

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Fakulta strojní

Diplomová práce

Utěšňování hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály

Sealing of shafts of pressure vessels processing abrasive materials

Autor: Bc. Šimon Stibůrek

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Datum: 17.8.2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stibůrek** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **419950**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Utěšňování hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály

Název diplomové práce anglicky:

Sealing of shafts of pressure vessels processing abrasive materials

Pokyny pro vypracování:

- 1) Charakterizujte provozy zpracovávající abrazivní materiály.
- 2) Zpracujte rešerši zaměřenou na konstrukční uspořádání těsnících systémů pro utěšňování hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály.
- 3) Zprovozněte laboratorní jednotku a proveďte základní ověřovací experimenty její funkčnosti.
- 4) Proveďte základní experimenty vlivu provozních podmínek na životnost stlačované ucpávky.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**


Platnost zadání diplomové práce: _____



doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

2.6-04-2018
Datum převzetí zadání

Stibůrek
Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze, dne

.....

Šimon Stibůrek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D., za jeho odborné rady a vedení při vypracovávání diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za pomoc při zpracovávání CFD analýzy.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Šimon Stibůrek
Název práce česky:	Utěšňování hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály
Název práce anglicky:	Sealing of shafts of pressure vessels processing abrasive materials
Akademický rok:	2017/2018
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní technika
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí práce:	doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
Rozsah práce:	Počet stran: 73 Počet obrázků: 48 Počet tabulek: 5 Počet grafů: 4 Počet rovnic: 23
Klíčová slova:	Stlačovaná ucpávka, těsnicí provazce, abraze, tlaková nádoba, CFD
Keywords:	Stuffing box, packings, abrasion, pressure vessel, CFD
Anotace:	Diplomová práce se zabývá utěšňováním hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály. První část obsahuje rešerši patentů konstrukce stlačovaných ucpávek a provazců od různých výrobců. Druhá praktická část obsahuje měření životnosti ucpávky, CFD analýzu a definování závěrů.
Abstract:	The thesis deals with sealing of shafts of pressure vessels processing abrasive materials. Its first part contains research of patents describing construction of stuffing boxes and packings from several producers. Second practical part contains measurement of lifetime of the stuffing box, CFD analysis and the final statement.

Obsah

Zadání diplomové práce	2
Čestné prohlášení	3
Poděkování	4
Anotační list	5
Obsah	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam grafů	9
Seznam rovnic	10
Seznam symbolů	11
Úvod	13
1. Stlačované ucpávky	14
1.1 Konstrukční uspořádání těsnících systémů	14
1.2 Silové poměry ve stlačované ucpávce, modely radiálního přitlaku	18
1.2.1 Rozložení axiálního napětí	18
1.2.2 Rozložení radiálního napětí	20
1.2.3 Třecí síly	21
1.2.4 Netěsnost ucpávek	24
1.3 Těsnicí materiály	25
1.3.1 Rostlinné vláknité materiály	25
1.3.2 Syntetické vláknité materiály	25
1.3.3 Syntetické nevláknité materiály	26
1.4 Metodika testování provazců	27
1.5 Životnost stlačované ucpávky	29
2 Stlačované ucpávky pro abrazivní vsádky	30
2.1 Konstrukce stlačovaných ucpávek pro abrazivní materiály	30
2.2 Přehled ucpávkových šňůr používaných pro abrazivní materiály	36
3 Praktická část	39
3.1 Popis laboratorní jednotky	39
3.2 CFD analýza	42
3.2.1 Geometrie míchané nádoby	42
3.2.1.1 Tvorba geometrie	42

3.2.1.2	Úprava geometrie.....	43
3.2.2	Tvorba sítě.....	44
3.2.2.1	Nastavení parametrů sítě.....	44
3.2.2.2	Kvalita sítě.....	45
3.2.3	Procesní parametry.....	46
3.2.3.1	Fyzikální vlastnosti vody.....	46
3.2.3.2	Výpočet Reynoldsova čísla	46
3.2.4	Simulace proudění.....	47
3.2.4.1	Nastavení výpočtu.....	47
3.2.4.1.1	General.....	47
3.2.4.1.2	Models	47
3.2.4.1.3	Materials	47
3.2.4.1.4	Cell Zone Conditions	47
3.2.4.1.5	Boundary Conditions	48
3.2.4.1.6	Solution Methods	48
3.2.4.1.7	Run Calculation.....	48
3.2.5	Výsledek simulace	49
3.2.6	Závěr	54
3.3	Testování provozuschopnosti jednotky	55
3.3.1	Sestavení a zprovoznění aparatury	55
3.4	Provozní měření životnosti stlačované ucpávky.....	59
3.5	Definování závěrů a doporučení pro další postupování	70
Závěr.....		71
Seznam použitých zdrojů		72

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma jednoduché ucpávky [2]	15
Obrázek 2: Ucpávka s pružinami pod dotahovacími maticemi [3]	15
Obrázek 3: Ucpávka s pružinou v těsnicím prostoru [4].....	16
Obrázek 4: Příklady konfigurace stlačovaných ucpávek [2]	17
Obrázek 5: Silové působení na ucpávku [5].....	18
Obrázek 6: Rozložení axiálního napětí [5]	20
Obrázek 7: Rozložení radiálního napětí [5].....	21
Obrázek 8: Závislost K_2 na počtu kroužků [5].....	22
Obrázek 9: Závislost K_T na počtu kroužků [5]	23
Obrázek 10: Příklady cest průniku skrze ucpávku [5]	24
Obrázek 11: Ucpávka z bavlněných vláken [6].....	25
Obrázek 12: Ucpávka z čisté ramie [6].....	25
Obrázek 13: Ucpávka z čistého PTFE [6]	26
Obrázek 14: Ucpávka z aramidové příze [6].....	26
Obrázek 15: Ucpávka z expandovaného grafitu [6].....	26
Obrázek 16: Průběh tlakové zkoušky [5].....	27
Obrázek 17: Testování třecího součinitele [5].....	28
Obrázek 18: Patent US6834862B2 [4]	31
Obrázek 19: Patent US4878677A [8]	32
Obrázek 20: Patent US6382633B1 [3]	33
Obrázek 21: Patent US4765631A [9].....	34
Obrázek 22: Patent US2486939A [10].....	35
Obrázek 23: Laboratorní jednotka	39
Obrázek 24: Detailní popis systému regulace	41
Obrázek 25: Geometrie vytvořená v Solidworks	42
Obrázek 26: Model po úpravě v "DesignModeler"	43
Obrázek 27: Vytvořená síť	44
Obrázek 28: Kontrola kvality sítě	45
Obrázek 29: Výpis výsledků	49
Obrázek 30: Příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel [17]	50
Obrázek 31: Vektor rychlosti na stěně míchadla.....	51
Obrázek 32: Napětí na stěně míchadla.....	51

Obrázek 33: Napětí na stěně nádoby.....	52
Obrázek 34: Rychlost proudění v průřezu nádoby.....	52
Obrázek 35: Proudové pole v průřezu nádoby	53
Obrázek 36: Detail proudového pole v okolí ucpávky v rovině YZ	53
Obrázek 37: Detail proudového pole v okolí ucpávky v rovině ZX	54
Obrázek 38: Sestavené zařízení.....	55
Obrázek 39: Rozebraná stlačovaná ucpávka	59
Obrázek 40: Rozložení velikosti částic	61
Obrázek 41: Tvorba šplhajícího filmu na hřídeli míchadla	65
Obrázek 42: Emulze vytékající z ucpávky	66
Obrázek 43: Stopy korundu pod prvním kroužkem těsnění	67
Obrázek 44: Stopy korundu v těsnicím prostoru ucpávky.....	67
Obrázek 45: Stopy korundu na hřídeli míchadla.....	68
Obrázek 46: Otlacení prvního kroužku a zapečený korund.....	68
Obrázek 47: Viditelné vydření těsnicího provazce	69
Obrázek 48: Menší vydření na třetím provazci	69

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled ucpávkových šňůr [11], [12], [13]	36
Tabulka 2: Přehled ucpávkových šňůr [14].....	37
Tabulka 3: Přehled ucpávkových šňůr [6].....	38
Tabulka 4: Data z primárního měření náběhu na provozní podmínky.....	57
Tabulka 5: Data z měření životnosti stlačované ucpávky.....	62

Seznam grafů

Graf 1: Náběh na pracovní teplotu během primárního měření	58
Graf 2: Průběh měření tlaku během primárního měření	58
Graf 3: Průběh měření teplot	63
Graf 4: Průběh měření tlaku	63

Seznam rovnic

- (1) Rovnice axiálního napětí
- (2) Napětí na víku
- (3) Střední hodnota tření
- (4) Čtvercový průřez ucpávkového kroužku
- (5) Počet ucpávkových kroužků
- (6) Transformační součinitel
- (7) Axiální napětí na n-tém kroužku
- (8) Radiální napětí na n-tém kroužku
- (9) Podmínka velikosti radiálního napětí
- (10) Napětí na víku v prvním kroku
- (11) Součinitel K_2
- (12) Rovnice třecí síly
- (13) Koeficient třecích sil
- (14) Napětí na víku ve druhém kroku
- (15) Třecí síla při napětí σ_{V2}
- (16) Rovnice integrální netěsnosti
- (17) Výpočet Reynoldsova čísla
- (18) Výpočet příkonu
- (19) Výpočet příkonového čísla
- (20) Rovnice axiálního tlaku dotažení víka
- (21) Výpočet délky dotažení víka
- (22) Výpočet axiálního tlaku dotažení víka
- (23) Výpočet axiálního tlaku dotažení víka

Seznam symbolů

σ_x	[MPa]	napětí v ose x
σ_{ax}	[MPa]	axiální napětí
e	[-]	Eulerovo číslo
μ_d	[-]	součinitel tření na hřídeli
μ_D	[-]	součinitel tření v těsnicím prostoru
K_R	[-]	transformační součinitel
H_{UK}	[mm]	celková výška těsnění
S_K	[mm]	šířka kroužku
σ_V	[MPa]	napětí na víku
σ_{ax}^0	[MPa]	počáteční axiální napětí
μ	[-]	součinitel tření
h_k	[mm]	výška kroužku
s	[mm]	šířka těsnicího prostoru
n	[-]	počet kroužků
σ_{rad}	[MPa]	radiální napětí
σ_{ax}^n	[MPa]	axiální napětí na n-tém kroužku
σ_{rad}^n	[MPa]	radiální napětí na n-tém kroužku
Δp	[MPa]	tlak pracovní látky
σ_{V1}	[MPa]	napětí na víku v prvním kroku
K_2	[-]	součinitel K_2
F_T	[N]	třecí síla
d	[mm]	průměr hřídele
π	[-]	Ludolfovo číslo

K_T	[-]	koeficient třecích sil
σ_{V2}	[MPa]	napětí na víku ve druhém kroku
F_{T2}	[N]	třecí síla při napětí σ_{V2}
Q_N	[mm/s]	integrální netěsnost
K_N	[-]	koeficient netěsnosti
A	[mm ²]	plocha ucpávkového kroužku
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
n_m	[s ⁻¹]	frekvence otáčení míchadla
D	[m]	průměr míchadla
ρ	[kg/m ³]	hustota kapaliny
Mk	[N.m]	kroučící moment
ω	[s ⁻¹]	úhlová rychlost míchadla
P	[W]	příkon na hřídeli míchadla
Po	[-]	příkonové číslo
p	[MPa]	tlak
F	[N]	síla
S	[mm ²]	plocha
n_p	[-]	počet pružin
K	[N/mm]	tuhost pružiny
L	[mm]	délka stlačení
k	[-]	bezpečnostní koeficient
t_N	[°C]	teplota nádoby
t_V	[°C]	teplota vsádky
$t_V(pt1000)$	[°C]	teplota vsádky měřená termočlánkem pt 1000

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na utěšňování hřídelů míchadel tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály pomocí stlačovaných ucpávek. Práce je složena z několika částí.

V první jsou popsána různá konstrukční uspořádání a řešení stlačovaných ucpávek, silové poměry uvnitř ucpávek, přehled používaných materiálů pro výrobu těsnicích kroužků a metodika testování provazců. Druhá část mé práce se věnuje stlačovaným ucpávkám pro abrazivní vsádky. Popisuje jejich možné konstrukční uspořádání na základě patentové rešerše. Dále obsahuje seznam ucpávkových provazců od různých výrobců, které jsou vhodné pro použití k utěšňování abrazivních vsádek.

Třetí část je část praktická, obsahuje popis testovacího zařízení včetně instalovaného systému regulace, CFD analýzu, sestavení a zprovoznění aparatury a testování životnosti stlačované ucpávky. Zároveň také popisuje problémy spojené s měřením a představuje výsledky měření. Cílem CFD analýzy bylo simulovat proudění, ke kterému dochází v testovacím zařízení a vyobrazení proudového pole uvnitř nádoby, ze kterého by se dal vyvodit vliv proudění na životnost ucpávky. K testování životnosti ucpávkových provazců bylo navrženo zařízení firmou MONTS s.r.o., které jsem měl pro praktickou zkoušku k dispozici. Po sestavení a zprovoznění aparatury následovala zkouška náběhu na provozní podmínky a posledním experimentem bylo samotné testování životnosti stlačované ucpávky s vybraným typem ucpávkového provazce.

Cílem diplomové práce bylo zhodnocení vlivu provozních podmínek na životnost stlačované ucpávky. Závěr praktické části práce shrnuje získané výsledky z měření, jsou zde popsány poznámky k funkčnosti zařízení a návrhy pro její zlepšení.

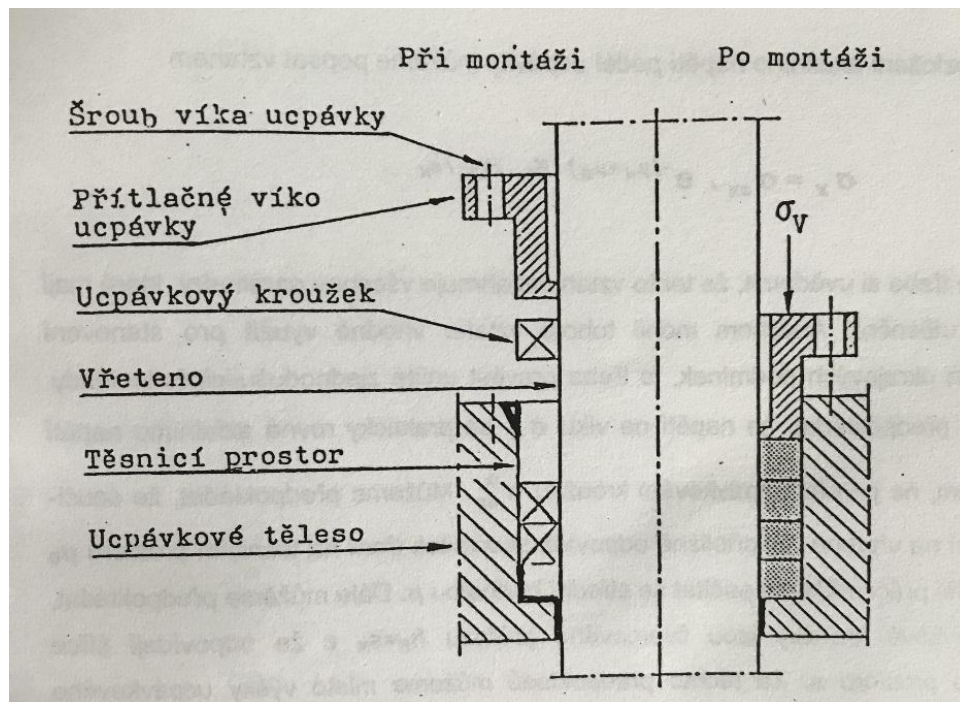
1. Stlačované ucpávky

Stlačované ucpávky slouží k utěšňování strojů využívaných především v chemickém průmyslu. Používají se k utěšnění pohyblivých částí aparátu, které prochází jejich stěnou, například u hřídelů míchadel, čerpadel nebo vřeten armatur. Jejich hlavní prací je oddělení vnitřního a vnějšího prostoru zařízení a zabránění úniku zpracovávaných látek nebo vniknutí látek nechtěných. [1]

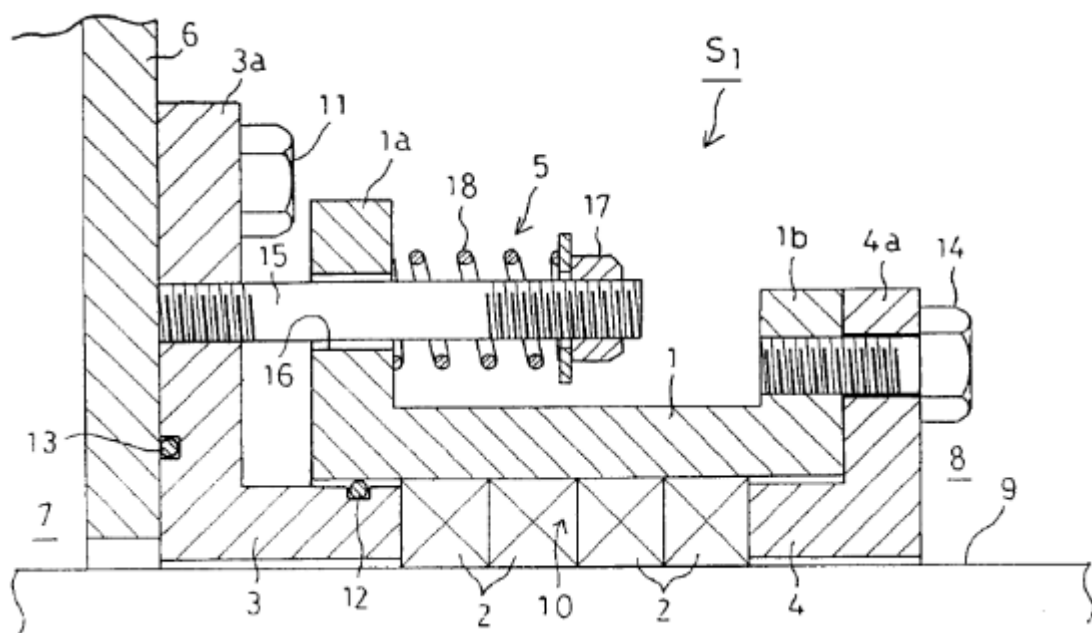
K utěšňování dochází stykem těsnění a těsnících ploch, nasunutím těsnicí šňůry do těsnícího prostoru a stlačením pomocí víka ucpávky. Stlačované ucpávky jsou na rozdíl od jiných utěšňovacích systémů jednoduché a relativně levné. Dají se využívat v širokém rozmezí teplot, cca 200 - 600 °C a také tlaků, a to až do 100 MPa. Jejich použití téměř není omezeno druhem zpracovávaných látek. [2]

1.1 Konstruktivní uspořádání těsnících systémů

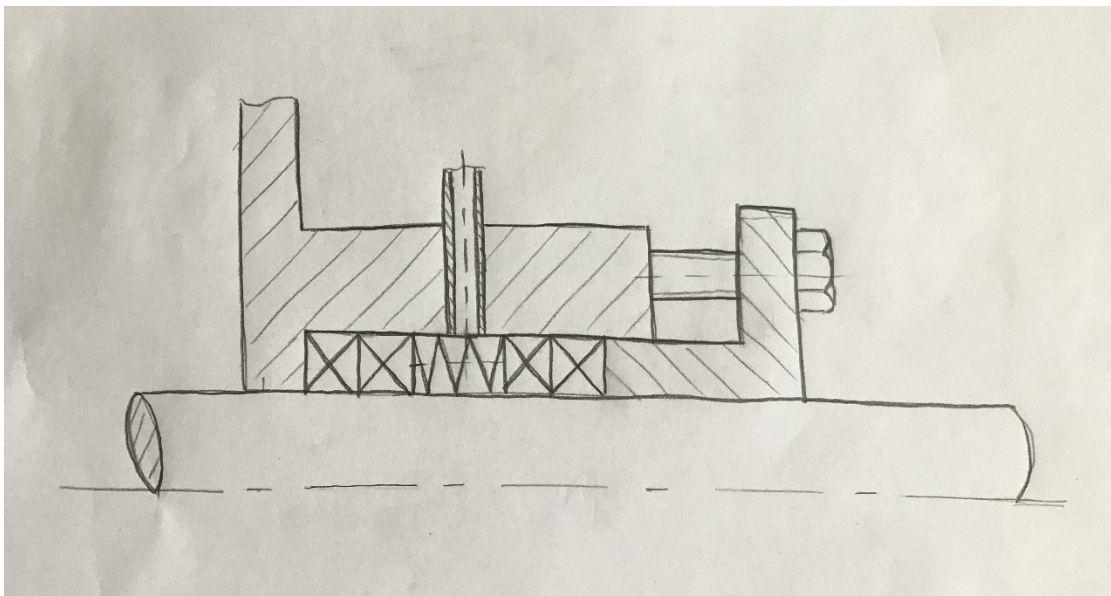
Většina stlačovaných ucpávek funguje na principu jednoduchých stlačovaných ucpávek, jejíž schéma je zobrazeno na Obrázek 1. Technicky podstatné varianty stlačovaných ucpávek, které se používají, jsou ucpávky s pružinami pod maticemi (viz Obrázek 2), kterými se dotahuje přítlačné víko ucpávky a ucpávka s pružinou, která se nachází v těsnícím prostoru (viz Obrázek 3). V případě ucpávky s pružinou, nacházející se v těsnícím prostoru, tato pružina zároveň s distančními kroužky vytváří prostor pro odsávání těsněné tekutiny, nebo plnění tekutiny pomáhající těsnění. [2]



Obrázek 1: Schéma jednoduché ucpávky [2]



Obrázek 2: Ucpávka s pružinami pod dotahovacími maticemi [3]



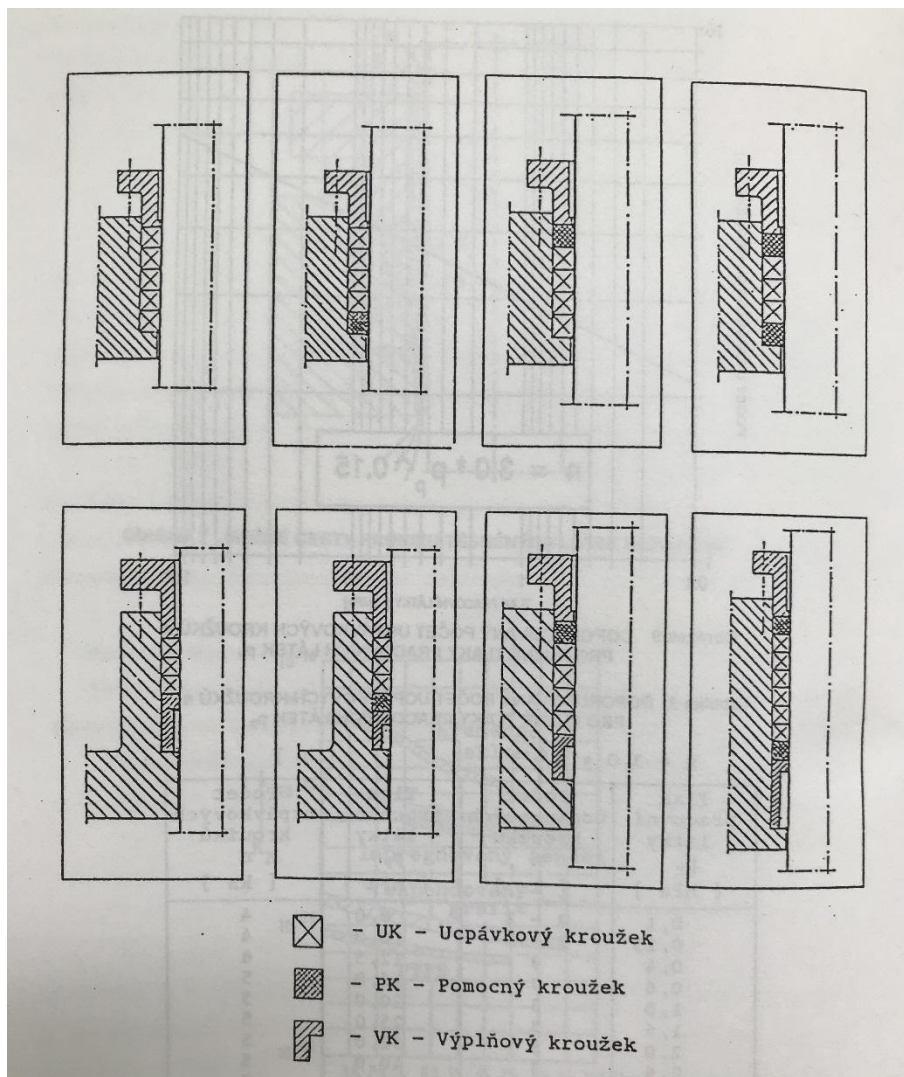
Obrázek 3: Ucpávka s pružinou v těsnicím prostoru [4]

Z různých rozborů a zkušeností bylo stanoveno, že pro dostatečné utěsnění je vhodná výška ucpávky 5, popřípadě 7 kroužků těsnicí šňůry. Tato výška samozřejmě závisí na tlaku zpracovávané látky. Při této konfiguraci dochází k nejlepšímu rozložení axiálního a radiálního napětí, nízkému tření, ale zároveň vysoké těsnosti.

Z výše uvedených důvodů, je kromě různých konstrukčních řešení těla ucpávek, také rozdílně řešeno vyplnění těsnicího prostoru. Ten může být vyplňován různými komponenty, jak můžeme vidět na Obrázek 4, které mají vliv na správnou funkci ucpávky. [2]

Tyto komponenty jsou:

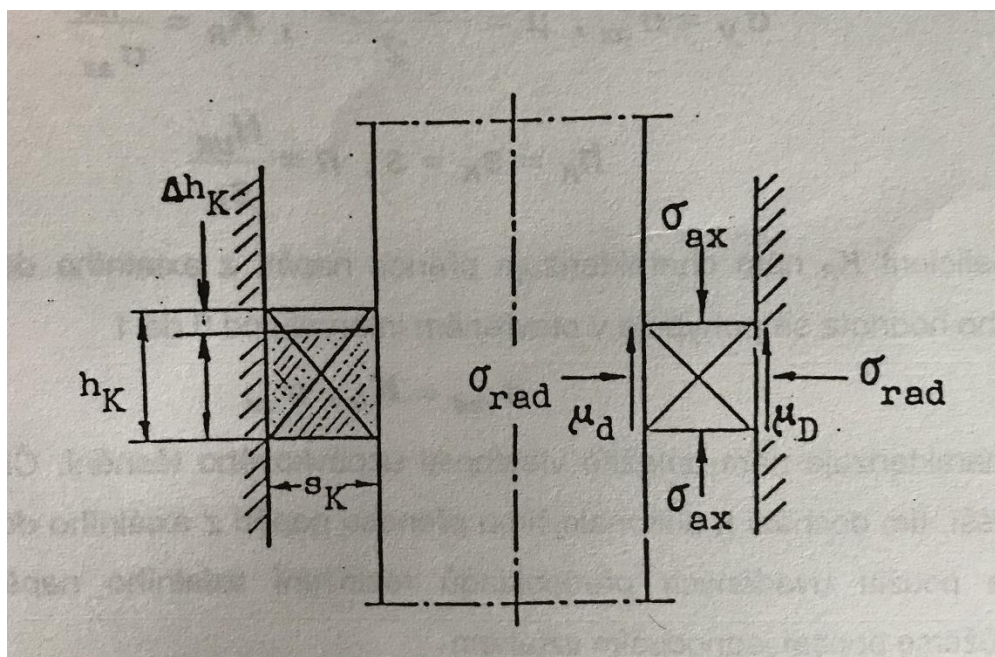
- 1) ucpávkové kroužky – hlavní těsnicí funkce
- 2) pomocné kroužky – pomáhají správné funkci ucpávkových kroužků
- 3) výplňové kroužky – snížení celkové výšky těsnicího prostoru



Obrázek 4: Příklady konfigurace stlačovaných ucpávek [2]

1.2 Silové poměry ve stlačované ucpávce, modely radiálního přitlaku

Stlačením těsnění pomocí víka ucpávky dochází k napět'ovým, deformačním a třecím vztahům. Přitlačením v axiálním směru se těsnění deformuje, dochází k působení radiálního napětí v těsnění a ke zvýšení tření s těsnicí plochou. Právě toto vzniklé radiální napětí tlačí těsnění na těsnicí plochu a vytváří těsnicí efekt, zabraňuje průniku pracovní látky skrze ucpávku. [5]



Obrázek 5: Silové působení na ucpávku [5]

1.2.1 Rozložení axiálního napětí

Axiální napětí podél ucpávky se dá popsat následujícím vztahem.

$$\sigma_x = \sigma_{ax} \cdot e^{-(\mu_d + \mu_D) \cdot K_R \cdot H_{UK} / s_K} \quad (1)$$

Tento vztah můžeme zjednodušit za předpokladu následujících vztahů.

- 1) Napětí na víku je v podstatě rovné axiálnímu napětí pod víkem.

$$\sigma_V = \sigma_{ax}^0 \quad (2)$$

2) Součinitel tření na hřídeli se téměř rovná součiniteli tření v těsnicím prostoru, proto můžeme nadále počítat se střední hodnotou tření.

$$\mu = \frac{\mu_d + \mu_D}{2} \quad (3)$$

3) Dalším předpokladem je čtvercový průřez ucpávkového kroužku, ten se zároveň rovná šířce těsnicího prostoru.

$$h_k = s_k = s \quad (4)$$

4) Z toho vyplývá, že počet ucpávkových kroužků je roven podílu celkové výšky těsnění a výšky jednoho prstence.

$$n = \frac{H_{UK}}{s_K} \quad (5)$$

5) Transformační součinitel nabývá hodnot od 0 do 1, Čím vyšší hodnota, tím lepší přenos napětí.

$$K_R = \frac{\sigma_{rad}}{\sigma_{ax}} \quad (6)$$

Následně můžeme napsat konečný tvar rovnice.

$$\sigma_{ax}^n = \sigma_{ax}^0 \cdot e^{-2\mu \cdot K_R \cdot n} \quad (7)$$

1.2.2 Rozložení radiálního napětí

Radiální napětí podél ucpávky se dá popsat následujícím vztahem.

$$\sigma_{rad}^n = K_R \cdot \sigma_{ax}^0 \cdot e^{-2\mu \cdot K_R \cdot n} \quad (8)$$

K dosažení potřebného utěsnění musí být radiální napětí na prvním kroužku ucpávky větší než tlak zpracovávané látky.

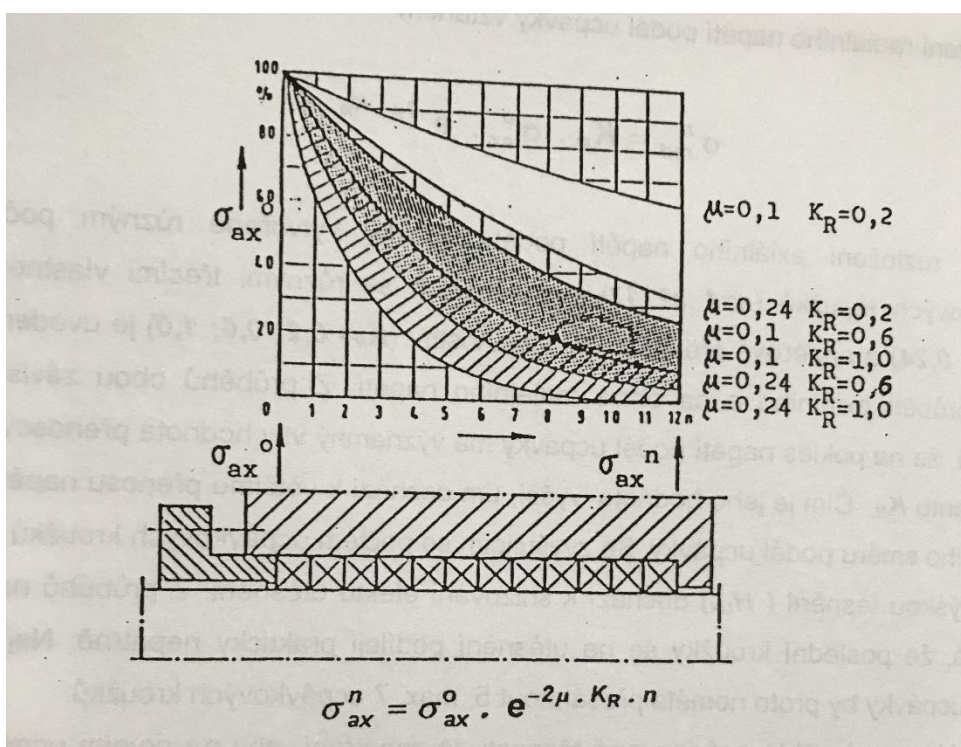
$$\sigma_{rad} \geq \Delta p \quad (9)$$

Na víku ucpávky je třeba dosáhnout následujícího napětí.

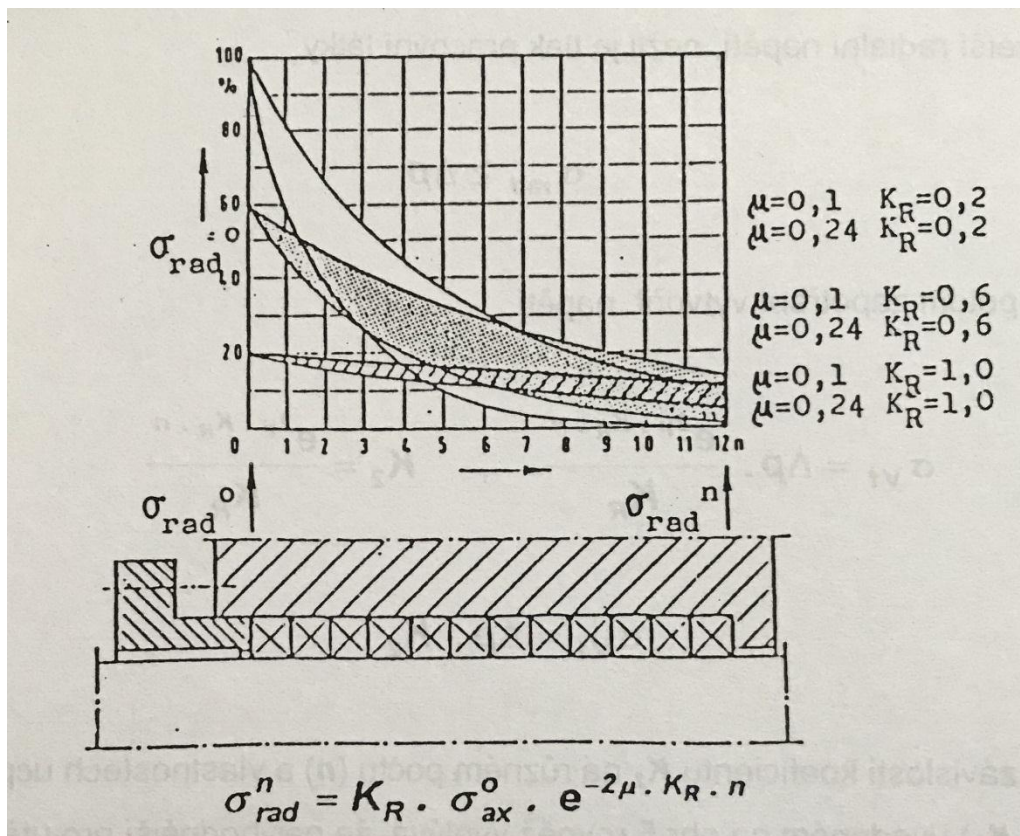
$$\sigma_{v1} = \Delta p \cdot K_2 \quad (10)$$

kde

$$K_2 = \frac{e^{2\mu \cdot K_R \cdot n}}{K_R} \quad (11)$$



Obrázek 6: Rozložení axiálního napětí [5]



Obrázek 7: Rozložení radiálního napětí [5]

Obrázek 6 nám zobrazuje rozložení axiálního napětí a Obrázek 7 rozložení radiálního napětí v závislosti na počtu ucpávkových kroužků o různých třecích vlastnostech. Veliký vliv na utěšňovací schopnost má koeficient K_R , jehož vyšší hodnoty mají za následek vyšší přenos napětí z axiálního do radiálního směru. S větším počtem těsnicích kroužků se ovšem utěšňovací schopnost snižuje. Klesá tedy jak axiální, tak i radiální napětí. [5]

1.2.3 Třecí síly

Působením radiálního napětí na těsnicí plochy ucpávky vzniká při roztočení hřídele síla F_T . Tu můžeme popsat následujícím vztahem.

$$F_T = \frac{d \cdot \pi \cdot s_K \cdot \Delta p}{2} \cdot K_T \quad (12)$$

kde

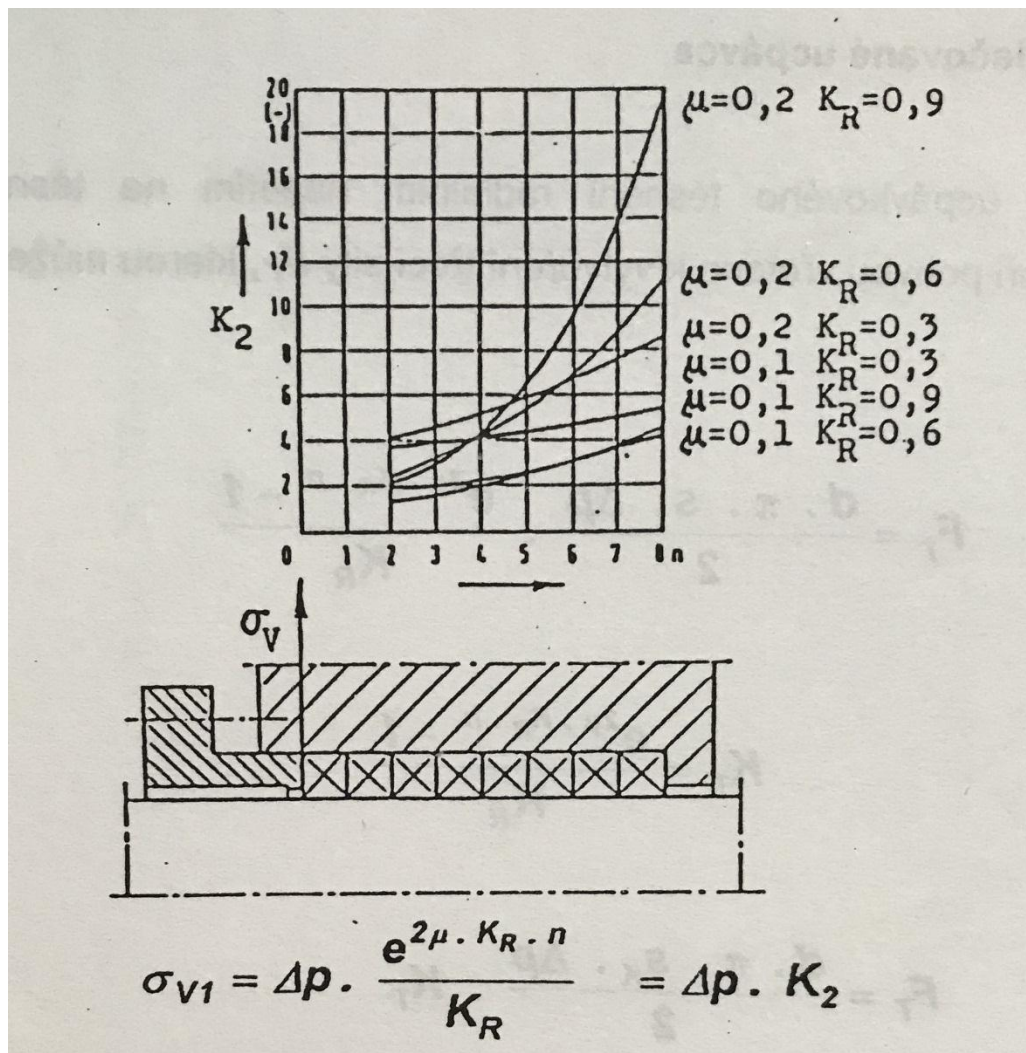
$$K_T = \frac{e^{2\mu \cdot K_R \cdot n} - 1}{K_R} \quad (13)$$

Na velikost tření má hlavní vliv výška ucpávky - počet kroužků a také tlak zpracovávané látky, jak můžeme vidět na Obrázek 9 - závislosti koeficientu třecích sil K_T na počtu kroužků.

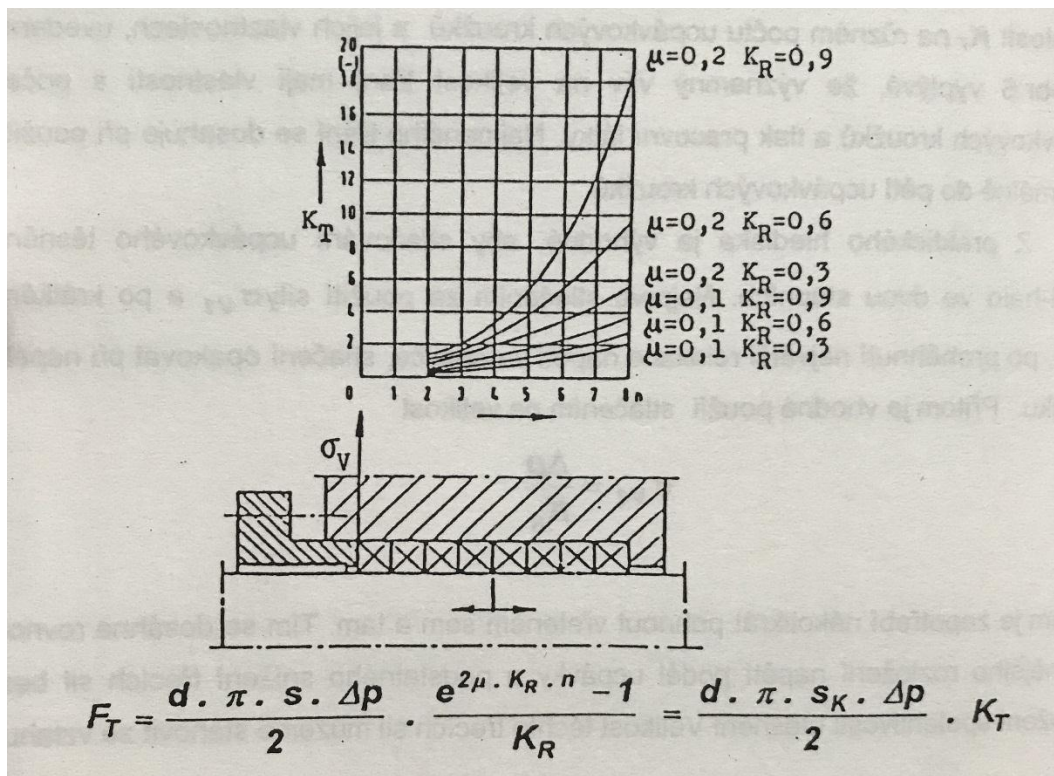
Stlačení těsnění ucpávky by nejlépe mělo proběhnout ve dvou krocích. Prvním krokem by bylo stlačení silou σ_{V1} a po nějakém čase opětovné stlačení, tentokrát ale velikostí síly σ_{V2} . Tímto způsobem se dá dosáhnout lepšího rozložení napětí po celé délce ucpávky a také snížení třecích sil se stejným těsnicím účinkem. Tyto síly můžeme popsat následujícími vztahy. [5]

$$\sigma_{V2} = \frac{\Delta p}{K_R} \quad (14)$$

$$F_{T2} = d \cdot \pi \cdot H_{UK} \cdot \sigma_{V2} \cdot \mu \cdot K_R \quad (15)$$



Obrázek 8: Závislost K_2 na počtu kroužků [5]



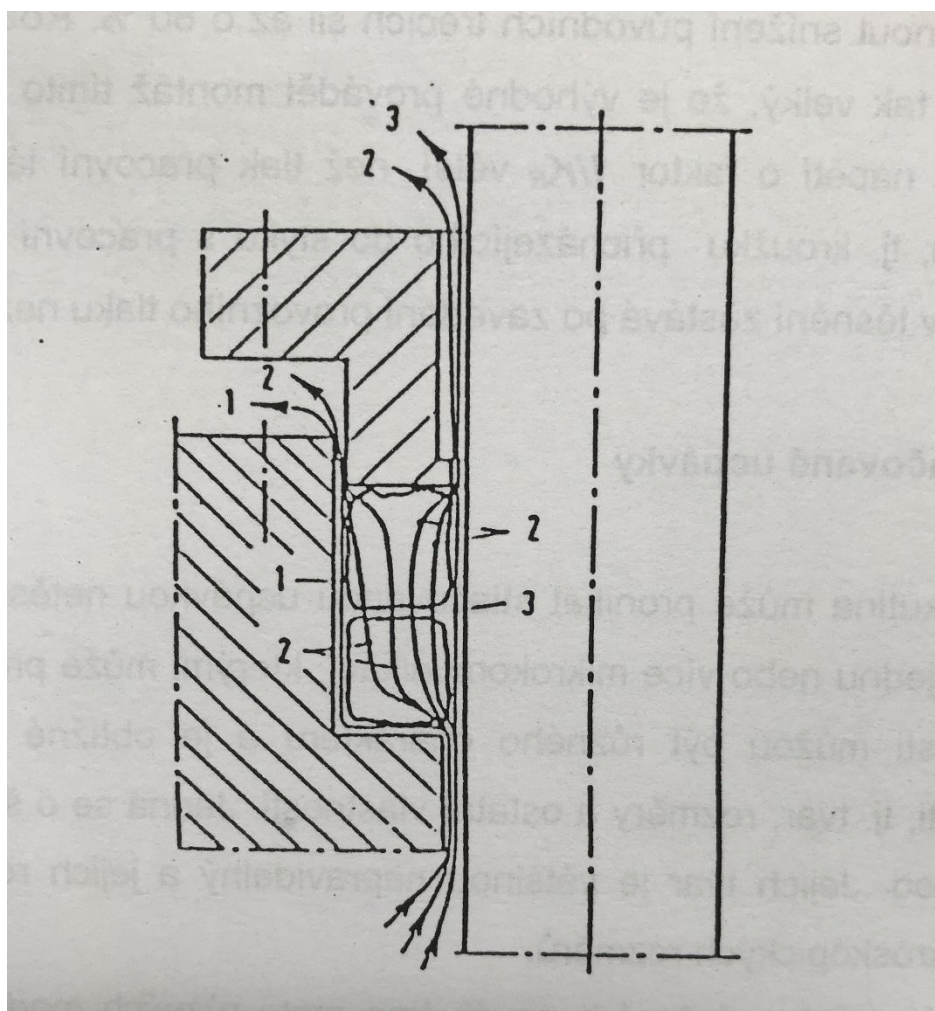
Obrázek 9: Závislost K_T na počtu kroužků [5]

1.2.4 Netěsnost ucpávek

Zpracovávaná látka může unikat skrze ucpávku díky netěsnostem. Jsou to ve většině případů drobné mezery, které se vytváří buďto přímo v těle provazce, mezi těsněním a hřídelí nebo mezi stěnou těsnicího prostoru a těsněním. Přesná příčina netěsnosti se však nedá určit. Takové netěsnosti se většinou nazývají „integrální netěsnosti“ a dají se popsat následujícím vztahem. [5]

$$Q_N = K_N \cdot \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot H_{UK}} \quad (16)$$

Na Obrázek 10 můžeme vidět příklad těchto netěsností a cestu, kterou může zpracovávaná látka unikat.



Obrázek 10: Příklady cest průniku skrze ucpávku [5]

1.3 Těsnicí materiály

Materiál těsnění je jedním z důležitých faktorů, který ovlivňuje těsnicí schopnost stlačované ucpávky. K jejich výrobě se využívají vláknité a nevláknité materiály, a to rostlinného či syntetického původu.

V oblasti těsnících materiálů došlo v minulosti k zásadní změně, kterou byl zákaz používání azbestu. Ten byl do té doby přednostně používán jako materiál k výrobě těsnění v ucpávkových systémech. Bylo tak učiněno kvůli směrnici Evropské Unie. Azbest a látky azbest obsahující, jsou totiž nebezpečné z hlediska jejich karcinogenosti. V dnešní době se tedy vyrábí a používají pouze těsnění bezazbestová. [2]

1.3.1 Rostlinné vláknité materiály

Nejčastěji se využívají vlákna bavlny, konopí a ramie. Z těchto vláken se vytváří příze. Ta se následně impregnuje a zaplétá do konečného tvaru ucpávkových šňůr.

Tyto provazce se dají využívat v rozsahu teplot od -20 do 100 °C. a pro tlaky do 7 MPa. Rozsah teplot a tlaku vyplývá z odolnosti základního materiálu a typu impregnace. [2]



Obrázek 11: Ucpávka z bavlněných vláken [6]



Obrázek 12: Ucpávka z čisté ramie [6]

1.3.2 Syntetické vláknité materiály

Nejčastěji se využívají vlákna polytetrafluoretylenu (PTFE), uhlíko - grafitová a aramidová. Zpracovávají se podobným způsobem jako vlákna rostlinná. Do konečného tvaru se pletou buď přímo z vláken nebo z přízí. Vlákna předtím prochází povrchovou úpravou a během zaplétání se impregnují.

Vlákna z PTFE mají standartní využití v rozsahu teplot -200 až 280 °C a tlaku do 25 MPa. Jsou obzvlášť odolná proti zpracovávaným látkám, dají se tedy využít téměř v jakémkoli provozu.

Aramidová vlákna mají vysokou pevnost a odolnost proti opotřebení. Odolají většině pracovních látek kromě silných kyselin a louhů. Jsou použitelné při teplotách od -60 do 250 °C a tlacích až 50 MPa.

Uhlíko - grafitová vlákna mají vysokou odolnost proti většině látek, až na látky vysoce oxidační. Dají se využívat mezi teplotami -60 až 450 °C, v neoxidačním prostředí až do 550 °C a tlaku 30 MPa. [2]



Obrázek 13: Ucpávka z čistého PTFE [6]



Obrázek 14: Ucpávka z aramidové příze [6]

1.3.3 Syntetické nevláknité materiály

Nejvýznamnějším z těchto materiálů je expandovaný grafit. Odolný proti většině látek při teplotách od 200 do 550 °C, v neoxidačním prostředí však až 2000 °C.

Z expandovaného grafitu se vytváří fólie, která se navíjí na cívku. Tato cívka se posléze stává polotovarem k výrobě ucpávkových kroužků. Trendem poslední doby je výroba vláken, která jsou expandovaným grafitem pouze potažena.

Dalším materiálem, který by v této kapitole stál za zmínku, je expandovaný PTFE. Ten je však využitelný při nižších tlacích do 5 MPa. Ucpávkové kroužky se z něj vyrábí obdobně jako u expandovaného grafitu. [2]



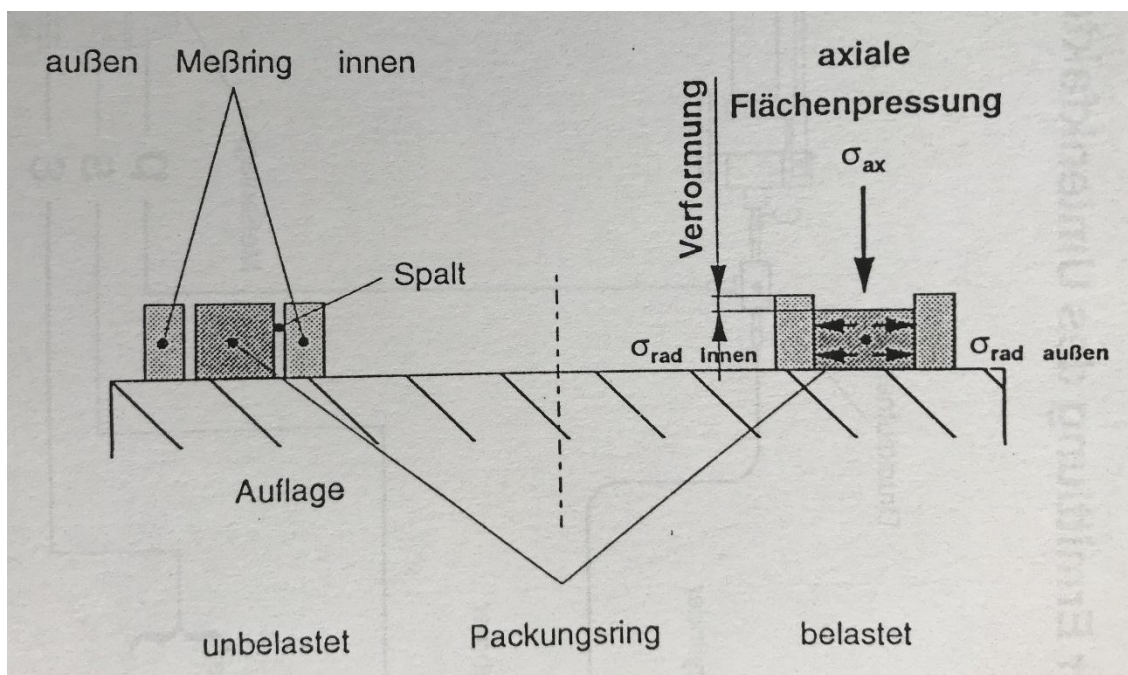
Obrázek 15: Ucpávka z expandovaného grafitu [6]

1.4 Metodika testování provazců

Pro správnou funkci ucpávky a zvolení vhodného materiálu provazců, je zapotřebí znát několik základních vlastností provazců. Jsou to vlastnosti deformační, těsnicí a transformační. Tyto vlastnosti lze zjistit pomocí testování provazců.

Deformační a transformační vlastnosti lze určit pomocí zkoušky tlakové. Tlaková zkouška probíhá působením axiálního tlaku na kroužek umístěný mezi dvěma tělesy. Axiální tlak musí být tak velký, aby se kroužek zdeformoval natolik, že vyplní mezery mezi ním a tělesy. Tento tlak může být vyvíjen například hydraulickým válcem. Vzniklé radiální napětí je potom měřeno pomocí tenzometru nalepeném na kroužku. Z poměru radiálního a axiálního napětí lze následně určit transformační součinitel K_T (viz str. 19). Schéma tlakové zkoušky lze vidět na Obrázek 16.

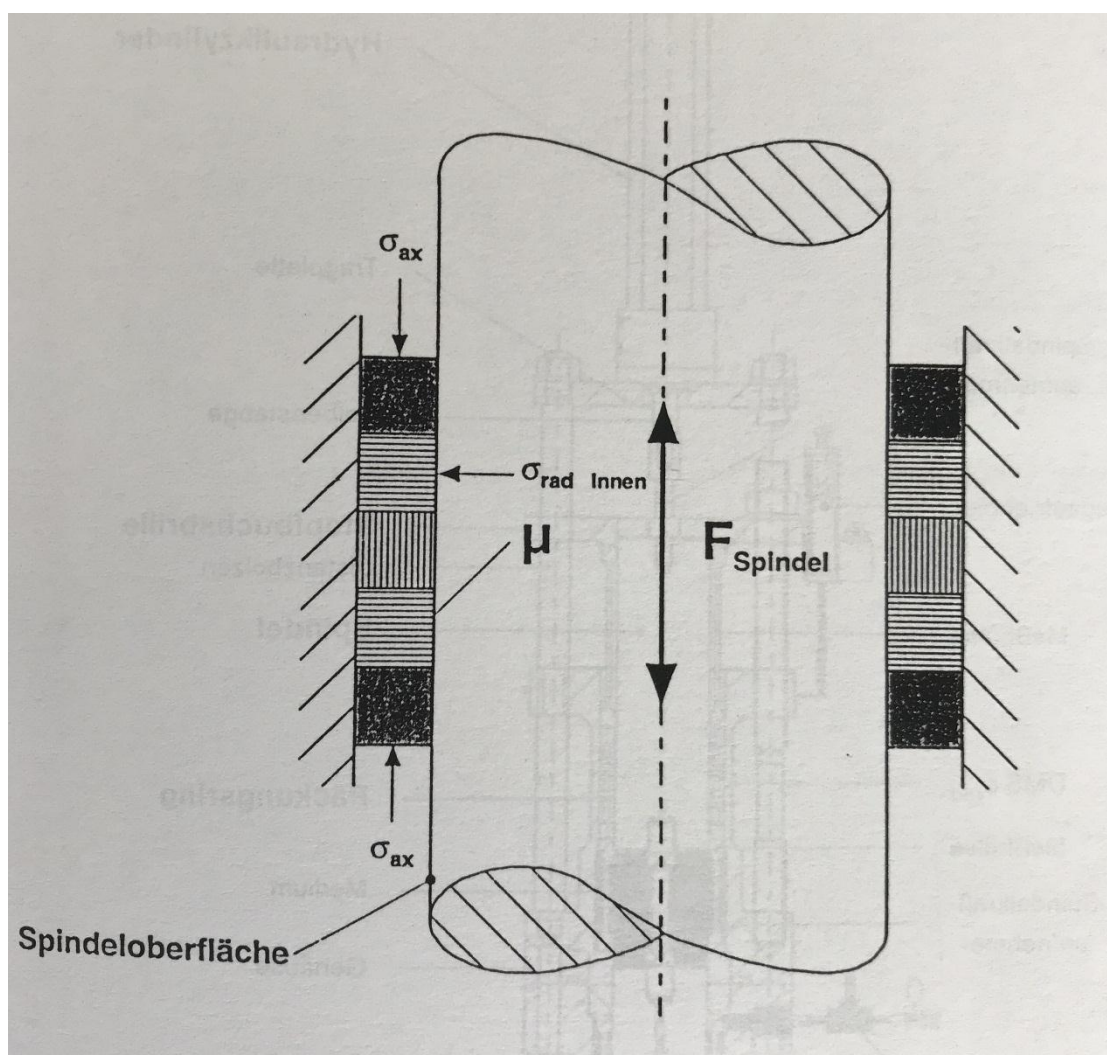
[5]



Obrázek 16: Průběh tlakové zkoušky [5]

Těsnicí vlastnosti lze určit pomocí zkoušky netěsnosti. Pro tuto zkoušku je jako těsněná látka použit dusík. Zkoumá se množství unikajícího plynu skrze provazce. Z testování bylo zjištěno, že při vyšší hodnotě radiálního napětí netěsnost klesá a při konstantním radiálním napětí se netěsnost nemění.

Dalším druhem testování provazců je zkouška třecí, pomocí které lze měřit třecí součinitel provazců. Zkouška probíhá na zařízení, které konstrukčně odpovídá jednoduché ucpávce, jak lze vidět na Obrázek 17. Hodnoty radiálního tlaku jsou kontrolovány pomocí tenzometrů nalepených na tělese ucpávky. Podle dosavadních výsledků lze konstatovat, že u provazců vyrobených z PTFE a grafitu, hodnota třecího součinitele nezávisí na deformaci a velikosti radiálního tlaku v testovaném rozmezí. Hodnoty třecího součinitele se pro provazce z PTFE nachází v rozmezí (0,04 – 0,09) a pro provazce grafitové v rozmezí (0,15 – 0,22). Pro provazce z vláknitého grafitu byl naměřen větší rozsah hodnot třecího součinitele (0,3 – 0,55). Hodnota třecího součinitele tedy nejspíš bude ovlivněna deformací a velikostí radiálního tlaku. [5]



Obrázek 17: Testování třecího součinitele [5]

1.5 Životnost stlačované ucpávky

Životnost stlačované ucpávky závisí na mnoha faktorech. Mohou to být faktory konstrukční, tedy volba konstrukčního uspořádání ucpávky, nebo správně zvolený počet těsnících kroužků. Se zvoleným počtem těsnících kroužků souvisí faktory silové. Správně zvolená přítláčná síla víka vyvolává axiální napětí, které má za následek vznikající napětí radiální a třecí sílu. Tím pádem má přítláčná síla vliv i na netěsnosti, které mohou v ucpávce vznikat. Dalším vlivem, působícím na životnost ucpávky, je volba materiálu, ze kterého je samotný provazec vyroben. Ten musí být vybírán v závislosti na druhu těsněných látek a na prostředí, které se v daném zařízení vyskytuje. [1]

2 Stlačované ucpávky pro abrazivní vsádky

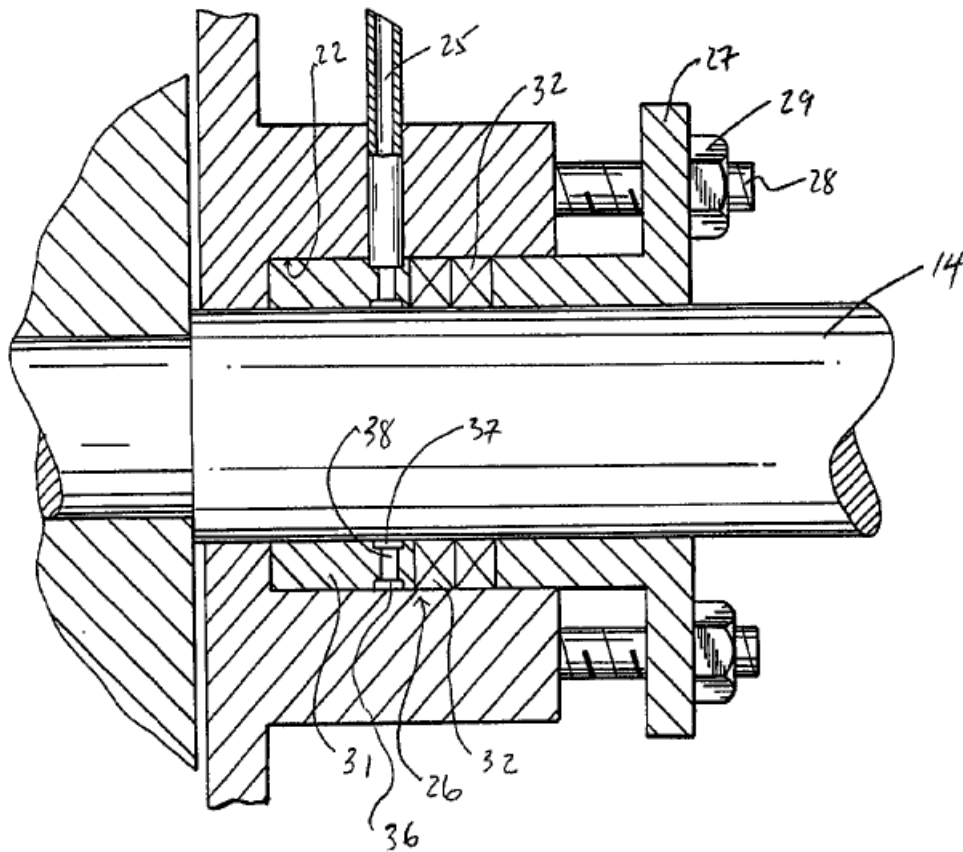
Abrazivní vsádky jsou vsádky obsahující abrazivní částice, které mají brusný účinek. Typická velikost takových částic se pohybuje v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Se zpracováním takových vsádek a jejich utěšňováním se můžeme setkat v různých průmyslových odvětvích, například ve stavebnictví při přípravě stavebních materiálů. Dále ve farmaceutickém průmyslu, při výrobě hnojiv, sklářských písků, krmiv pro dobytek a barviv. [7]

Z předešlé definice lze logicky vyvodit, že problémy se zpracováním abrazivních vsádek tkví hlavně ve zvýšeném opotřebením součástí zařízení, které jsou v kontaktu s touto vsádkou. Ať už se jedná o opotřebením míchadel, nádob, ve kterých je daná směs připravována, čerpadel, ventilů nebo samotných ucpávek.

2.1 Konstrukce stlačovaných ucpávek pro abrazivní materiály

Konstrukce stlačovaných ucpávek pro abrazivní materiály se nijak zvlášť neliší od konstrukce ucpávek pro jiné materiály. Stále vychází z principu jednoduché ucpávky. Rozdíl tvoří například rozdílné uspořádání uvnitř těles ucpávek.

Na následujících stranách je výběr z patentovaných ucpávek, které by mohly být z hlediska jejich řešení vhodnější pro použití s abrazivními materiály.



Obrázek 18: Patent US6834862B2 [4]

Na Obrázek 18 je znázorněna ucpávka, která má v plášti otvor, kterým se k provazcům přivádí lubrikace (č. 25). Ta má za účel snižovat tření mezi hřídelí a provazci. V případě přítomnosti abrazivního média by lubrikace mohla sloužit k vyplavení jemných abrazivních částic z prostoru mezi hřídelí a provazci, a tím prodloužit životnost ucpávky. Na levé straně lze také vidět rotační těleso, které se nachází na hřídeli před přístupem do ucpávkového prostoru. To by mohlo snížit počet abrazivních částic, které se do tohoto prostoru dostanou. [4]

Na Obrázek 19 lze vidět obdobné řešení, kde je navíc mezi rotačním tělesem a čelem ucpávky použito těsnění. Toto těsnění by také mohlo zabránit přístupu většího množství abrazivních částic do prostoru ucpávky. Přítlačnou sílu působící na toto těsnění lze navíc regulovat pomocí šroubů umístěných v přírubě ucpávky (viz šipky). [8]

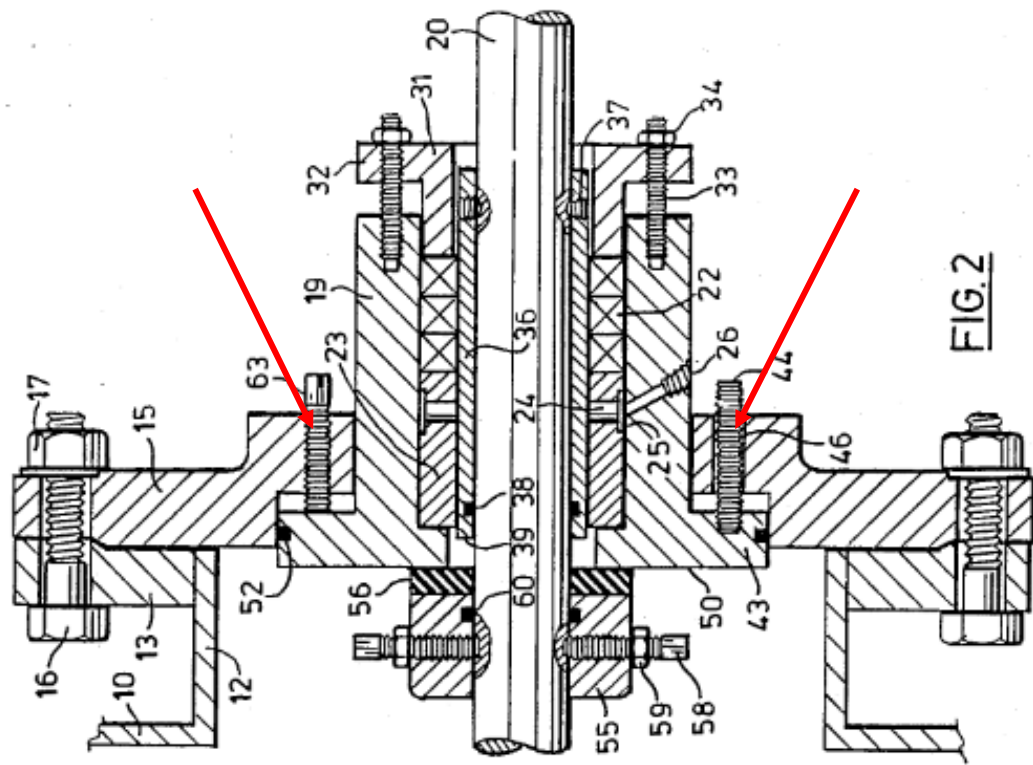


FIG. 2

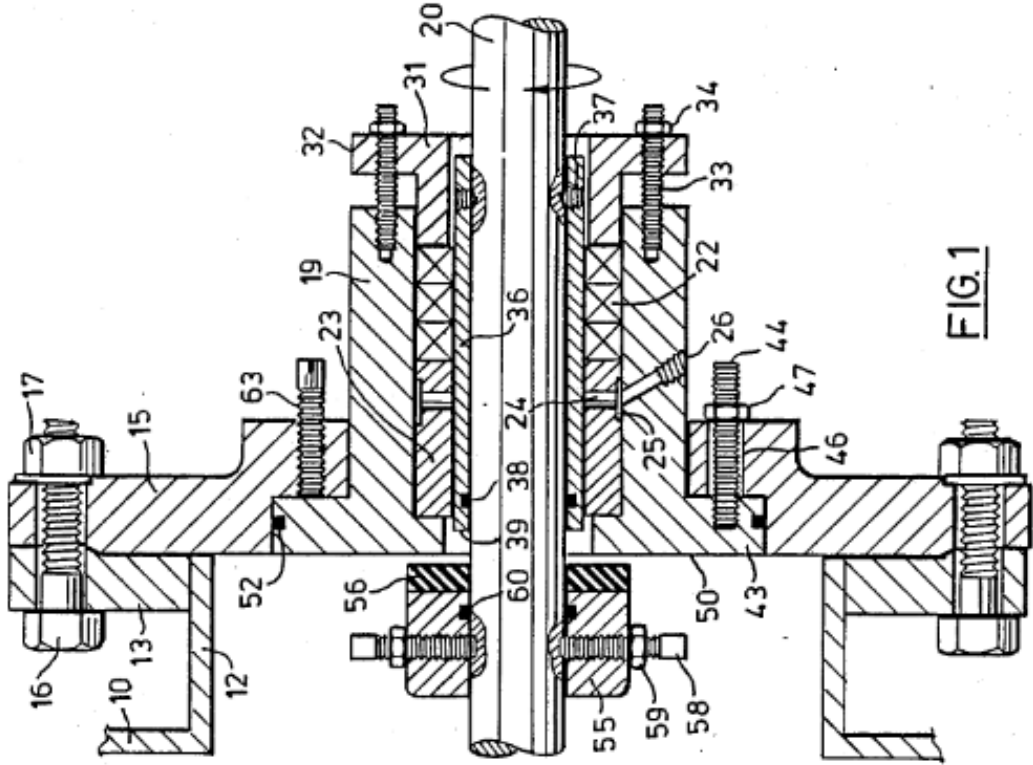
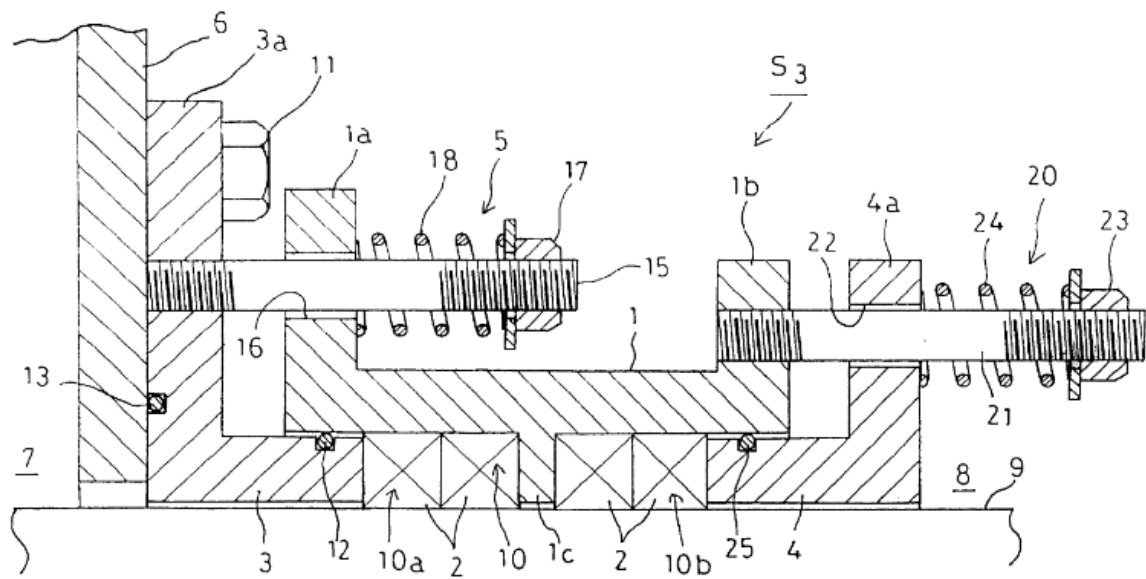


FIG. 1

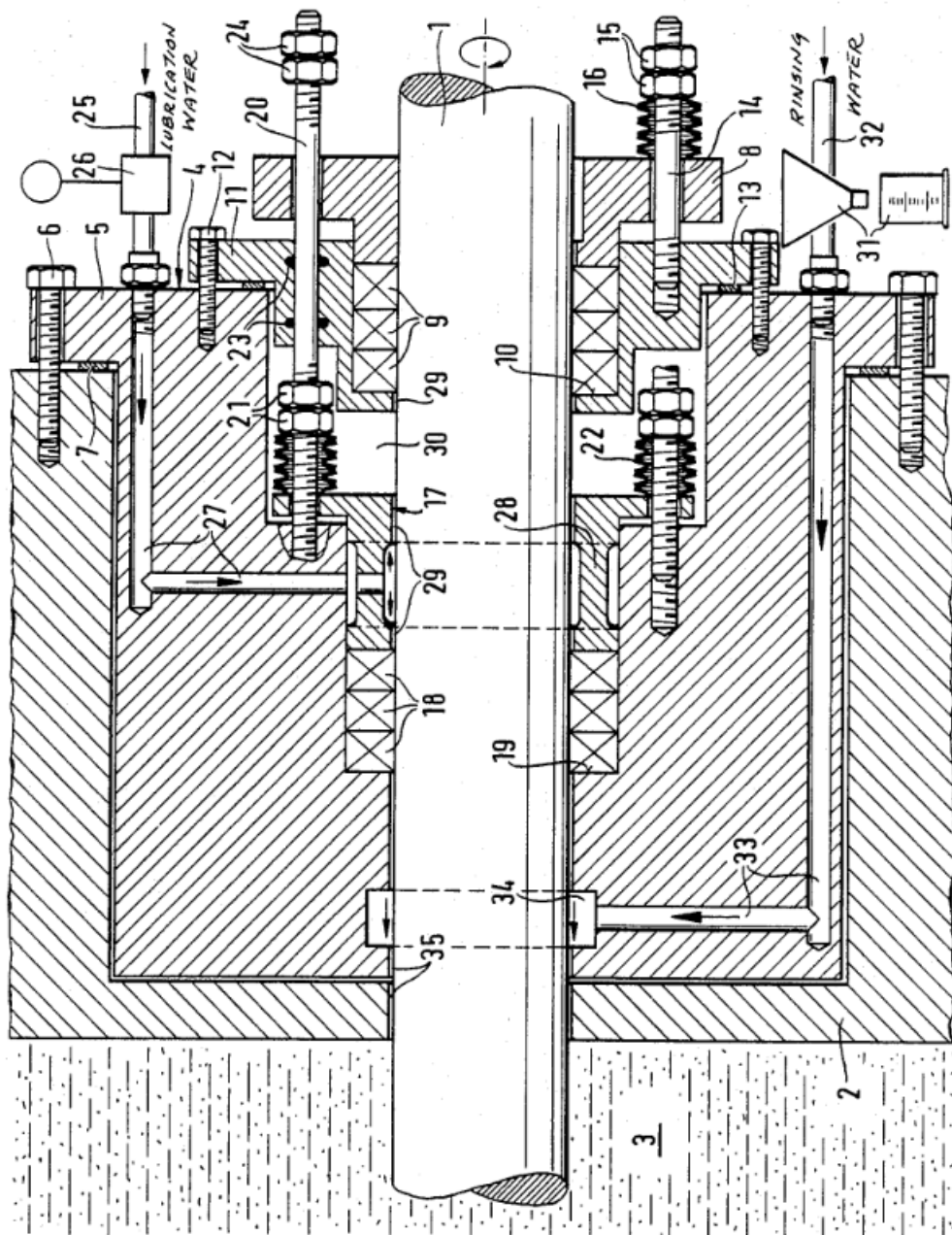
Obrázek 19: Patent US4878677A [8]



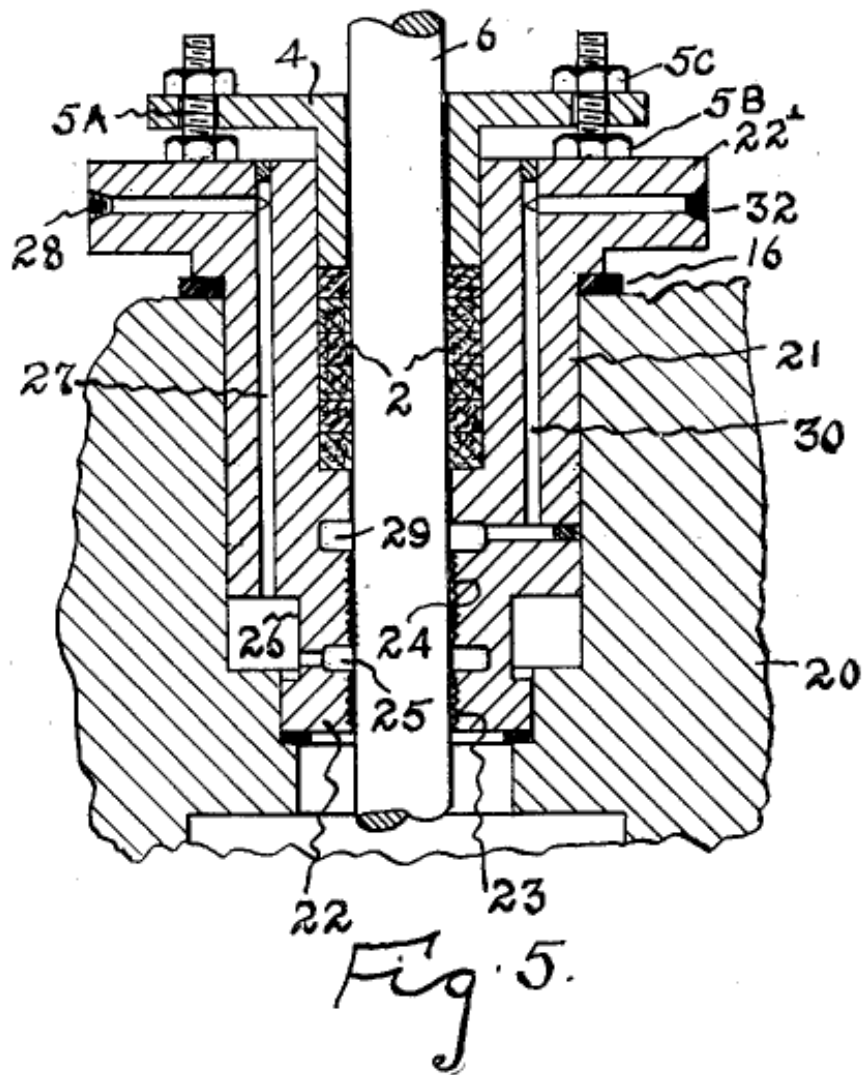
Obrázek 20: Patent US6382633B1 [3]

Na Obrázek 20 je schéma ucpávky v provedení se dvěma přitlačnými víky. Jedním klasickým a druhým s přepážkou, která rozděluje těsnicí prostor na dvě části. Toto rozdělení může mít za následek lepší rozložení axiálního napětí. V případě zpracovávání abrazivních materiálů by z ekonomického hlediska bylo možné v první části (na obrázku vlevo), použít provazce odolné vůči abrazi. V druhé části by se následně použil provazec z jiného materiálu. Víko s přepážkou je oproti klasickému víku a tělu ucpávky těsněno dvěma O kroužky (č. 12 a 25). [3]

Na Obrázek 21 je vyobrazeno další řešení stlačované ucpávky. Tentokrát se jedná o provedení se dvěma oddělenými ucpávkovými prostory. Před první z nich je přiváděna proplachovací voda, která má za úkol zabránit částicím obsažených v utěšňované látce proniknout do těsnicího prostoru. Tyto částice by mohly těsnicí provazce poškozovat. Z druhé strany je do prvního těsnicího prostoru také přiváděna lubrikace. Druhý těsnicí úsek je proveden na principu jednoduché stlačované ucpávky bez proplachu a lubrikace. [9]



Obrázek 21: Patent US4765631A [9]



Obrázek 22: Patent US2486939A [10]

Na Obrázek 22 je podobné řešení ucpávky jako v případě předchozím na Obrázek 21. Také využívá systému kanálků k lubrikaci ucpávkového prostoru. Lubrikant se přivádí kanálkem č. 32. K lepšímu rozlití lubrikace je v těle ucpávky vytvořen závit (23, 24). Závit je přerušovaný drážkou (25), do kterého je přiváděno médium zabraňující proniknutí lubrikace dále dovnitř zařízení. [10]

V případě utěsňování abrazivní vsádky, by médium vstupující z kanálku č. 32, mohlo zároveň zabraňovat i abrazivním částicím ke vstupu k ucpávkovým provazcům, Tím by bylo možné prodloužit životnost provazců.

2.2 Přehled ucpávkových šňůr používaných pro abrazivní materiály

Ucpávkové šňůry jsou vyráběny z různých materiálů a v různých rozměrech. Volba těchto parametrů záleží na druhu aplikace, ve kterých se bude těsnění využívat. Zde je přehled několika druhů provazců od různých výrobců, které jsou vhodné pro těsnění abrazivních látek.

Tabulka 1: Přehled ucpávkových šňůr [11], [12], [13]

Výrobce	Typ	Rozměr [mm]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Kluzná rychlost [m/s]	Chemická odolnost - pH	Složení provazce
Gambit Lubawka Sp. z o.o.	6086 ZEBRA	6 - 25	-200 až +280	20	20	2 - 13	PTFE, grafit, aramid
Gambit Lubawka Sp. z o.o.	6087 GAMFLON AR	6 - 25	-200 až +280	300	2	2 - 13	PTFE, grafit, aramid
Gambit Lubawka Sp. z o.o.	6089	6 - 25	-200 až +280	300	2	2 - 13	PTFE, aramid
Palmetto	1350	3,2 - 25,1	-23 až +260	34,5	12,7	3 - 11	aramid, PTFE
Palmetto	PE1000	3,2 - 25,4	-240 až +280	55	12,7	1 - 13	aramid, grafit
Palmetto	1371	3,2 - 25,4	-23 až +288	34,5	10,2	1 - 14	aramid
Palmetto	1359	3,2 - 25,4	-23 až +260	48	13,7	3 - 11	PTFE, grafit, aramid
Palmetto	1364	3,2 - 25,4	260	41	8	1 - 12	PTFE, aramid
John Crane	1345	4,8 - 25,4	-110 až +288	34,5	13	0 - 12	Polyamid, PTFE
John Crane	1349	3,2 - 25,4	-110 až +288	34,5	13	0 - 12	Polyamid, PTFE

Tabulka 2: Přehled ucpávkových šňůr [14]

Výrobce	Typ	Rozměr [mm]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Kluzná rychlost [m/s]	Chemická odolnost - pH	Složení provazce
Temac	4100	5 - 12	-100 až +280	až 180	až 10	3 - 12	PTFE, aramid
Temac	4110	5 - 12	-100 až +280	až 300	až 10	3 - 12	PTFE, aramid
Temac	4120	5 - 12	-100 až +280	až 300	až 10	0 - 12	PTFE, aramid
Temac	4200	5 - 12	-100 až +280	až 250	až 20	3 - 12	PTFE, grafit, aramid
Temac	4210	5 - 12	-100 až +280	až 300	až 20	3 - 12	PTFE, grafit, aramid
Temac	4220	5 - 12	-100 až +280	až 200	až 20	3 - 12	PTFE, grafit, aramid
Temac	3100	5 - 12	-100 až +280	až 100	až 20	3 - 12	PTFE, aramid
Temac	3200	5 - 12	-100 až +280	až 100	až 20	3 - 12	PTFE, aramid
Temac	3300	5 - 12	-100 až +280	až 100	až 20	2 - 12	PTFE, aramid

Tabulka 3: Přehled ucpávkových šňůr [6]

Výrobce	Typ	Rozměr [mm]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Kluzná rychlost [m/s]	Chemická odolnost - pH	Složení provazce
Dimer	3100	-	-100 až +280	až 200	až 35	2 - 12	aramid
Dimer	3200	-	-100 až +280	až 100	až 20	3 - 12	aramid
Dimer	3300	-	-100 až +280	až 100	až 12	2 - 12	aramid
Dimer	4100	-	-100 až +280	až 180	až 10	3 - 12	PTFE, aramid
Dimer	4120	-	-100 až +280	až 300	až 10	0 - 12	PTFE, aramid
Dimer	4210	-	-100 až +300	až 150	až 25	1 - 14	PTFE, grafit, aramid
Dimer	4220	-	-100 až +280	až 200	20	3 - 12	PTFE, aramid

Z rešerše ucpávkových provazců od různých výrobců jasně vyplynulo, že nejvhodnější pro utěšňování abrazivních vsádek jsou provazce vyrobené z aramidových přízí. Ty mohou být doplněny grafitem nebo PTFE pro získání rozdílných vlastností, například zvýšení kluzné rychlosti.

3 Praktická část

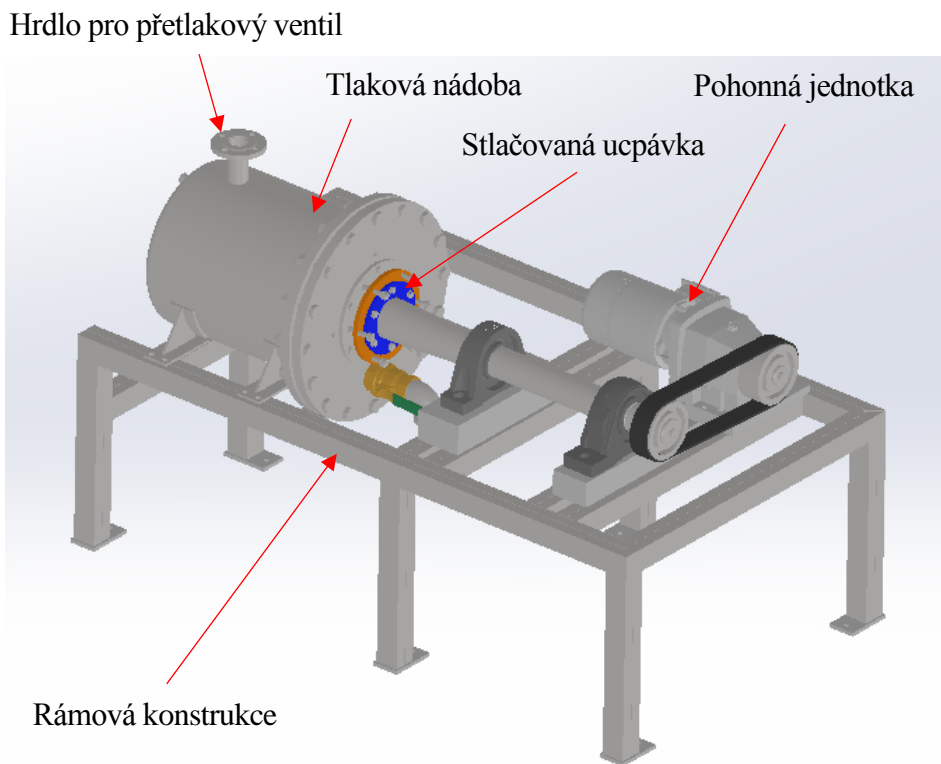
Praktická část se zabývá sestavením a zprovozněním aparatury pro účel testování stlačované ucpávky, CFD analýzou a samotným testováním ucpávky.

V první části je zařízení detailně popsáno z hlediska uspořádání, konstrukce a systému regulace. Následuje CFD analýza, která se zabývá popisem proudění v míchané nádobě. Třetí částí je provedení první zkoušky zařízení, ověření jeho funkčnosti a zjištění doby náběhu na provozní parametry. Čtvrtým bodem praktické části bylo odzkoušení samotné stlačované ucpávky. Cílem bylo zjistit, jak dlouho dokáže ucpávka odolávat míchání abrazivní vsádky.

Bohužel mohly být provedeny pouze dva experimenty (třetí a čtvrtá část), z důvodu pozdního dodání testovacího zařízení. K provedení těchto experimentů došlo až ve druhé polovině července 2018. Na závěr jsou definovány závěry a doporučení pro další postupování.

3.1 Popis laboratorní jednotky

Pro testování životnosti ucpávkových provazců bylo navrženo zařízení firmou MONTS s.r.o., která je zároveň jeho vlastníkem. Zařízení se skládá z rámové konstrukce, míchané tlakové nádoby, pohonné jednotky, jak lze vidět na následujícím Obrázek 23.



Obrázek 23: Laboratorní jednotka

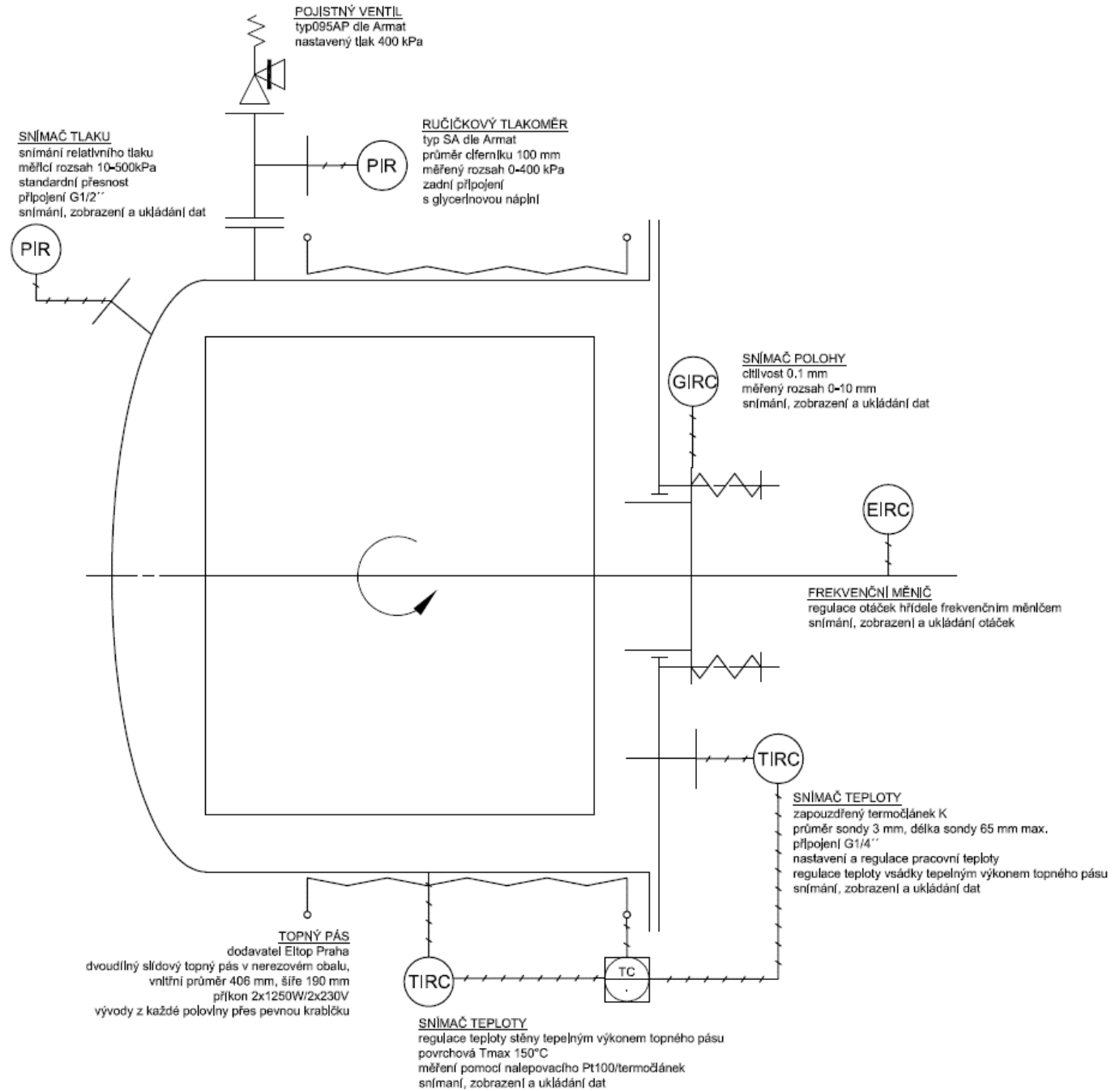
Nádoba o průměru 400 mm je uložena v horizontální poloze. Objem tlakového prostoru je 66,7 l. Pracovní přetlak, který je zároveň roven maximálnímu dovolenému tlaku má hodnotu 3 bar. Maximální pracovní teplota je 150 °C. Nádoba je ohřívána pomocí topného pásu.

Vsádka je v nádobě míchaná kotvovým míchadlem o průměru 360 mm a hřídel míchadla je utěsněna stlačovanou ucpávkou, která je konstrukčně provedena jako na Obrázek 2, tedy s pružinami pod dotahovacími maticemi.

Pohonná jednotka se skládá z motoru a převodovky. Motor má při provozu na frekvenci 50 Hz výkon 1,5 kW a jmenovité otáčky 1415 min⁻¹. Převodovka převádí otáčky motoru pomocí převodového poměru 28,8 na hodnotu 49 min⁻¹.

Systém regulace je složen ze dvou snímačů teploty. Jedním je nastavována a regulována teplota vsádky pomocí tepelného výkonu topného pásu. Druhým je regulována teplota stěny nádoby. Dále se skládá z jednoho elektronického snímače tlaku s měřicím rozsahem 10 – 500 kPa, a druhého ručičkového tlakoměru s rozsahem od 0 – 400 kPa. Pojistný ventil je nastaven na 400 kPa. Další důležitou součástí je snímač polohy posunutí ucpávky s citlivostí 0,1 mm a rozsahem 0 – 10 mm. Frekvence otáček hřídele je regulována pomocí frekvenčního měniče.

Detailní popis regulačního systému lze vidět na Obrázek 24.



Obrázek 24: Detailní popis systému regulace

3.2 CFD analýza

Cílem je vytvořit simulaci proudění kapaliny v tlakové míchané nádobě laboratorní jednotky. V první části této práce je stručně popsán popis tvorby modelu a sítě v programu Ansys.

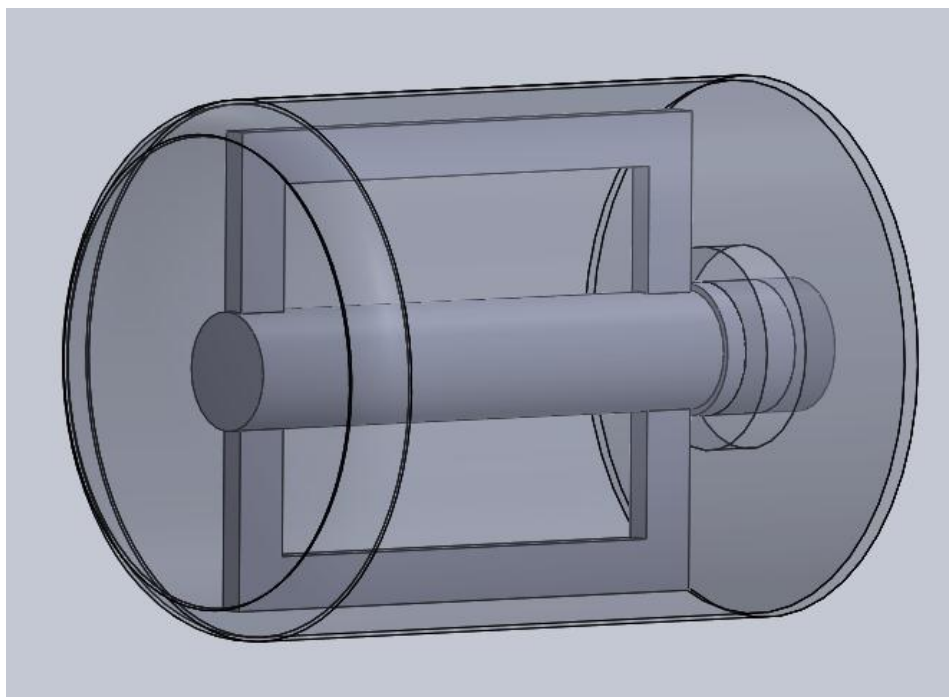
Simulace probíhá v softwaru Fluent, ve kterém je nutné nastavit základní procesní parametry a metody výpočtu. Na závěr je třeba vyhodnotit výsledky simulace, kterými jsou vypočítané příkonové číslo a charakteristika proudění abrazivní směsi v okolí stlačované ucpávky a určení vlivu proudění na funkci a životnost ucpávky.

3.2.1 Geometrie míchané nádoby

3.2.1.1 Tvorba geometrie

Pro simulaci jsem si zvolil 3D model, který jsem vytvořil dle výrobních výkresů od výrobce. Pro potřeby simulace jsem model nakreslil co možná nejjednodušší. Zanedbal jsem tedy hrdla a jiné malé entity, které by pouze zkomplikovaly výpočet, ale na výsledek by neměly zásadní vliv.

Model jsem tvořil v programu Solidworks, ve kterém jsem vymodeloval základní části. Tyto části byly nádoba a míchadlo. Z těchto dvou součástí jsem vytvořil sestavu, ve které jsem je zavazbil do určené polohy.

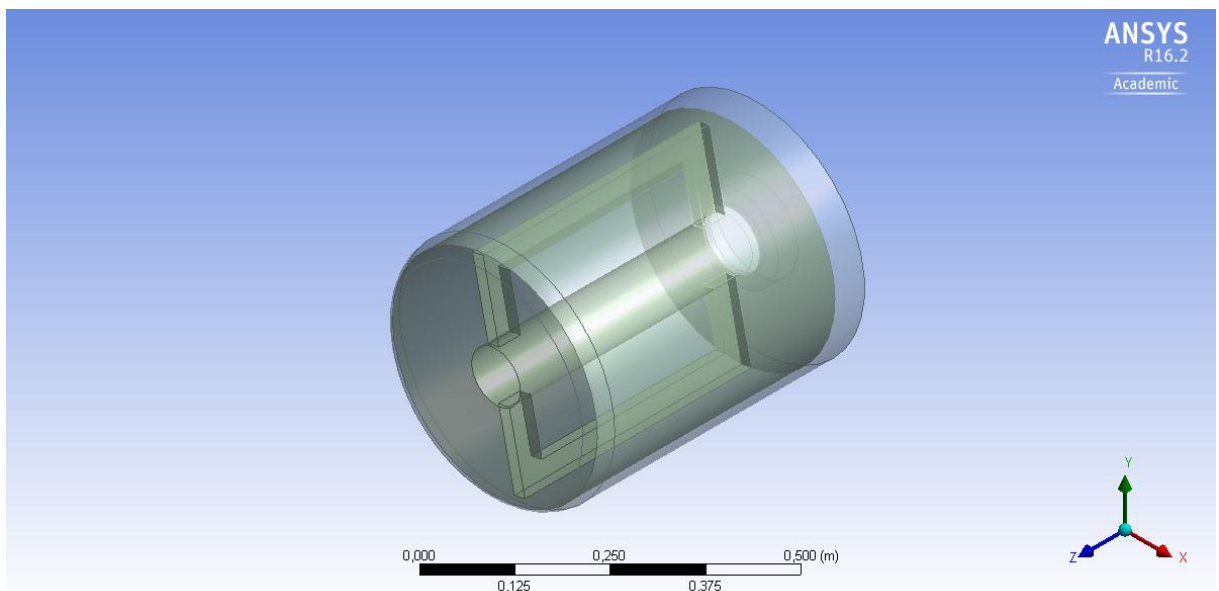


Obrázek 25: Geometrie vytvořená v Solidworks

3.2.1.2 Úprava geometrie

Dále jsem model upravoval v prostředí „DesignModeler“ programu ANSYS, do kterého jsem ho naimportoval ze Solidworks.

Zde jsem vymodeloval válec, který představuje míchanou oblast. Ten se nachází přesně mezi krajními plochami míchadla a stěn nádoby. Z této míchané oblasti jsem pomocí příkazu „Boolean“ vyjmul těleso míchadla. Vytvořil jsem tak dvě tělesa – míchanou oblast a míchanou nádobu, která mi představují rotor a stator. Lze je vidět na Obrázek 26. Následně jsem definoval okrajové podmínky pojmenováním jednotlivých ploch rotoru a statoru pomocí „Named Selections“. Nakonec jsem použil jeden z příkazů pro opravu nedokonalostí modelu, a to „RepairSliver“. Ten by měl vyhladit malé plošky, které by mohly vadit při následném tvoření sítě.



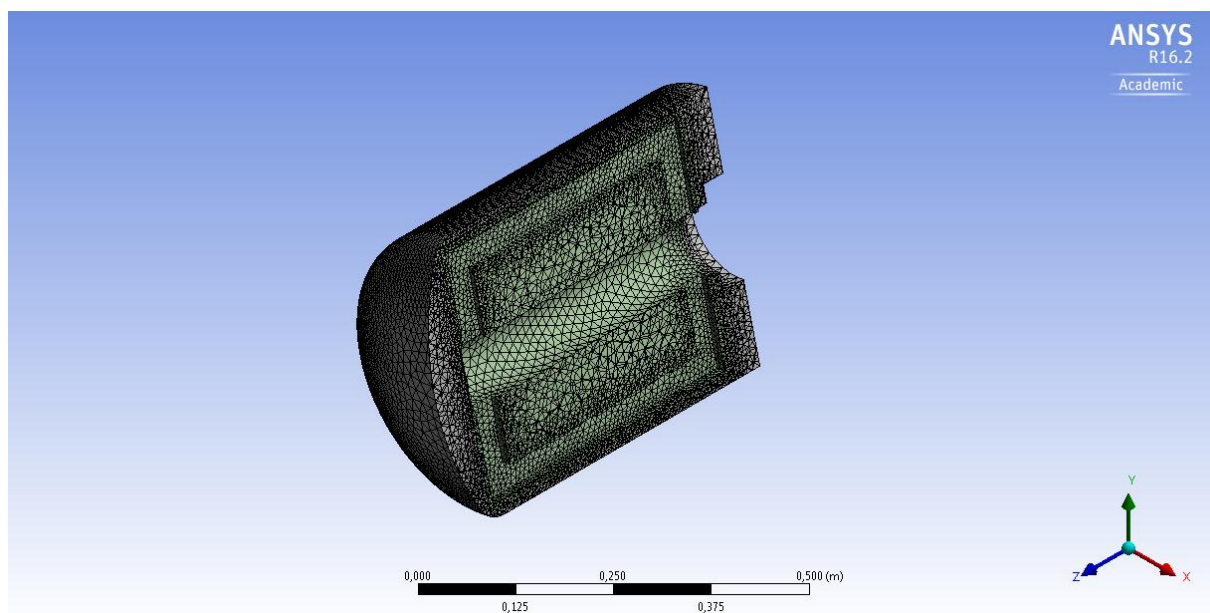
Obrázek 26: Model po úpravě v "DesignModeler"

3.2.2 Tvorba sítě

Následným důležitým krokem po vytvoření použitelného modelu je tvorba sítě. Síť jsem vytvářel podobně jako model. Čím jednodušší síť bude, tím jednodušeji bude simulace probíhat, zabere méně času, ale na druhou stranu bude méně kvalitní. Proto jsem zvolil kompromis.

3.2.2.1 Nastavení parametrů sítě

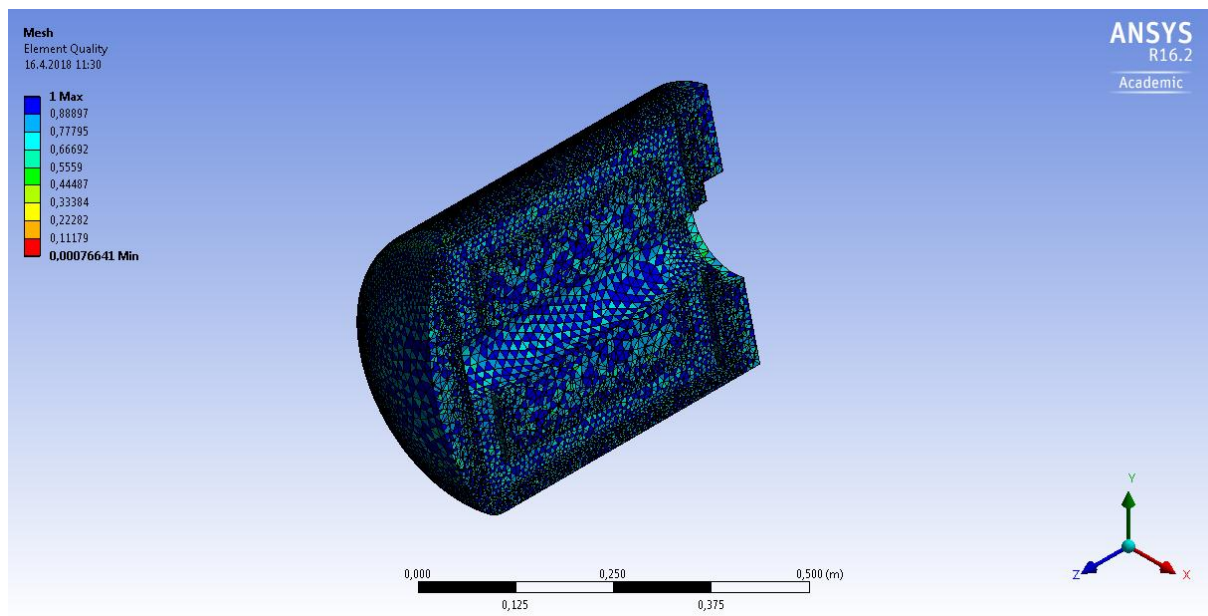
Fyzikální preference jsem nastavil na „CFD“, řešič „Fluent“. Funkci velikosti na „Proximity and Curvature“, vyhlazení sítě na „High“ a úhel elementu na „Fine“. Dále jsem upravoval velikost elementů, abych získal celkový počet elementů kolem 0,5 mil. Zbylé nastavení sítě jsem nechal v původním nastavení programu. Síť, kterou jsem vytvořil, je zobrazena na Obrázek 27.



Obrázek 27: Vytvořená síť

3.2.2.2 Kvalita sítě

Pro kontrolu kvality sítě jsem použil možnost v nabídce zobrazení sítě, a to „Element Quality“. Tento nástroj nám graficky znázorní kvalitu elementů sítě, a tedy i místa, se kterými by mohl mít program Ansys problém při simulování. Výsledek kontroly je znázorněn na Obrázek 28. Nejnižší kvalita nabývá hodnoty přibližně 0,6.



Obrázek 28: Kontrola kvality sítě

3.2.3 Procesní parametry

Simulace bude probíhat pro míchání vody. Fyzikální vlastnosti vody jsou dobře známé a pro potřebu simulace bude voda jako model dostačující.

3.2.3.1 Fyzikální vlastnosti vody

Základními parametry, jsou hustota vody o hodnotě 998 kg/m³ při teplotě 20 °C a dynamická viskozita 1.10⁻³ Pa.s. [15]

3.2.3.2 Výpočet Reynoldsova čísla

Pro správné provedení simulace je potřeba vypočítat Reynoldsovo číslo (rovnice č. 17) [16], abych mohl určit, zda-li je proudění uvnitř míchaného aparátu laminární nebo turbulentní. Podle tohoto primárního výpočtu musím zvolit správnou metodu výpočtu.

$$Re = \frac{n_m \cdot D^2 \cdot \rho}{\eta} = \frac{0,82 \cdot 0,36^2 \cdot 998}{1 \cdot 10^{-3}} = 106\ 059 \quad (17)$$

Z výpočtu můžu konstatovat, že se proudění nachází v turbulentní oblasti.

3.2.4 Simulace proudění

Po vytvoření vyhovující sítě, je dalším krokem nastavení výpočtu a výpočet samotný. Ten probíhá v softwaru Fluent, kam se nám síť automaticky naimportuje po jeho spuštění.

3.2.4.1 Nastavení výpočtu

Nastavení softwaru Fluent je rozděleno na několik částí, ve kterých definujeme například působení gravitace, materiály, okrajové podmínky nebo osu rotace.

3.2.4.1.1 General

Řešič jsem nastavil na:

Type	Pressure-Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Steady
Gravitational Acceleration	Osa Y: $-9,81 \text{ m/s}^2$

3.2.4.1.2 Models

Model jsem nastavil takto:

Viscous	SST k-omega
---------	-------------

3.2.4.1.3 Materials

V této části jsem definoval materiál míchané látky. Jak už jsem dříve zmínil, výpočet probíhá pro simulování míchání vody, proto jsem jako materiál míchané látky zvolil právě vodu. Materiál stěny nádoby nehraje roli, proto jsem ho ponechal v původním nastavení.

3.2.4.1.4 Cell Zone Conditions

Tento krok slouží k nastavení oblastí rotoru a statoru. Pro rotor jsem určil počátek osy otáčení do nuly, směr osy otáčení do osy Z a rychlost otáčení na 49 min^{-1} . Pro oblast statoru je nastavení stejné, kromě rychlosti otáčení, která je nulová.

3.2.4.1.5 Boundary Conditions

V okrajových podmínkách jsem nastavil stěnu rotoru jako „Moving Wall“, která koná rotační pohyb v ose Z, s rychlostí otáček 49 min^{-1} . Stěnu statoru jsem nastavil jako „Stationary Wall“.

3.2.4.1.6 Solution Methods

Nastavení jsem provedl takto:

Scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind

3.2.4.1.7 Run Calculation

Posledním krokem bylo spuštění kalkulace, kterou jsem nastavil na počet 3000 iterací.

3.2.5 Výsledek simulace

Jedním z výsledků je vypočítaný výsledný kroutící moment. Jeho hodnota je 0,39 N.m, jak můžeme vidět na výpisu výsledků z Fluentu – Obrázek 29 této hodnoty mohu dopočítat výkon a z něj následně příkonové číslo míchadla (rovnice č. 19). [16]

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 0 1)			
Zone	Moments (n-m)		
	Pressure	Viscous	Total
wall-rotor	0	-1.8882284e-05	-1.8882284e-05
wall_rotor	-0.37747497	-0.021688589	-0.39916356

Net	-0.37747497	-0.021707471	-0.39918244

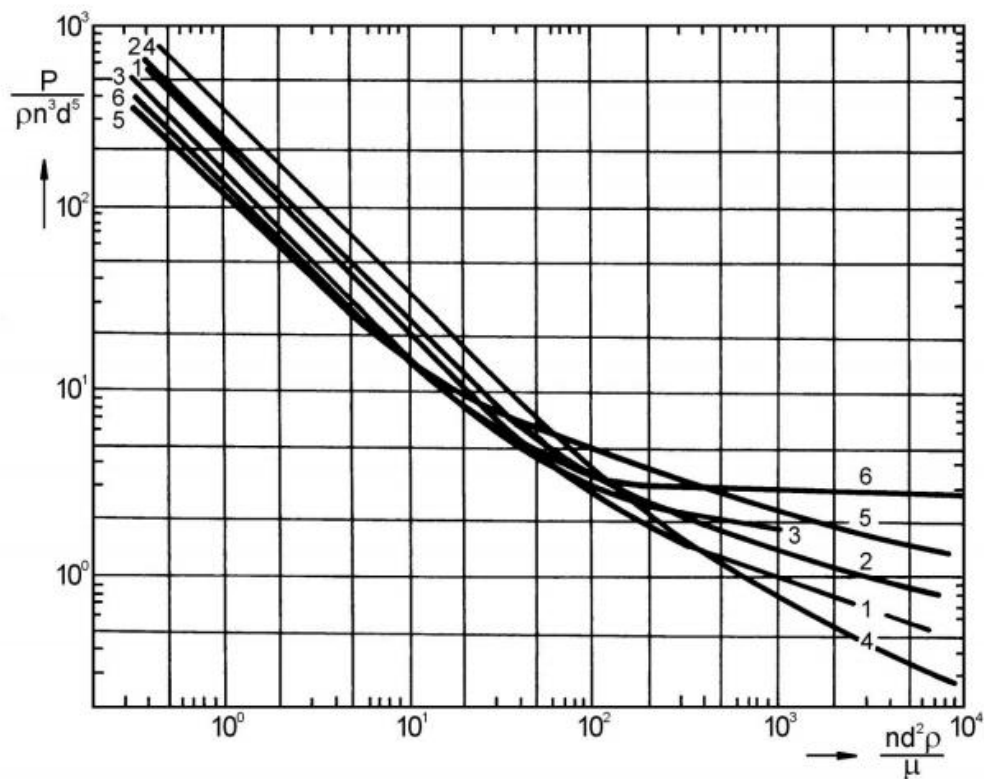
Obrázek 29: Výpis výsledků

$$P = Mk \cdot \omega = Mk \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_m = 0,39 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,82 = 2,0 \text{ W} \quad (18)$$

$$Po = \frac{P}{\rho \cdot n_m^3 \cdot D^5} = \frac{2}{998 \cdot 0,82^3 \cdot 0,36^5} = 0,60 \quad (19)$$

Hodnotu příkonového čísla jsem porovnal s grafem příkonových charakteristik pomaloběžných míchadel. Z porovnání je patrné, že se hodnota vypočítaného příkonového čísla řádově shoduje s hodnotami příkonových charakteristik na Obrázek 30 [17]

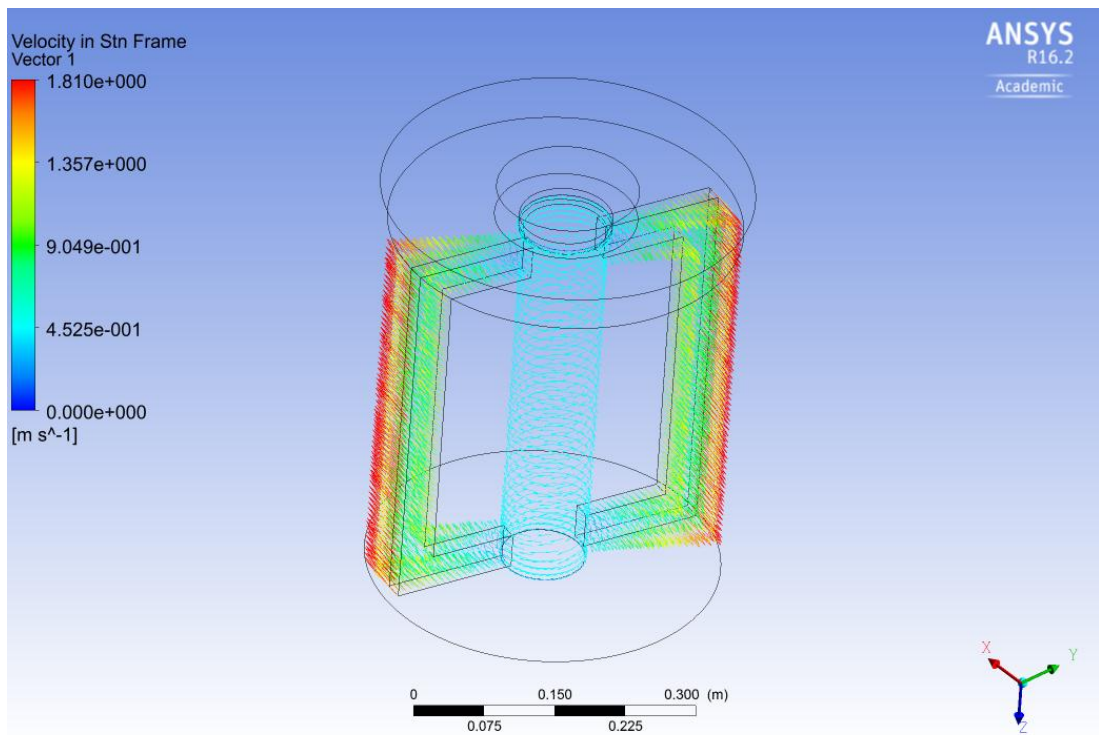
Příkonové charakteristiky některých typů pomaloběžných míchadel



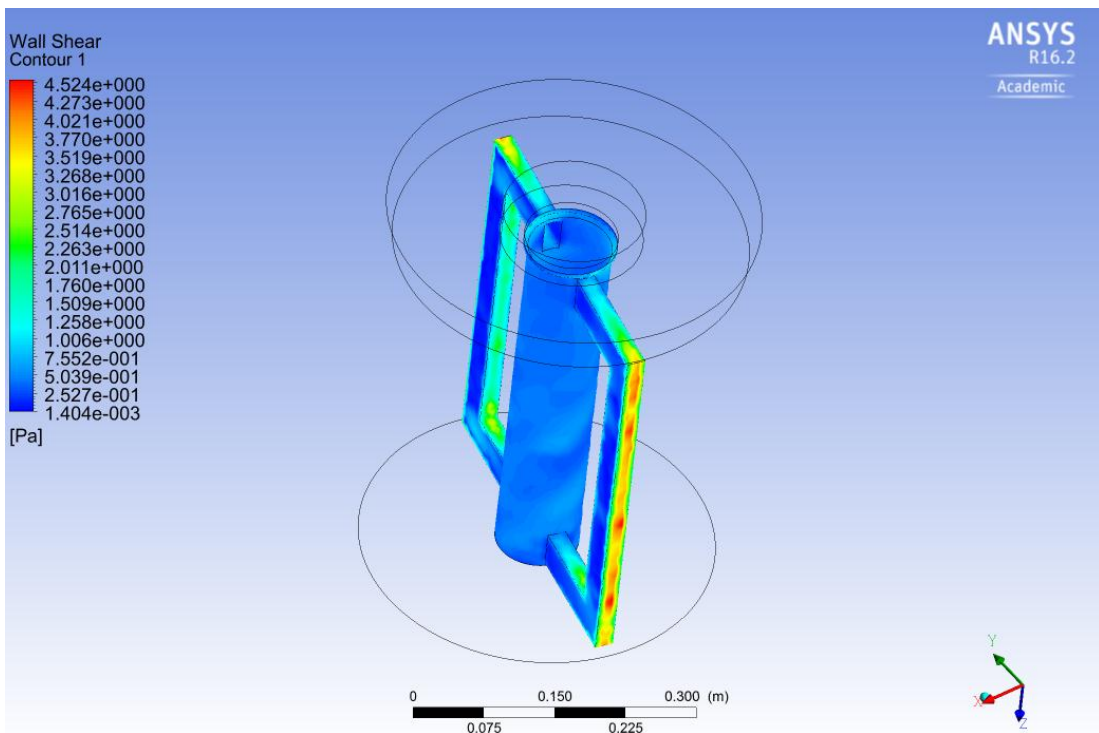
Obr. 9.3. Příkonové charakteristiky některých typů pomaloběžných míchadel.
 1 – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), 2 – šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem (CVS 69 1028), 3 – šroubové míchadlo umístěné excentricky, 4 – pásové míchadlo (CVS 69 1029), 5 – listové míchadlo (CVS 60 1016), 6 – čtyřnásobné lopatkové míchadlo umístěné excentricky

Obrázek 30: Příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel [17]

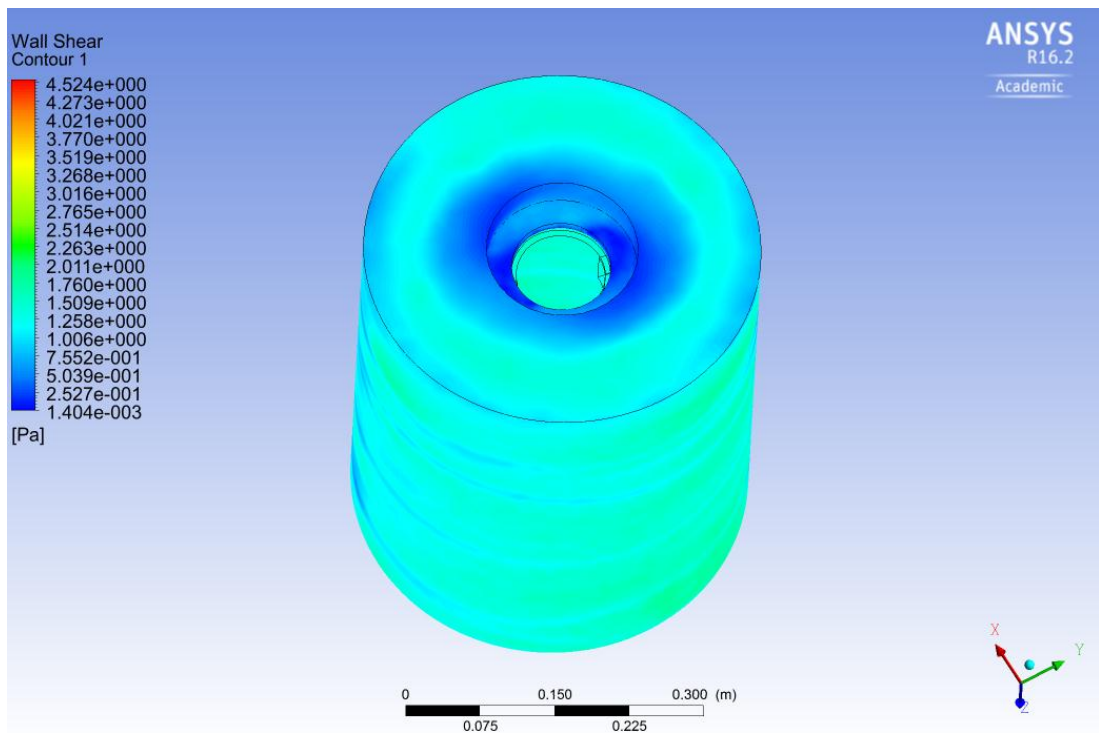
Dalšími výsledky jsou průběhy rychlostí v nádobě, průběhy napětí na stěně míchadla a na stěně nádoby. Znázornění těchto průběhů je vyobrazeno na následujících obrázcích.



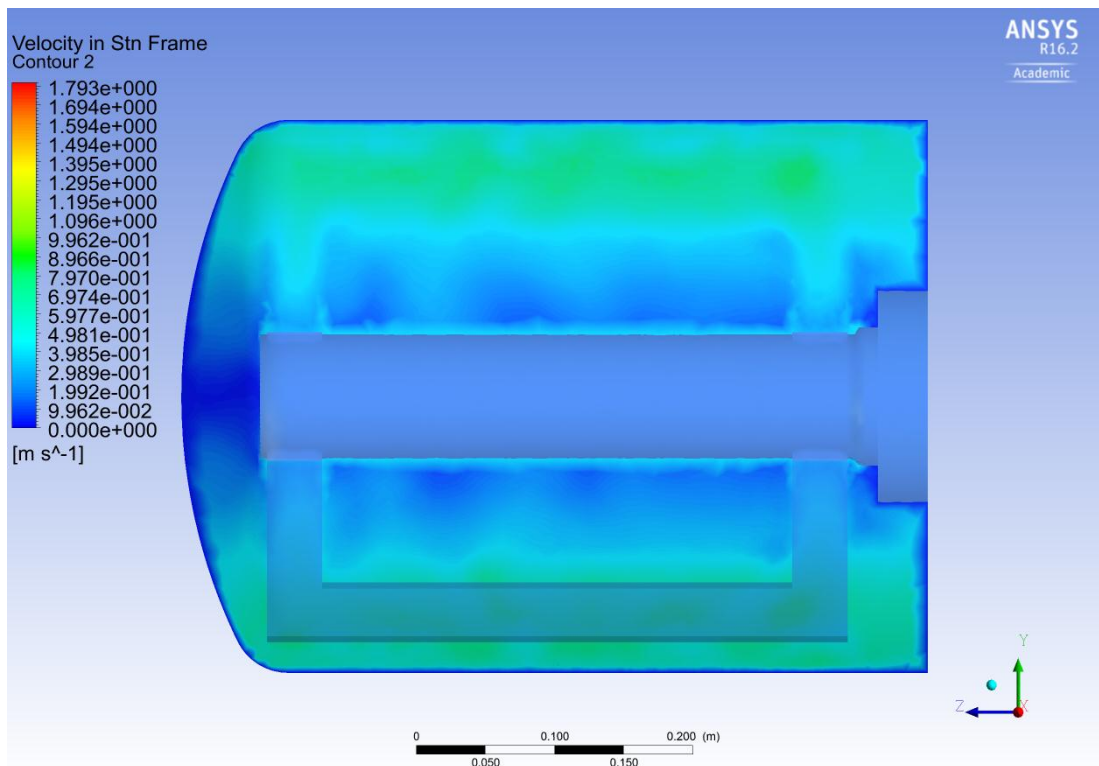
Obrázek 31: Vektor rychlosti na stěně míchadla



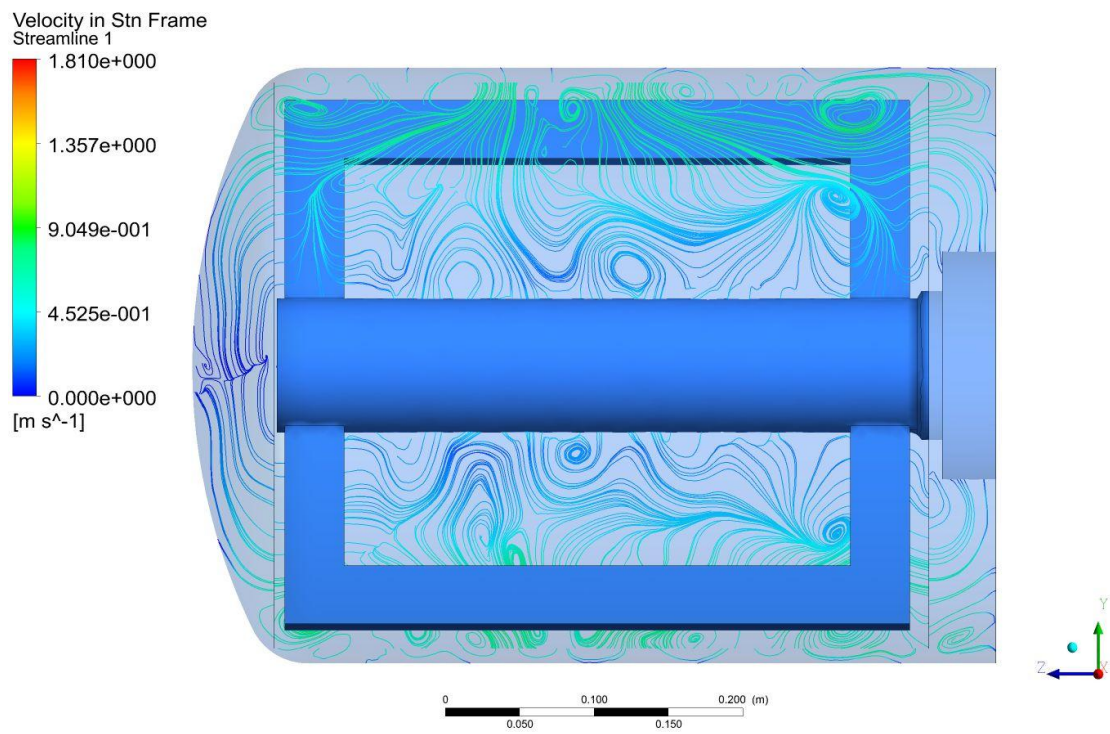
Obrázek 32: Napětí na stěně míchadla



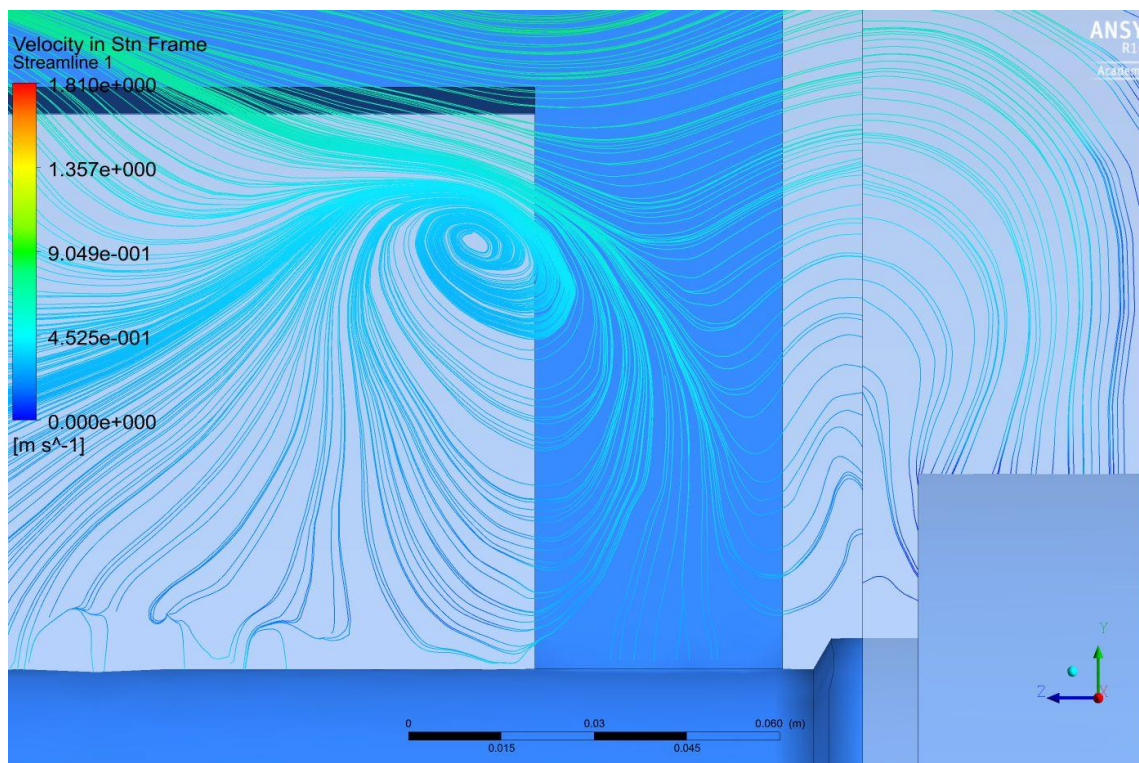
Obrázek 33: Napětí na stěně nádoby



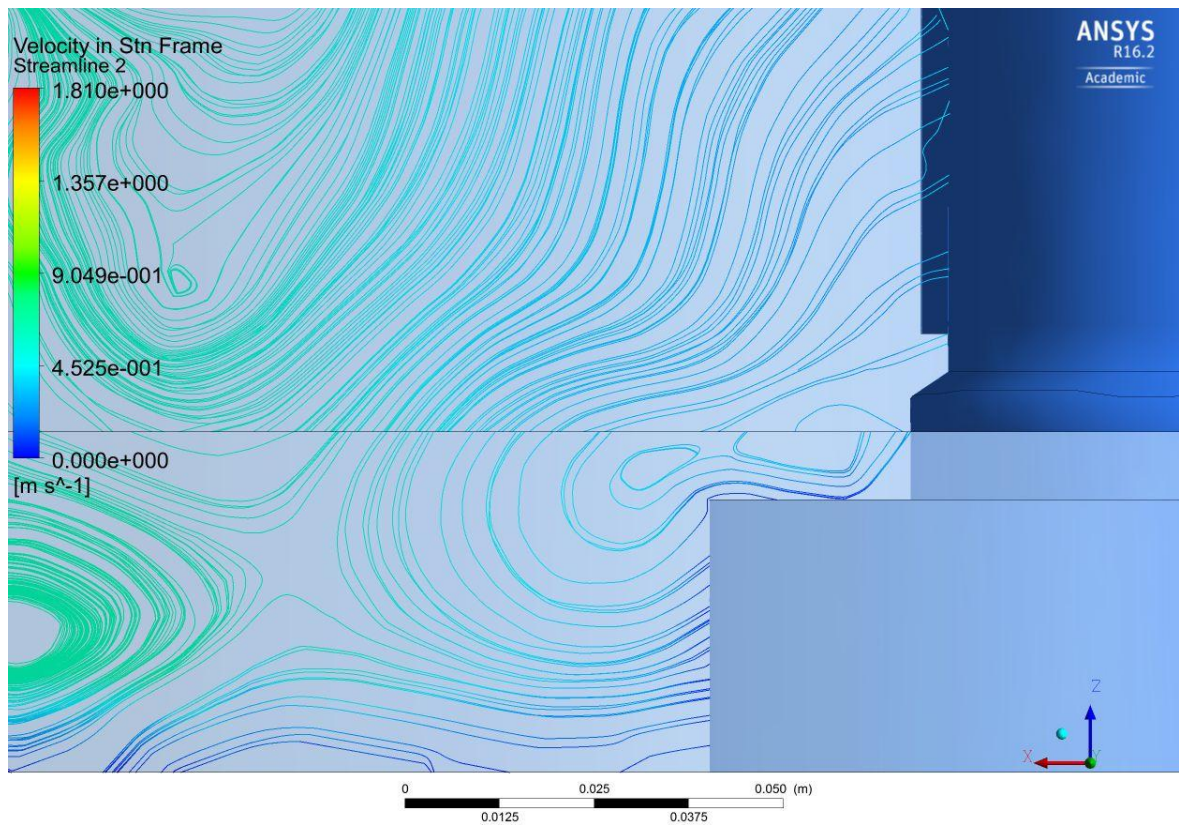
Obrázek 34: Rychlost proudění v průřezu nádoby



Obrázek 35: Proudové pole v průřezu nádoby



Obrázek 36: Detail proudového pole v okolí ucpávky v rovině YZ



Obrázek 37: Detail proudového pole v okolí ucpávky v rovině ZX

3.2.6 Závěr

Hlavním důvodem pro vytvoření této simulace, bylo charakterizovat proudění v okolí stlačované ucpávky. Toto proudění by mohlo mít vliv na její správné těsnění a životnost, vzhledem k tomu, že se bude v nádobě míchat abrazivní vsádka. Z výsledků je viditelné, že proudění v okolí této ucpávky je klidné a jeho rychlost nabývá nízkých hodnot. Proto mohu z těchto výsledků usoudit, že právě proudění nebude mít na funkci a životnost ucpávky zásadní vliv.

3.3 Testování provozuschopnosti jednotky

3.3.1 Sestavení a zprovoznění aparatury

Prvním krokem před testováním stlačované ucpávky byla příprava aparatury ke spuštění. Aparatura přišla téměř sestavená, bylo třeba jen přišroubovat pojistný přetlakový ventil na vrchní části zařízení. Dále celé zařízení vypodložit a utáhnout víko ucpávky, aby došlo k jejímu stlačení. Sestavené zařízení lze vidět na následujícím Obrázek 38.



Obrázek 38: Sestavené zařízení

Po dokončení výše uvedených příprav, se mohlo přejít k ověřování funkčnosti zařízení a zjišťování doby náběhu na provozní podmínky.

Na zařízení byly již přednastaveny základní parametry. Frekvence na motoru byla pomocí frekvenčního měniče nastavena na hodnotu 50 Hz, což po zpřevodování odpovídá otáčkám 49 min^{-1} na hřídeli (jmenovité otáčky motoru 1415 min^{-1} , převodový poměr 28,8). Teplota, na kterou se má vsádka ohřát byla nastavena na $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Víko ucpávky bylo pro zkušební účely utaženo o 12 mm vzhledem k nulové poloze tak, aby byl zajištěn axiální tlak na prvním kroužku ucpávky větší než tlak uvnitř nádoby. Výpočet délky dotažení víka ucpávky popisují rovnice 20 a 21. Podle rovnice 22 je axiální tlak vzniklý dotažením víka o 12 mm roven 1 MPa, což je více než trojnásobek tlaku uvnitř nádoby. Nulová poloha, je poloha, kdy na víko ucpávky působí nulový axiální tlak.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{n_p \cdot K \cdot L}{\pi \cdot d \cdot s_K} \quad (20)$$

$$L = \frac{p \cdot k \cdot \pi \cdot d \cdot s_K}{n_p \cdot K} = \frac{0,3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10}{6 \cdot 43,65} = 7,2 \text{ mm} \quad (21)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{n_p \cdot K \cdot L}{\pi \cdot d \cdot s_K} = \frac{6 \cdot 43,65 \cdot 12}{\pi \cdot 100 \cdot 10} = 1,0 \text{ MPa} \quad (22)$$

Indukční čidlo, které měří posunutí ucpávky bylo následně vynulováno. Nádoba byla naplněna vodou až po hrdlo.

Po zapnutí topení začalo měření všech důležitých hodnot, jak lze vidět v následující tabulce.

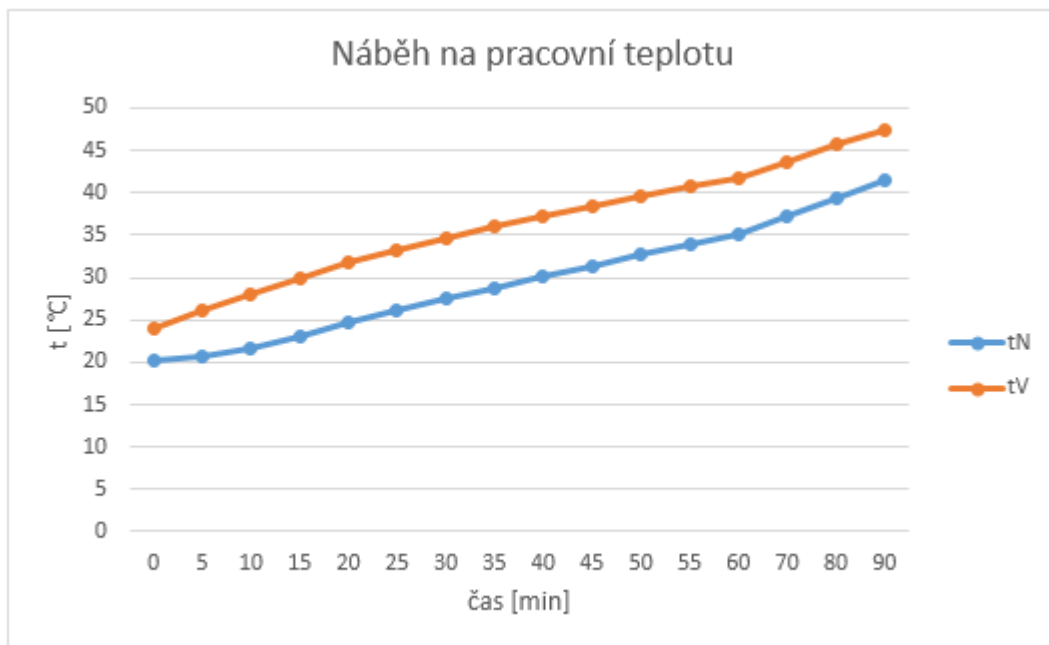
Tabulka 4: Data z primárního měření náběhu na provozní podmínky

čas [min]	I [A]	U [V]	tN [°C]	tV [°C]	p [bar]	posunutí [mm]
0	3,16	179	20,3	24,1	0	0
5	3,19	179	20,7	26,1	0	0
10	3,21	179	21,7	28	0,1	0
15	3,2	179	23,1	30	0,1	0
20	3,19	179	24,6	31,7	0,1	0
25	3,18	179	26,1	33,2	0,2	0
30	3,17	179	27,5	34,7	0,2	0
35	3,16	179	28,8	36,1	0,3	0
40	3,15	179	30,2	37,3	0,3	0
45	3,14	179	31,4	38,4	0,4	0
50	3,14	179	32,7	39,6	0,5	0
55	3,15	179	33,8	40,7	0,6	0
60	3,15	179	35	41,7	0,7	0
70	3,15	179	37,2	43,7	1	0
80	3,16	179	39,4	45,7	1,3	0
90	3,16	179	41,4	47,5	2	0

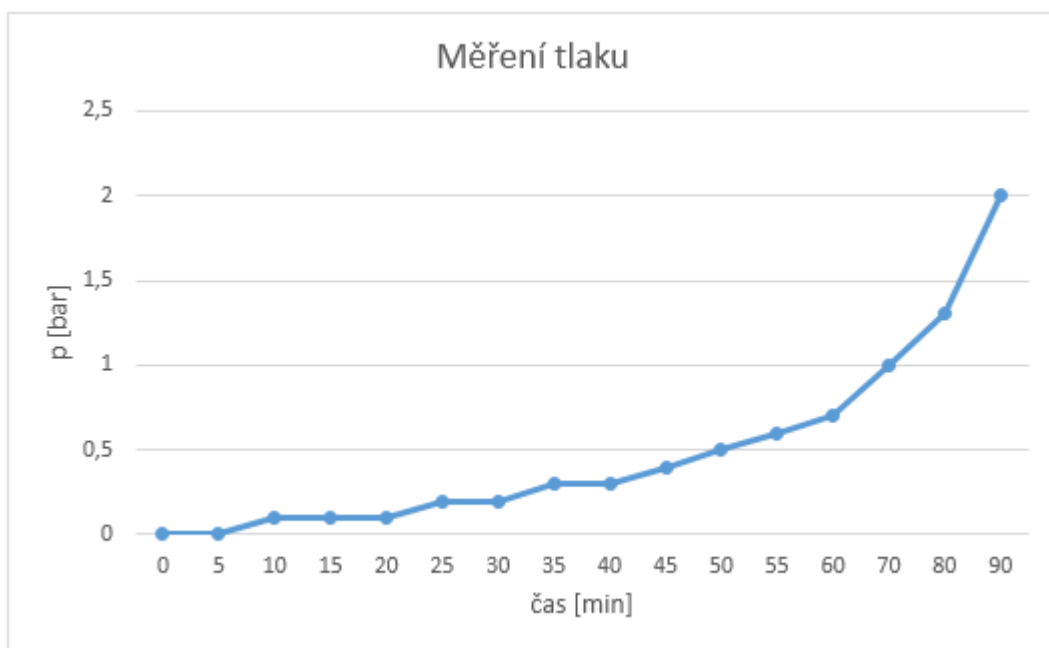
Teplota vsádky i teplota nádoby rostly lineárně, jak lze vidět na Graf 1 a tlak v nádobě rostl parabolicky, dle Graf 2.

Zařízení muselo být odstaveno po povolení pojistného ventilu, z důvodu příliš vysokého tlaku. Tlak, který ukazoval digitální ukazatel, odpovídal hodnotě na analogovém ukazateli, který se nachází na pojistném ventilu. Avšak naměřená teplota danému tlaku neodpovídala. Nádobu se na dotyk také jevila mnohem více horká, nežli ukazovaly měřicí přístroje.

Důvodem bylo nejspíš ohřátí plynu nad hladinou vody, který následně generoval vysoký přetlak a povolení pojistného ventilu.



Graf 1: Náběh na pracovní teplotu během primárního měření



Graf 2: Průběh měření tlaku během primárního měření

3.4 Provozní měření životnosti stlačované ucpávky

Po vyřešení problémů s náběhem na pracovní teplotu, mohlo začít samotné měření stlačované ucpávky. Před spuštěním měření musela být ucpávka rozebrána, vyjmuta staré těsnění a nádoba naplněna vsádkou s abrazivními částicemi a ucpávka stlačena. Rozebranou ucpávku lze vidět na následujícím Obrázek 39.



Obrázek 39: Rozebraná stlačovaná ucpávka

Prvním krokem bylo povolení víka ucpávky, následně bylo víko vysunuto a vyjmuty staré těsnicí kroužky jeden po druhém.

Jako nové těsnění byla použita šňůra TEMAPACK 4210, která je dle materiálového listu výrobce vyrobena z grafitu – teflonové příze a v rozích je zesílena aramidovými vlákny. Jako lubrikační médium je použit silikonový olej. Těsnicí šňůra by měla být schopna pracovat v rozmezí teplot od - 100 do 280 °C a do tlaku 300 MPa. Měla by mít dobrou chemickou odolnost proti abrazivním médiím.

Nová šňůra byla nařezána na požadovanou délku a konce každého úseku seříznuty pod úhlem cca 45 °. Kroužky byly následně zasunuty do těsnicího prostoru tak, aby byly vůči sobě pootočený o 90 ° Celkově bylo použito osm kroužků těsnění a jeden bronzový pomocný, ten byl umístěn jako první v pořadí.

Následně bylo na kroužky nasunuto víko, pomocí kterého byla ucpávka stlačena o 15 mm vůči nulové poloze a indukční čidlo bylo vynulováno. Utažení o 15 mm vyvolalo axiální tlak 1,25 Mpa. Výpočet lze vidět v následující rovnici 23.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{n_p \cdot K \cdot L}{\pi \cdot d \cdot S_K} = \frac{6 \cdot 43,65 \cdot 15}{\pi \cdot 100 \cdot 10} = 1,25 \text{ MPa} \quad (23)$$

Nádoba byla poté naplněna 50 l vody, do které bylo přidáno 10 % hm. korundu. Korund byl použit jako abrazivní médium pro účel testování. Rozložení velikosti částic bylo zjištěno pomocí přístroje Analysete 22 Compact. Střední velikost částic má hodnotu 141,189 μm. Rozložení velikosti částic lze vidět na následujícím Obrázek 40.

Do zařízení byl navíc namontován termočlánek Pt 1000 - Greisinger, kvůli podezření na špatnou funkci původního termočlátku.

Nakonec byly nastaveny provozní parametry. Teplota byla nastavena na hodnotu 140 °C a frekvence motoru na hodnotu 50 Hz, stejně jako při primárním měření. Po zkontrolování nastavených parametrů bylo zařízení spuštěno.

Průběh měření je zaznamenán v následující Tabulka 5.

Meas.No. 2	Date 07-16-2018	Time 07:42	Operator prof. Jirout	ID 12118	Serial No. 12118
------------	-----------------	------------	-----------------------	----------	------------------

korund

Measuring Range	0.31 [µm] - 300.74 [µm]	Pump	100[rpm]
Resolution	62 Channels (17 mm / 114 mm)	Stirrer	3[rpm]
Absorption	6.00 [%]	Ultrasonic	100
Measurement Duration	3 [Scans]		

Modell Independant

Fraunhofer Calculation selected.

Interpolation Values... C:\Program Files\A22_32\Fritsch\HIMNT_1.FPS

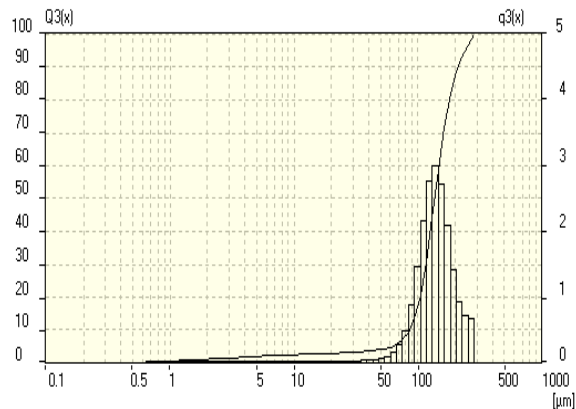
***** % <=	0.050 µm	0.5 % <=	1.000 µm	1.2 % <=	2.000 µm
1.5 % <=	3.000 µm	1.7 % <=	4.000 µm	2.0 % <=	5.000 µm
2.5 % <=	10.000 µm	2.9 % <=	20.000 µm	4.2 % <=	50.000 µm
17.3 % <=	100.000 µm	87.3 % <=	200.000 µm	***** % <=	300.000 µm

Interpolation Values... C:\Program Files\A22_32\Fritsch\10_90.FPV

10.0 % <=	85.995 µm	20.0 % <=	104.289 µm	30.0 % <=	116.313 µm
40.0 % <=	126.805 µm	50.0 % <=	137.322 µm	65.0 % <=	154.818 µm
70.0 % <=	161.354 µm	80.0 % <=	179.255 µm	90.0 % <=	211.225 µm
100.0 % <=	284.959 µm				

Mean	Values...						
D43 =	141.19 µm	D42 =	75.73 µm	D41 =	18.91 µm	D40 =	7.8 µm
D32 =	40.62 µm	D31 =	6.92 µm	D30 =	2.97 µm		
D21 =	1.18 µm	D20 =	.8 µm				
D10 =	86.05 µm						

Statistical Means...			
Arithmetic Mean Diameter	141.189 µm	Variance	2800.597 µm ²
Geometric Mean Diameter	122.59 µm	Mean Square Deviation	52.921 µm
Quadratic Square Mean Diameter	150.688 µm	Average Deviation	39.544 µm
Harmonic Mean Diameter	40.621 µm	Coefficient of Variation	37.482 %
Statistical Modes...			
Skewness	.123	Mode	138.745 µm
Curtosis	.648	Median	137.127 µm
Span	.909	Mean/Median Ratio	1.03
Uniformity	.29		
Specific Surface Area	1477.06 cm ² /cm ³		
Density	1. g/cc		
Form Factor	1. g/cc		



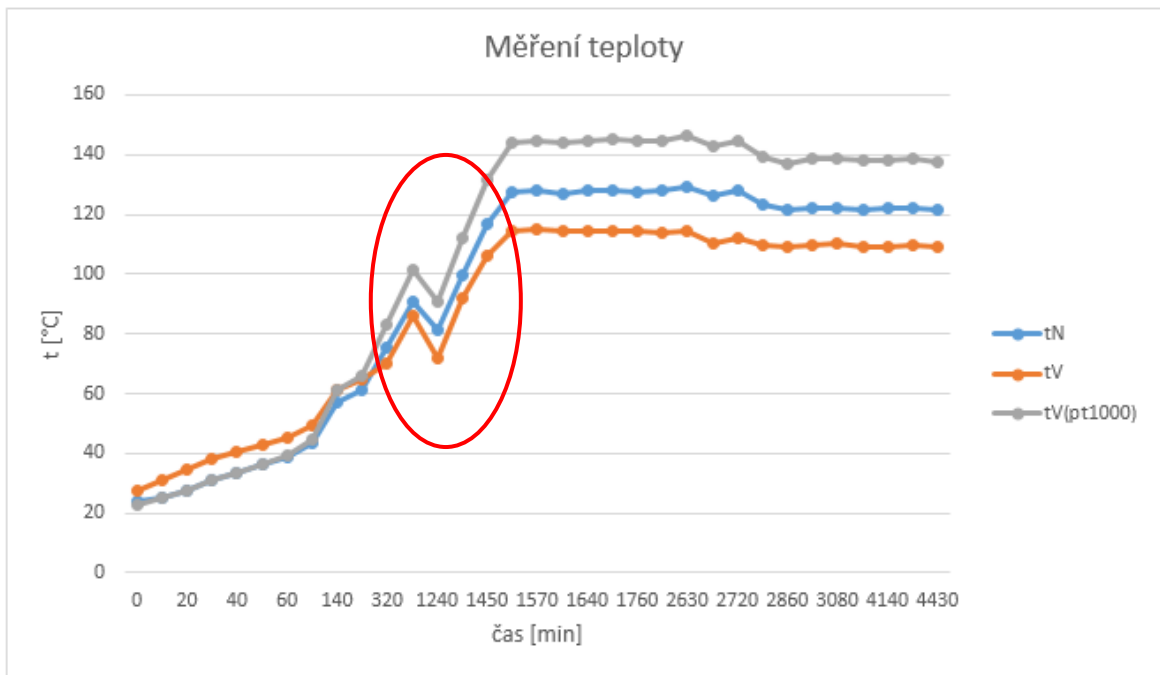
Obrázek 40: Rozložení velikosti částic

Tabulka 5: Data z měření životnosti stlačované ucpávky

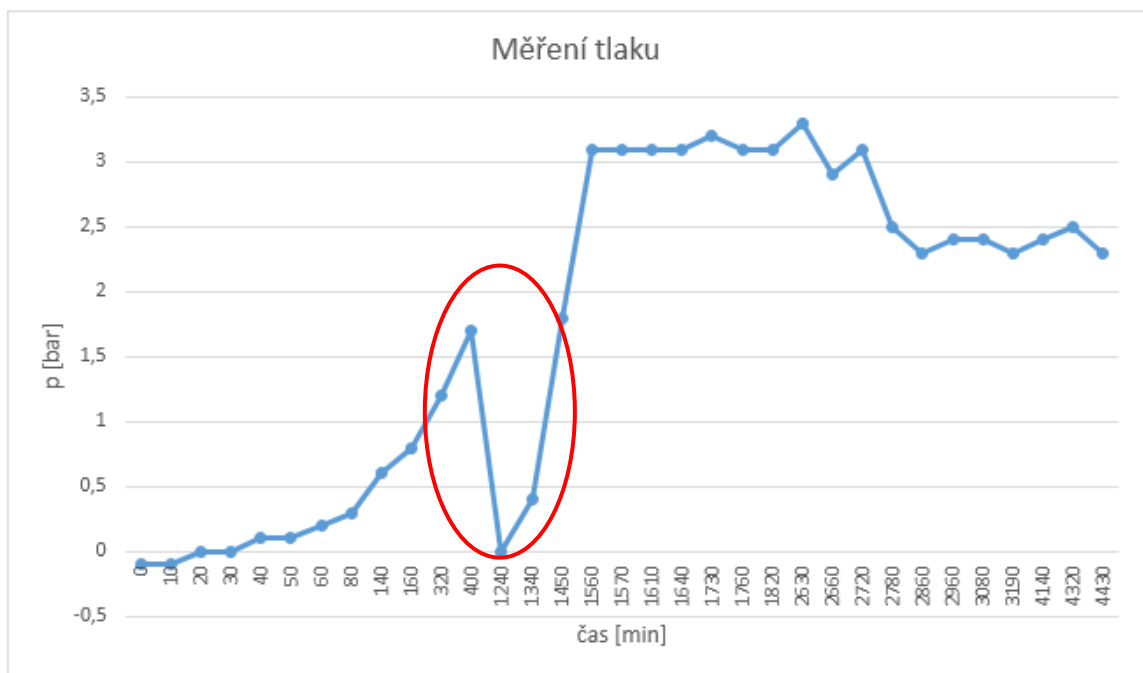
čas [min]	I [A]	U [V]	tN [°C]	tV [°C]	tV(pt100) [°C]	p [bar]	posunutí [mm]	změna axiálního tlaku [bar]
0	3,23	230	23,9	27,7	22,7	-0,1	0	12,51
10	3,23	230	25,1	31,3	25	-0,1	0	12,51
20	3,21	230	27,7	34,8	27,6	0	0	12,51
30	3,22	230	30,9	38	30,8	0	0,1	12,59
40	3,22	230	33,6	40,5	33,6	0,1	0	12,51
50	3,22	230	36,3	42,9	36,5	0,1	0	12,51
60	3,2	230	38,8	45,1	39,3	0,2	0	12,51
80	3,2	230	43,5	49,3	44,8	0,3	0	12,51
140	3,2	230	57,1	61	61	0,6	0	12,51
160	3,2	230	61,2	64,5	66,2	0,8	0	12,51
320	3,26	230	75,1	70,2	83,1	1,2	0	12,51
400	3,25	230	90,6	86	101,2	1,7	0	12,51
1240	3,22	230	81,2	72	90,6	0	0,1	12,59
1340	3,28	230	99,6	92	111,9	0,4	0,1	12,59
1450	3,25	230	116,8	106	131,6	1,8	0,1	12,59
1560	3,23	230	127,3	114,3	144,1	3,1	0	12,51
1570	3,23	230	127,8	115,1	144,4	3,1	0,1	12,59
1610	3,23	230	127,1	114,2	144,2	3,1	-0,03	12,48
1640	3,23	230	127,8	114,7	144,5	3,1	-0,03	12,48
1730	3,23	230	128	114,7	145,1	3,2	-0,03	12,48
1760	3,23	230	127,5	114,3	144,7	3,1	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
1820	3,23	230	128,3	113,9	144,5	3,1	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2630	3,23	230	129	114,3	146,3	3,3	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2660	3,23	230	126,3	110,2	142,8	2,9	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2720	3,23	230	128	111,8	144,5	3,1	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2780	3,23	230	123,2	109,9	139,4	2,5	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2860	3,23	230	121,3	109,1	137,1	2,3	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
2960	3,23	230	122,1	109,7	138,6	2,4	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
3080	3,23	230	122,2	110,1	138,9	2,4	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
3190	3,23	230	121,4	109,4	137,8	2,3	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
4140	3,24	230	121,9	109,3	138,1	2,4	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
4320	3,28	230	122,2	109,8	138,9	2,5	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56
4430	3,28	230	121,5	109,1	137,6	2,3	-0,08 až 0,06	12,44 až 12,56

Z naměřených hodnot lze na první pohled vidět rozdíl mezi teplotami měřenými původním a nově nainstalovaným termočlánkem. Dále můžeme pozorovat nárůst hodnot proudu a napětí oproti primárnímu měření. Tento nárůst může být způsoben výměnou provazců, tedy zvýšením tření, nebo zvýšením odporu míchadla, zapříčiněného přidáním korundu.

Průběh měření teplot a tlaku je také zaznamenán na následujících grafech Graf 3 a Graf 4.



Graf 3: Průběh měření teplot



Graf 4: Průběh měření tlaku

Z grafů je viditelný lineární nárůst teploty a parabolický nárůst tlaku, stejně jako tomu bylo během primárního měření. Na rozdíl od primárního měření ovšem teplota vystoupala až na provozní hodnotu.

Ani toto měření se však neobešlo bez problémů. Přes noc se tlak vyšplhal až na 4 bary a pojistný ventil musel tlak upustit, což zapříčinilo úplnou ztrátu tlaku a zároveň také pokles teploty. Ztráta tlaku a pokles teploty jsou zvýrazněné červenými elipsami v Graf 3 a Graf 4. Po tomto výkyvu muselo zařízení nabíhat znovu na pracovní teplotu i tlak. To se nakonec podařilo, jak lze vidět na Graf 3. Bohužel není zaznamenán čas, ani přesné hodnoty tlaku a teploty, když došlo ke ztrátě tlaku.

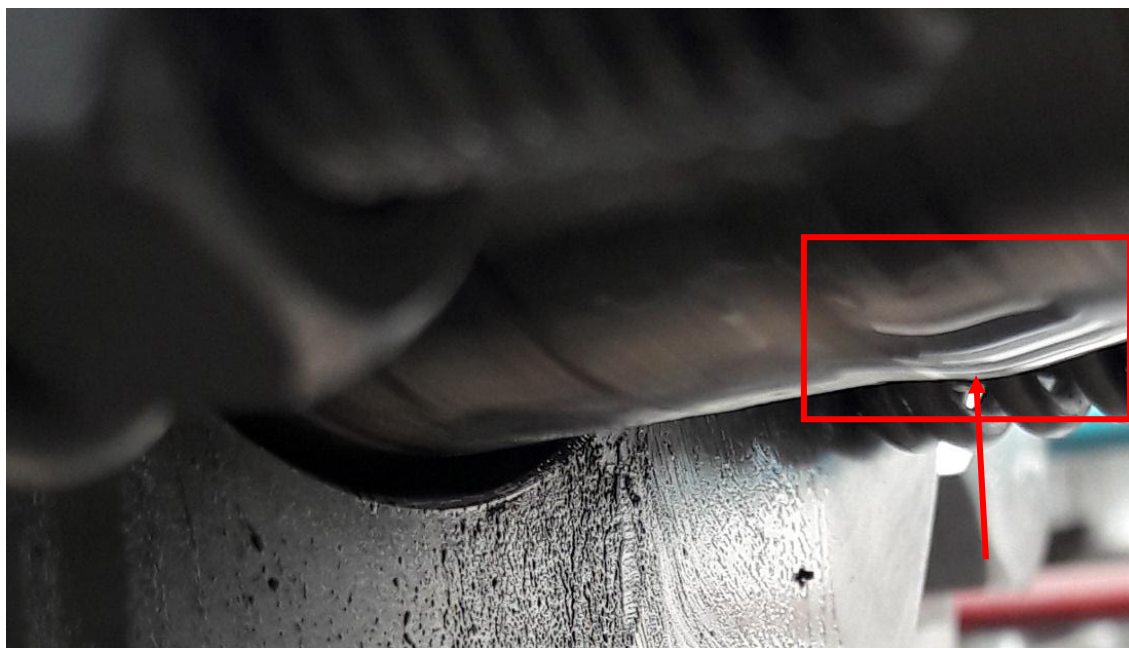
Následně se hodnota teploty více méně držela kolem požadovaných 140 °C, nicméně okolo hodnoty tlaku 3,1 bar ventil tlak upouštěl. Toto upouštění mohlo být způsobeno první ztrátou tlaku, kdy přetlakový ventil tlak upustil a do sedla ventilu se nejspíš dostaly částice korundu, které způsobily tuto následnou netěsnost při nižších tlacích. Aby nedocházelo k této netěsnosti, byla teplota snížena na hodnotu pod 140 °C.

Co se týče stlačované ucpávky, z jejího posunutí byla dopočítána změna axiálního tlaku. Jeho hodnota se pohybovala kolem původně nastavené hodnoty 1,25 MPa. K největšímu výkyvu nejspíš mohlo dojít při dosažení nejvyššího tlaku uvnitř nádoby během noci, data bohužel nejsou k dispozici.

První náznak netěsnosti se projevil již na začátku měření. Při teplotě nad 70 °C začala z komory ucpávky vytékat čirá viskózní kapalina, která vytvářela na hřídeli míchadla šplhající film s malou „boulí“, jak lze vidět na Obrázek 41. Nejspíš se jednalo o silikonový olej, kterým je ucpávková šňůra lubrikovaná.

Dále se z ucpávky začala uvolňovat černá emulze, což mohlo značit konec životnosti těsnění a jeho prodření. Emulze je viditelná na Obrázek 42.

Po vytečení této emulze bylo měření zastaveno a zařízení odstaveno z provozu. Ucpávka došla do mezního stavu, což znamená, že vytékání kapaliny trvalo bez přestání po dobu minimálně pěti sekund.



Obrázek 41: Tvorba šplhajícího filmu na hřídeli míchadla



Obrázek 42: Emulze vytékající z ucpávky

Po odstavení zařízení následovalo vypuštění vsádky a rozmontování ucpávky, aby se dalo zjistit, jaká byla příčina vzniklého průsaku. Po vyjmutí prvního kroužku těsnění byly vidět první stopy korundu na povrchu těsnicího prostoru ucpávky viz Obrázek 43.

Po vyndání všech těsnicích kroužků byly stopy korundu vidět po celé délce těsnicího prostoru, jak ukazuje Obrázek 44. Stopy po korundu byly i na hřídeli míchadla uvnitř nádoby, vidno na Obrázek 45, což dokazuje, že se korund k ucpávce mícháním opravdu dostal.

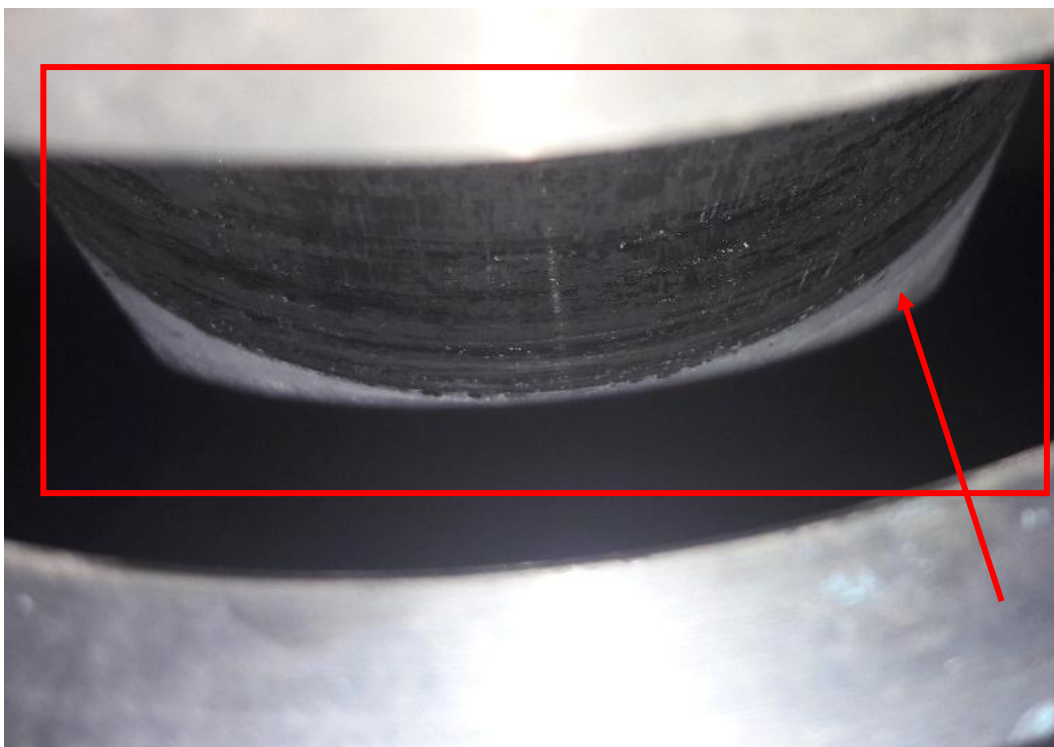
Především na prvních třech kroužcích ucpávky bylo zjevné opotřebení, viz Obrázek 47, a také bylo vidět přítomné částičky korundového prášku. Na prvním kroužku bylo dále vidět velké otláčení od víka ucpávky a také jakoby „zapečený“ korund, viz Obrázek 46. Způsobené vydření mohlo tedy vzniknout příliš velkou přitlačnou silou na víku ucpávky, a tím vzniklou velkou třecí silou mezi těsněním a hřídelí. Fakt, že se tak stalo právě na prvních třech kroužcích, mohlo mít za následek nerovnoměrné rozložení napětí v těsnicích kroužcích. Důkazem toho může být viditelně menší vydření a stlačení v pořadí třetího provazce na Obrázek 48.



Obrázek 43: Stopy korundu pod prvním kroužkem těsnění



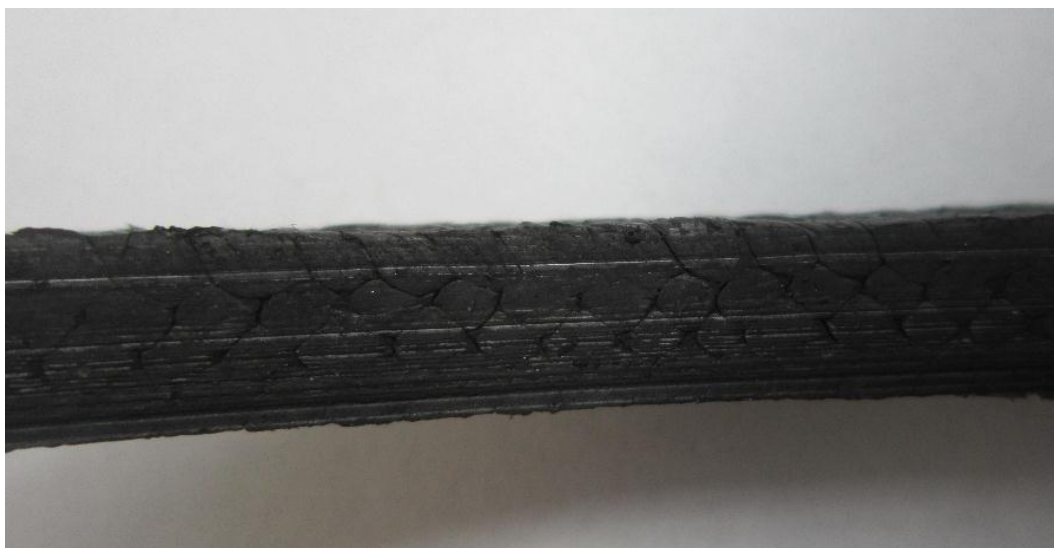
Obrázek 44: Stopy korundu v těsnicím prostoru ucpávky



Obrázek 45: Stopy korundu na hřídeli míchadla



Obrázek 46: Otláčení prvního kroužku a zapečený korund



Obrázek 47: Viditelné vydření těsnicího provazce



Obrázek 48: Menší vydření na třetím provazci

3.5 Definování závěrů a doporučení pro další postupování

Z měření vyplynulo hned několik výsledků a bylo zjištěno pár nedostatků, které se v zařízení vyskytují, ať už se jedná o konstrukční řešení, či chyby při montáži. Každopádně se z nich dají vyvodit jasné závěry.

Konstrukce stlačované ucpávky je dobře provedená. Chybu vidím spíše v uspořádání těsnicího prostoru ucpávky. Pro těsnění bylo použito osm těsnicích kroužků, avšak jak je napsáno v kapitole 1.1, nejvhodnější výška ucpávky je 5 nebo 7 kroužků, jelikož s vyšším počtem kroužků se těsnicí schopnost nezvyšuje, ale spíš naopak. Při použití právě 5 či 7 kroužků dochází také k nejlepšímu rozložení axiálního a radiálního napětí a k nízkému tření bez ztráty těsnosti. Použití většího počtu kroužků těsnicí šňůry mohlo mít za následek velké otlačení prvního kroužku a jeho vysoké opotřebení, způsobené vysokým třením. Velké otlačení mohlo být také způsobeno velkou přitlačnou silou na víku ucpávky.

Na vině rychlého průsaku skrz stlačovanou ucpávku mohla být také nesprávná volba materiálu těsnicí šňůry, ale vzhledem ke specifikacím těsnění, které udává výrobce, bych tuto variantu nezvažoval. Chybu bych spíše hledal v neodborné montáži, nebo špatně zvoleném abrazivním médiu do vsádky.

Mezi nedostatky celého zařízení řadím špatnou funkci termočlátku, který má za úkol měřit teplotu vsádky. Tato chyba byla odhalena po instalaci druhého termočlátku, měřícího stejnou teplotu. Dalším nedostatkem je přetlakový ventil, který se po prvním odpuštění tlaku zanesl částkami korundu. Kuželka ventilu nemohla plně dosednout na sedlo, a tím vznikla netěsnost při tlaku okolo 3,1 bar. Tím pádem docházelo k problémům s udržením pracovních podmínek.

Pro další měření bych doporučil zkusit jiné uspořádání ucpávky. Tím mám na mysli snížení výšky ucpávky na doporučených 5 až 7 kroužků těsnění. Nižší výšky ucpávky se dá dosáhnout bez zásahů do její konstrukce, a to použitím výplňových kroužků. Po této úpravě by se měla změnit také přitlačná síla na víku ucpávky.

Dále bych při nové konfiguraci vyzkoušel kromě použitého materiálu ucpávkové šňůry materiál jiný. Nový materiál by měl být vhodný pro stejné teplotní a tlakové rozmezí, jako materiál testovaný a měl by být vhodný pro těsnění abrazivních látek. V neposlední řadě bych ucpávku nechal namontovat odbornou obsluhou.

Termočlánek, který byl v zařízení instalován, by bylo vhodné nově překalibrovat. Co se týče přetlakového ventilu, zkusil bych změnit jeho polohu vůči nádobě, popřípadě přistoupit k jinému konstrukčnímu řešení, aby nadále nedocházelo k jeho zanášení.

Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat rešerši zaměřenou na konstrukční uspořádání těsnících systémů pro utěsňování hřídelů tlakových nádob zpracovávajících abrazivní materiály a charakterizovat provozy zpracovávající tyto materiály. Dále bylo úkolem zprovoznění laboratorní jednotky, provedení základních ověřovacích experimentů její funkčnosti a na závěr provedení základního experimentu vlivu provozních podmínek na životnost stlačované ucpávky.

Z rešerše měly být nabrány poznatky, které by byly použity v praktické části. Bohužel všechny poznatky nemohly být aplikovány z důvodů pozdního dodání zařízení, a také kvůli problémům při základním ověřovacím experimentu. Problémem bylo například generování příliš vysokého tlaku v nádobě a povolení pojistného ventilu. Důvodem bylo nejspíš ohřátí plynu nad hladinou vody. Experiment vlivu provozních podmínek na životnost ucpávky byl proveden pouze jednou s provazcem TEMAPACK 4210, vyrobeným z grafitu – teflonové příze a v rozích zesíleným aramidovými vlákny. Tento materiál se při testovaných podmínkách příliš neosvědčil, což mohlo být způsobeno například nesprávně zvoleným uspořádáním ucpávky nebo jinými okolnostmi, jak je popsáno v předchozí kapitole 3.5. V této kapitole jsou také shrnuta doporučení pro další postupování, která by mohla kladně ovlivnit průběh dalších zkoušek.

Seznam použitých zdrojů

- [1]. ROZKYDÁLEK, Jiří, Karel URBÁNEK a Miroslav ŠPLÍCHAL. Ucpávky v chemickém průmyslu. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2]. Použití nových těsnicích prvků - plochá ucpávková těsnění. Praha: ČVUT Praha, 1997.
- [3]. Google Patents [online]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US6382633B1/en?q=US6382633B1>
- [4]. Google Patents [online]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US6834862B2/en?q=US6834862B2>
- [5]. Utěšňování stlačovanými ucpávkami. Praha: ČVUT Praha, 1995.
- [6]. Těsnění DIMER - průmyslové těsnicí prvky - těsnění na vše... . [online]. Copyright ©2014 Dimer, spol. s r. o. [cit. 16.08.2018]. Dostupné z: https://www.dimer.cz/tesneni/files/5072/cz/3-Dynamicke_ucpavky.pdf
- [7]. MÍSENÍ ZRNITÝCH LÁTEK [online]. [cit. 2018-08-15]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz15_rv.pdf
- [8]. Google Patents [online]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US4878677A/en?q=US4878677A>
- [9]. Google Patents [online]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US4765631A/en?q=US4765631A>
- [10]. Google Patents [online]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US2486939A/en?q=US2486939A>
- [11]. Pletené ucpávky | Gambit Lubawka Sp. z o.o.. Gambit Lubawka Sp. z o.o. [online]. Dostupné z: <http://www.gambitgl.pl/cz/produkty/pletene-ucpavky.html>
- [12]. Slurry / Abrasive Packings - Palmetto. Home - Palmetto [online]. Copyright ©2017 Palmetto, LLC All rights reserved [cit. 13.08.2018]. Dostupné z: <https://palmettopackings.com/packing-products/slurry-abrasive-packings/>

- [13]. Abrasive Service Polyimide Packings | John Crane Packing. John Crane | Mechanical Seals, Seal Support Systems, Filtration Systems, Couplings, Packing and Expert Services for Global Process Industries. [online]. Dostupné z: <https://www.johncrane.com/products/packing/1345-1349-1349hc>
- [14]. Ucpávkové šňůry Temapack | Products of | Temac, a.s.. Temac, a.s. | A leading Central European manufacturer and distributor industrial gaskets and sealings [online]. Copyright © Noesis s.r.o. [cit. 14.08.2018]. Dostupné z: <https://www.temac.cz/produkt.aspx?pid=55>
- [15]. Voda. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Voda>
- [16]. Měření příkonu míchadla při míchání suspenzí - návod [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u218/pedagog/predmety/3rocnik/tem/power-sus/psunavod.htm>
- [17]. Míchání v kapalném prostředí [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp10.pdf
- [18]. CFD tutorial - Mixing tank concept using sliding mesh method | Fluent Ansys. Youtube [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hw4uPk37utU&t=495s>