snadné konstrukce. Takto navržené čerpadlo bylo dále podloženo výpočtem, který přinesl uspokojivé výsledky.

Součástí tohoto projektu bylo také navržení vhodného zařízení pro měření průtoku. Z nabízených variant byla vybrána ta nejvhodnější, a to měření pomocí ultrazvukové metody. Ta je buď prováděna pomocí Dopplerova jevu, nebo se měří doba průchodu médiem. Která z těchto metod bude nakonec vhodnější, ukáže až samotný experiment.

U plnicí nádoby bylo ověřeno, zda bude splňovat bezpečnostní požadavky. Nádoba zde byla uvažována jako tenkostěnná skořepina a dle této úvahy byla i spočítána. Výsledné napětí bylo porovnáno s dovoleným napětím dle metody HMH. Díky tomuto výpočtu můžeme konstatovat, že navržená nádoba několikanásobně splňuje dovolené namáhání, tudíž nemusíme mít obavy, že by došlo k jejímu porušení.

Navržené zařízení tedy splňuje všechny požadavky, které na něj byly kladené. Výsledná konstrukce by mohla být použita pro reálný experiment s tekutými solemi. Námí navržená smyčka by po vyrobení měla být naplněna roztavenými solemi typu LiNa. S těmito solemi bude prováděn výzkum a měření jejich vlastností, tato činnost však již překračuje rámec této práce.

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo navrhnout konstrukční řešení, tento cíl se podařilo úspěšně splnit. Zda bude výše popsaná smyčka v budoucnu realizována, závisí na několika faktorech, především se jedná o aspekt finanční a také politický. Ačkoli konstrukční řešení bylo navrženo tak, aby bylo pokud možno co nejlevnější, cena celého projektu s experimentálním zařízením pro solná média se bude pohybovat v řádu milionů. Náklady na pořízení solné náplně do smyčky a následný provoz, splňující přísné bezpečnostní podmínky, jsou velmi vysoké.

S tímto souvisí i politická situace. Takto významný výzkum se nemůže uskutečnit bez finanční podpory státu nebo investorů. Jestliže ale bude vedení státu pro jadernou energii, můžeme očekávat, že by se podařilo sehnat potřebnou finanční podporu. Poté by mohla být tato práce použita jako podpůrný materiál při reálné výstavbě experimentálního zařízení.

## 8. Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WAGNER, V. Reaktory IV. generace  
<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>
- [2] HAYNES INTERNATIONAL. *Hastelloy N alloy*.  
<http://www.haynesintl.com/pdf/h2052.pdf>
- [3] BIBUS s.r.o. *Katalog produktů*  
[http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy\\_622\\_625.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy_622_625.pdf)
- [4] ŠKORPÍK, J. *Lopatkový stroj, Transformační technologie*, ISSN 1804-8293.  
<http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.htm>, 2009-08, Brno
- [5] DOBROVOLNÝ, B. a kol, *Přehled strojnictví*, 2. vydání, Praha 1954
- [6] ORLÍKOVÁ, S. *Měření průtoku tekutin – principy průtokoměrů*  
[http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#\\_Clona](http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_Clona), VUT Brno
- [7] LINHART, J. *Mechanika tekutin I*, 1. vydání, Plzeň 2006, ZČU v Plzni, ISBN 80-7043-511-9
- [8] BERAN, V.; TŮMOVÁ, O.: *Měření veličin životního prostředí*. Plzeň, 2007. ISBN 80-7082-2481
- [9] ELIS PLZEŇ a.s. *Indukční průtokoměr kapalin*  
<http://www.elis.cz/cs/indukcni-prutokomery.html>
- [10] KROHNE, *Měřicí princip ultrazvukových průtokoměrů*  
<http://cz.krohne.com/cz/vyrobky/mereni-prutoku/ultrazvukove-prutokomery/merici-princip/>
- [11] ROJÍČEK, J. *Pružnost a pevnost v energetice, Tenkostěnné a silnostěnné nádoby*  
[http://www.339.vsb.cz/PDF/PPE/4Tenkost%C4%9Bnn%C3%A9\\_a\\_silnost%C4%9Bnn%C3%A9\\_n%C3%A1doby.pdf](http://www.339.vsb.cz/PDF/PPE/4Tenkost%C4%9Bnn%C3%A9_a_silnost%C4%9Bnn%C3%A9_n%C3%A1doby.pdf)
- [12] BIBUS s.r.o. *Mechanické vlastnosti materiálu Inconel 622*  
[http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy\\_622\\_625.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy_622_625.pdf)

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 : Výkres řezu základní smyčky

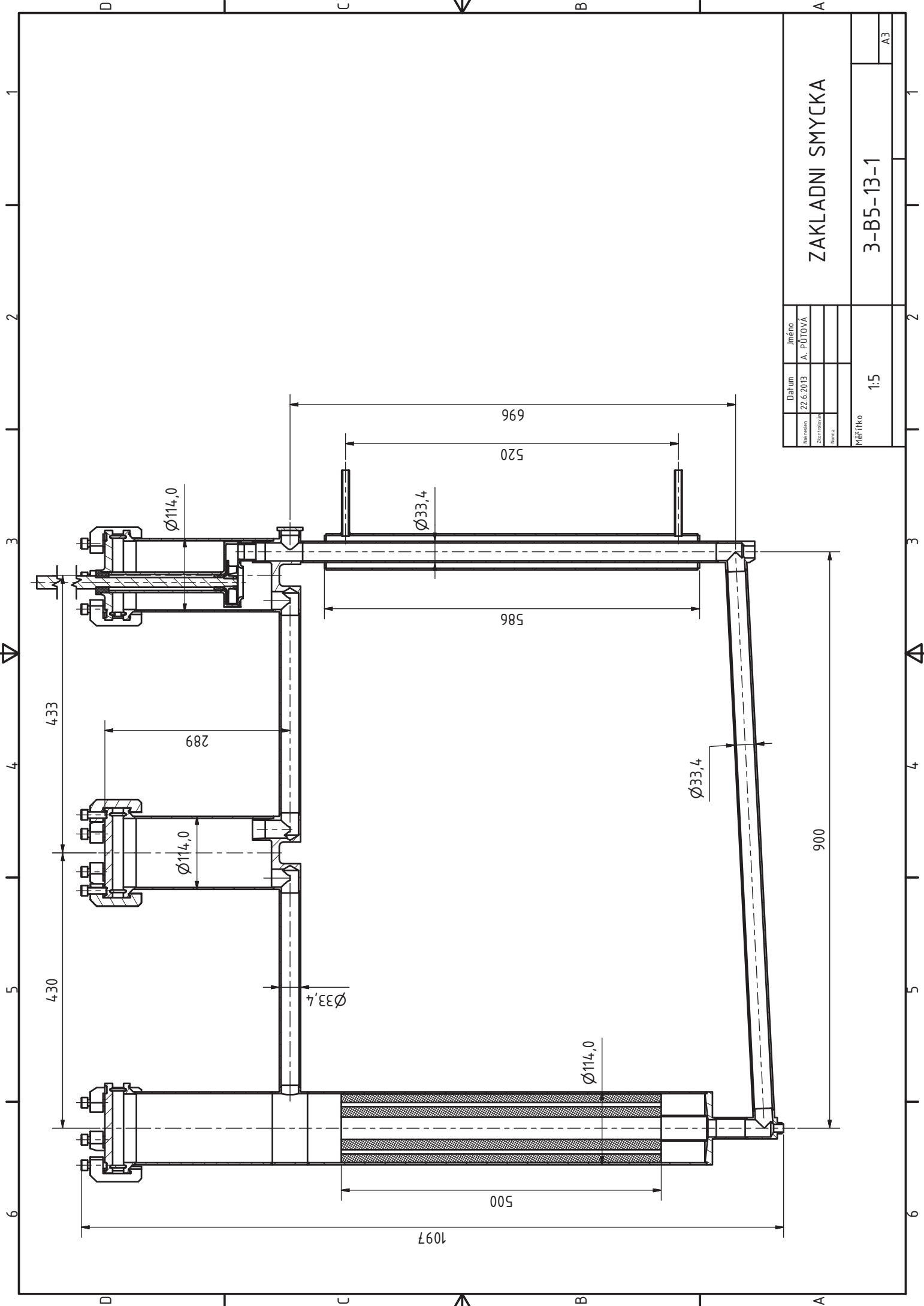
Příloha č. 2 : Výkres hermetického boxu

Příloha č. 3 : Výkres řezu měřicí nádoby

Příloha č. 4 : Výkres řezu měřicí nádoby s čerpadlem

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Výkres řezu základní smyčky**



Datum		Jméno	
22.6.2013		A. PUTOVA	
Měřítko		1:5	
Zkontrolován			
Napsal			
Měřítko		3-B5-13-1	
		A3	

ZAKLADNI SMYCKA

3-B5-13-1

1:5

Měřítko

A3

1097

500

Ø114,0

Ø33,4

Ø114,0

289

433

430

586

Ø33,4

Ø114,0

520

966

900

Ø33,4

1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6

D

C

B

A

D

C

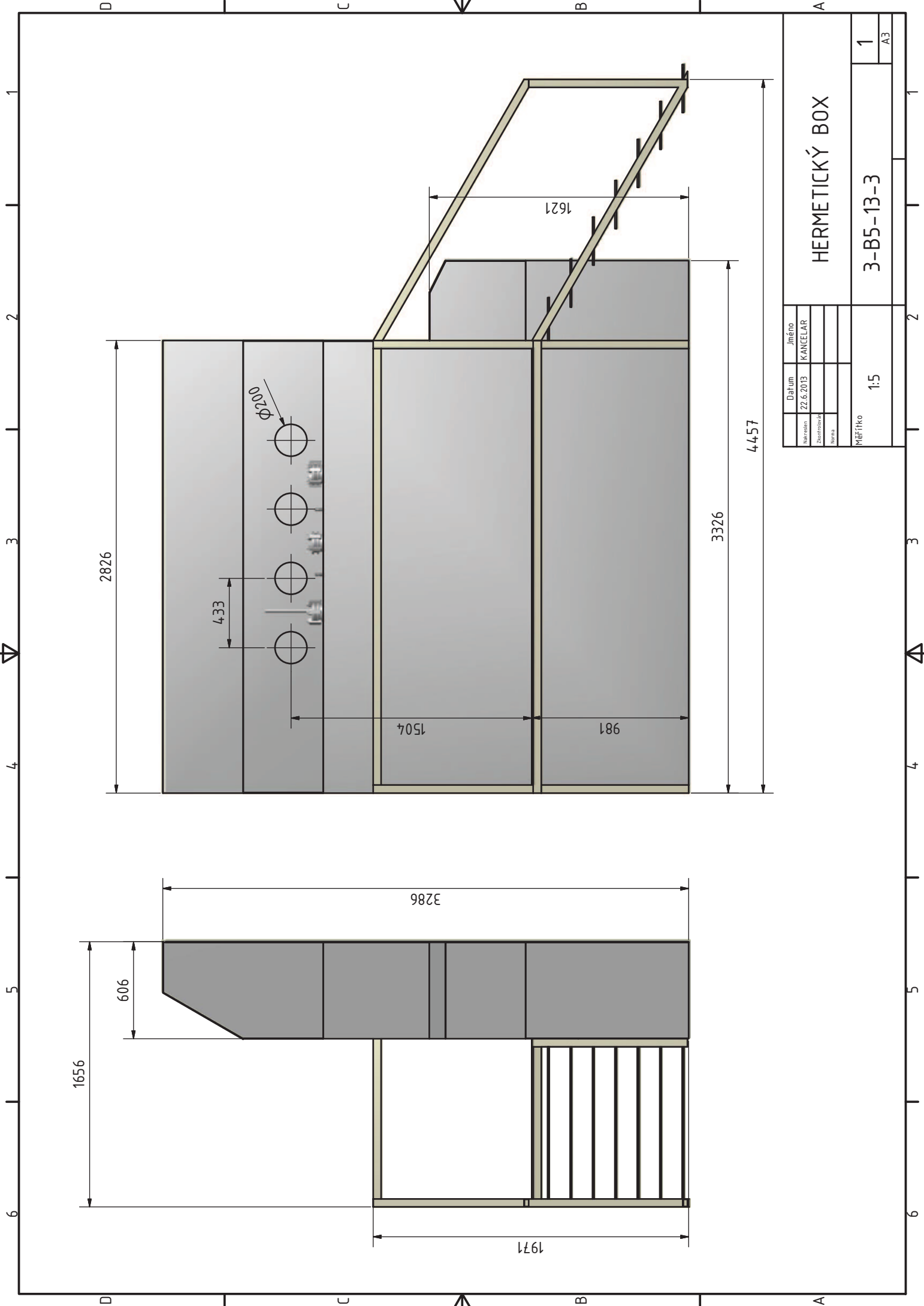
B

A



## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Výkres hermetického boxu**



Datum		Jméno	
22.6.2013		KANCLAR	
Měřítko		1:5	
Zhotovitel		3-B5-13-3	
Kontrola		1	
Návrh		A3	

# HERMETICKÝ BOX

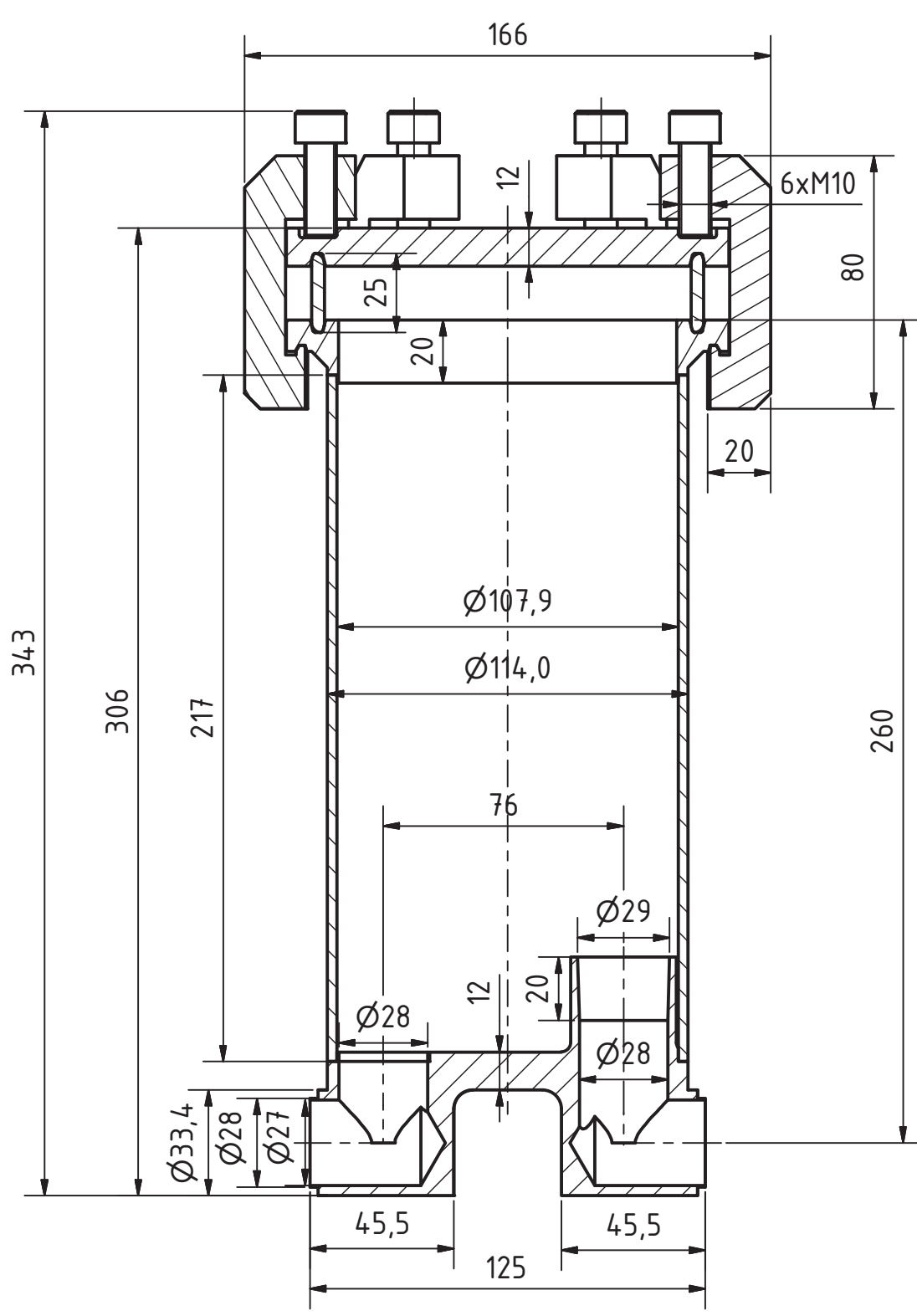
3-B5-13-3

1

A3

### **PŘÍLOHA č. 3**

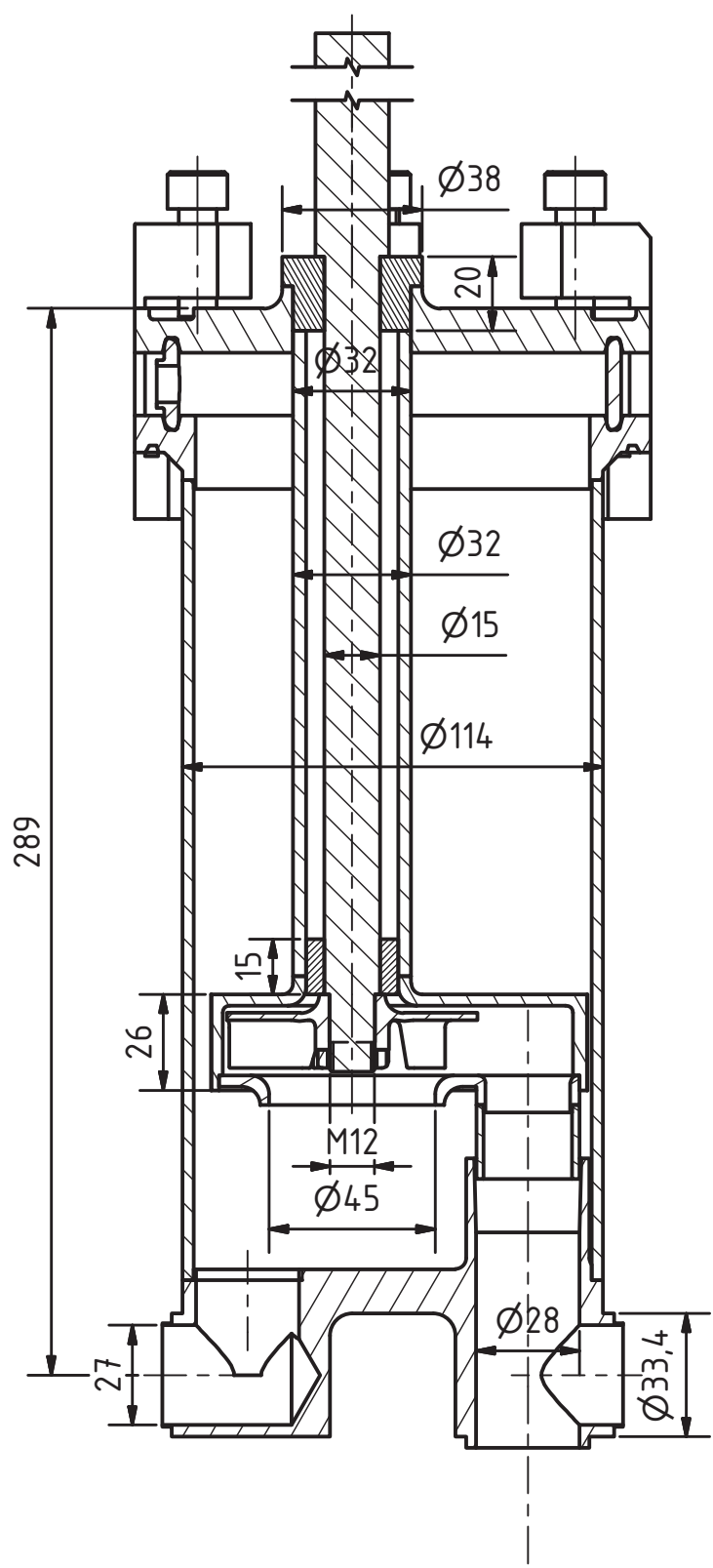
## **Výkres řezu měřicí nádoby**



	Datum	Jméno	MERICI NADOBA	
Nakreslen	22.6.2013	A. PŮTOVÁ		
Zkontrolován				
Norma				
Měřítko	1:2		4-B5-13-2	A4

## **PŘÍLOHA č. 4**

### **Výkres řezu měřicí nádoby s čerpadlem**



	Datum	Jméno
Nakreslen	21.6.2013	A. PŮTOVÁ
Zkontrolován		
Norma		
Měřítko	1:2	

ČERPADLO V MĚŘÍCÍ NÁDOBĚ

4-B5-13-5

A4