

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Měření hydraulických parametrů na  
olejové trati s dýzou**

Measurement of Hydraulic Parameters on  
Oil Line with Nozzle

Student: Lukáš Pastrňák

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2019

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Pastrňák**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Měření hydraulických parametrů na olejové trati s dýzou**  
**Measurement of Hydraulic Parameters on Oil Line with Nozzle**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teorii ke kavitaci a obsahu vzduchu v oleji.
2. Popište zařízení pro měření ztrát při proudění dýzou na olejové trati.
3. Stanovte metodiku měření a zpracování potřebných fyzikálních veličin.
4. Proveďte měření na daném experimentu a zpracujte výsledky.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] BRDIČKA, Miroslav, SAMEK, Ladislav, SOPKO, Bruno. *Mechanika kontinua*. Vyd. 4. Praha: Academia, 2011. ISBN 978-80-200-2039-0.
- [3] MATYÁŠ, Vladislav. *Základy teorie chyb měření*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [4] JENČÍK, Josef. *Technická měření*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1981.
- [5] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969.
- [6] OLŠIAK, Róbert, MLKVIK, Marek. *Experimental research of cavitation in channels of very small scales*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní d. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 56(3), 131-138. ISSN 1210-0471.
- [7] SAMEK, Ladislav, TARABA, Oldřich, BRDIČKA, Miroslav. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00206-0.
- [9] KOPÁČEK, Jaroslav. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1996.
- [10] BRENNEN, Christopher Earls. *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-509409-3.
- [11] ČSN 01 6910 *Úprava dokumentů zpracovaných textovými procesory*. 7/2014.
- [12] ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. 3/2011.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Pastrňák, L. Měření hydraulických parametrů na olejové trati s dýzou: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2019. Vedoucí práce: Jablonská, J.

V bakalářské práci je popsáno zkoumání podmínek vzniku kavitace na olejové trati s dýzou a jeho vlivu na ostatní hydraulické parametry jako jsou tlak, průtok a teplota. V teoretické části se zabývám teorií kavitace, obsahem rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v oleji a režimem proudění. V praktické části jsou určeny vztahy závislosti fyzikálních vlastností oleje na teplotě a následně vyhodnocení experimentu.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

Pastrňák, L. Measurement of Hydraulic Parameters on Oil Line with Nozzle: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2019. Head of Bachelor Thesis: Jablonská, J.

The bachelor thesis describes the investigation of cavitation conditions on the oil line with nozzle and its influence on other hydraulic parameters such as pressure, flow and temperature. The theoretical part deals with the theory of cavitation, the content of dissolved and undissolved air in the oil and flow regime. In the practical part, the relations of the physical properties of oil on temperature are determined and the experiment is evaluated.



## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona. Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Lukáš Pastrňák

Adresa trvalého pobytu autora práce: V Kolonii 578, Václavovice

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



podpis studenta

### **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Janě Jablonské, Ph.D. za cenné rady při zpracování této bakalářské práce a za pomoc při praktické části a dále děkuji panu Arnoštovi Sitkovi za dohled a pomoc při praktické části.

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>ÚVOD .....</b>                               | <b>12</b> |
| <b>1 TEORIE KAVITACE .....</b>                  | <b>13</b> |
| 1.1 Kavitace .....                              | 13        |
| 1.2 Kavitační součinitel .....                  | 14        |
| 1.2.1 Kavitace v tryskách .....                 | 15        |
| 1.3 Metody diagnostiky kavitace .....           | 16        |
| <b>2 OBSAH VZDUCHU V MINERÁLNÍM OLEJI.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>3 PROUDĚNÍ.....</b>                          | <b>19</b> |
| 3.1 Reynoldsovo číslo.....                      | 21        |
| 3.2 Strouhalovo číslo .....                     | 22        |
| <b>4 VLASTNOSTI OLEJE.....</b>                  | <b>23</b> |
| 4.1 Hustota.....                                | 23        |
| 4.2 Viskozita .....                             | 25        |
| <b>5 OLEJOVÁ TRAŤ.....</b>                      | <b>27</b> |
| 5.1 Schéma.....                                 | 27        |
| 5.1.1 Popis prvků.....                          | 28        |
| 5.2 Použité senzory .....                       | 29        |
| 5.3 Olejová trať .....                          | 33        |
| <b>6 MĚŘENÍ.....</b>                            | <b>35</b> |
| 6.1 Postup měření .....                         | 35        |
| 6.2 Vyhodnocení měření.....                     | 36        |
| <b>7 ZÁZNAMY Z VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY.....</b> | <b>45</b> |
| <b>8 ZÁVĚR .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>          | <b>49</b> |



|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b> | <b>51</b> |
| <b>PŘÍLOHY.....</b>        | <b>52</b> |

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

| Symbol   | Jednotky                                  | Význam symbolu                                      |
|----------|---|---|
| $F_s$    | [N]                                       | Setrvačná síla                                      |
| $F_t$    | [N]                                       | Třecí síla  |
| $K$      | [1]                                       | Kavitační součinitel                                |
| $Q$      | [m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]       | Objemový průtok                                     |
| $R$      | [kg · m <sup>-4</sup> · s <sup>-1</sup> ] | Součinitel odporu laminárního proudění              |
| $Re$     | [1]                                       | Reynoldsovo číslo                                   |
| $S$      | [m <sup>2</sup> ]                         | Obsah   |
| $Sh$     | [1]                                       | Strouhalovo číslo                                   |
| $T$      | [K]                                       | Teplota   |
| $V_g$    | [m <sup>3</sup> ]                         | Geometrický objem                                   |
| $V_k$    | [m <sup>3</sup> ]                         | Objem kapaliny                                      |
| $V_{vr}$ | [m <sup>3</sup> ]                         | Objemové množství vzduchu v kapalině rozpuštěného   |
| $d$      | [m]                                       | Průměr  |
| $g$      | [m · s <sup>-2</sup> ]                    | Gravitační zrychlení                                |
| $h$      | [m]                                       | Tlaková výška                                       |
| $l$      | [m]                                       | Délka   |
| $m$      | [kg]                                      | Hmotnost  |
| $n$      | [1]                                       | Počet kavitačních bublin vzniklých za jednotku času |
| $p_1$    | [Pa]                                      | Relativní tlak před pojistným ventilem              |

|           |                                     |                             |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|
| $p_2$     | [Pa]                                | Relativní tlak před dýzou   |
| $p_3$     | [Pa]                                | Relativní tlak za dýzou     |
| $p_a$     | [Pa]                                | Konečný atmosférický tlak   |
| $p_o$     | [Pa]                                | Počáteční atmosférický tlak |
| $p_w$     | [Pa]                                | Tlak nasycených par         |
| $t$       | [°C]                                | Teplota                     |
| $t_t$     | [s]                                 | Čas                         |
| $v$       | [m · s <sup>-1</sup> ]              | Rychlost                    |
| $\zeta$   | [1]                                 | Ztrátový součinitel         |
| $\eta$    | [Pa · s]                            | Dynamická viskozita         |
| $\lambda$ | [1]                                 | Součinitel tření            |
| $\nu$     | [m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ] | Kinematická viskozita       |
| $\rho$    | [kg · m <sup>-3</sup> ]             | Hustota                     |
| $\tau$    | [Pa]                                | Smykové napětí              |

# ÚVOD

Kavitační jev je zkoumán již delší dobu. V hydraulice se považuje zejména za nežádoucí a nepřijatelný, jelikož způsobuje opotřebení materiálu. Velice rychle a snadno může zničit hydraulické prvky, zastavit výrobu a také znehodnotit pracovní médium.

V úvodu práce se zabývám teorií kavitace, zejména ve škrtkách prvcích. Dále popisují metody určení a vyhodnocení kavitačního jevu. Pro získání těchto poznatků, je nutno provést rozbor použitého média a určit jeho fyzikální vlastnosti v závislosti na teplotě. Dále je podstatné znát geometrii zkoumaného odporu, ve kterém má vzniknout kavitace, zvolit vhodné měřicí zařízení a senzory. Rovněž se v práci zabývám problematikou množství vzduchu v oleji.

V praktické části jsem provedl měření tlaku, průtoku a teploty na olejové trati s transparentní dýzou. Zvolil jsem 5 sérií měření v závislosti na teplotě, v každé sérii měním průtok. Změnou fyzikálních vlastností v závislosti na teplotě jsem dosáhl vhodnějších podmínek pro vznik kavitačního jevu. Pomocí vysokorychlostní kamery jsem snímal transparentní dýzu, abych mohl vyhodnotit, zda a případně kdy dojde ke kavitaci.

# 1 TEORIE KAVITACE

## 1.1 Kavítace

Kavitace je v technické praxi v rámci hydrauliky a dopravy kapalin problematickým a obvykle nežádoucím jevem. První zmínka o kavitaci v technické praxi pochází již z roku 1894 ve spojitosti s lodními šrouby při zkouškách anglického torpédoborce Daring [10].

Kavitací označujeme jev, při kterém vznikají a zanikají dutiny v kapalině. Působení těchto dutin na okolní materiál nazýváme kavitačním rozrušením nebo napadením. K tomuto jevu dochází při snížení tlaku kapaliny na tlak nasycených par daného média. Při tomto tlaku se kapalina začne odpařovat a vznikají kavitační bubliny naplněné párou odpařenou z kapaliny. Tyto bubliny jsou dále unášeny proudící kapalinou do oblasti vyššího tlaku, kde páry kondenzují a vznikají kavitační dutiny. Dutiny jsou naplněny okolní kapalinou, která do nich vniká vysokou rychlostí. Jakmile se dutiny zaplní, vzniká velký ráz, který působí negativně na materiál a také na kapalinu. Kavitační bublinky vyplňující část proudu kapaliny, tvoří tzv. kavitační oblast. Při poklesu tlaku na tlak nasycených par, vzniká počáteční kavítace, jedná se o neustálenou kavitační oblast, kde se projevují menší tlakové pulsace proudícího média, další snížení tlaku na vstupu vede ke zvětšení a ustálení kavitační oblasti. Kavitační oblast se popisuje především dle tvaru, například kapsovitá (kde je určitý prostor vyplněn kavitačními bublinami), nebo vláknová (kde je kavitačními bublinami tvořen sled v podobě vlákna). Kavitační oblast vznikající na obtékané ploše se často nazývá plošnou kavitací. [Kavitace J.Noskievič]

Dalším důvodem pro vznik kavitační oblasti může být odtržení proudu od obtékaného povrchu, kde je kavitační oblast kapsovitá, ale nestálá. Příčinou jejího vzniku je víření kapaliny mezi hlavním proudem a obtékaným povrchem, kde nestálost této oblasti vyjadřuje Strouhalovo číslo (3.12) [10].

Tlak nasycených par je závislý na teplotě proudícího média, například pro vodu teploty 20°C je tlak nasycených par 2367,8 Pa, kdežto pro olej o stejné teplotě je tento tlak 1 Pa [9].



Obr. 1.1 Poškození oběžného kola kavitací [3]

## 1.2 Kavitační součinitel

Předpokládá se, že kavitační tlak odpovídá tlaku nasycených par dané kapaliny, tento předpoklad je ovšem pouze přibližný. Kavitační součinitel je dán vztahem

$$K = \frac{2 \cdot (p_3 - p_w)}{\rho \cdot v^2} \quad (1.2)$$

Kde  $p_w$  je tlak nasycených par kapaliny,  $v$  je maximální rychlost kapaliny v nejužším průřezu,  $p_3$  je tlak za zkoumaným prvkem a  $\rho$  je hustota kapaliny při dané teplotě [11].

Kavitačním součinitelem pro počátek kavitace  $K_{poč}$  se označuje hodnota, při které vzniká první kavitační bublina. Poté pokud je hodnota  $K > K_{poč}$  nedochází k vzniku kavitace a naopak pokud je  $K < K_{poč}$  dochází ke kavitaci. Pokud při kavitaci dojde k omezení maximálního průtoku pak se hodnota  $K$  při tomto stavu nazývá kritický kavitační parametr  $K_{kr}$  [11].

### 1.2.1 Kavítace v tryskách

Nejjednodušším hydraulickým zařízením pro zkoumání hydrodynamických poměrů a vlivu teploty kapaliny na počátek vývinu kavitačního jevu je Venturiho trubice s kruhovým průřezem. Výhodou Venturiho trubice je možnost určení tlaku při počátku kavítace a tlaku uvnitř kavitační oblasti v různých stádiích vývinu kavítace. Jeden z hlavních parametrů, pomocí kterého lze určit počátek kavítace, je  $h_1$  tlaková výška na výstupním průřezu trubice, který lze vyjádřit vztahem [10]

$$h_1 = \frac{p_2 - p_w}{\rho \cdot g} \quad (1.3)$$

Kde  $p_2$  je absolutní tlak na vstupu do trubice,  $p_w$  je tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě,  $\rho$  je hustota kapaliny,  $g$  je gravitační zrychlení a  $h_1$  je obdobou geodetické sací výšky u čerpadel [10].

Experimentálně bylo zjištěno, že při vzniku kavítace dochází ke zvýšení hydraulických ztrát v trubici. Zkoušky při konstantní teplotě vody odhalily, že při vyšším tlaku na vstupu do trubice vzniká kavítace později a zvyšuje se maximální průtok před jejím vznikem. Při stálém tlaku na vstupu zvýšení teploty vody urychluje vznik kavítace a zmenšuje maximální průtok. Tohoto poznatku jsem využil i při experimentu, kdy pracovním médiem nebyla voda, ale olej, který protékal systémem s dýzou. Kavítace jsem dosáhl až po ohřátí oleje. Kavítaci v nejužším místě dýzy lze vyvolat zvyšováním průtoku, případně snížením tlaku [10].



### 1.3 Metody diagnostiky kavitace

Opatříme-li model průhlednými okénky, pak můžeme pozorovat vznik i rozsah kavitace. Jelikož jsou poznatky takto pozorované nepřesné, nemůžeme určit, zda se opravdu jedná o kavitaci, užívá se stroboskopického osvětlení části modelu, nebo se pracuje s vysokorychlostní kamerou [2].

Pokud se šíří kapalným prostředím tlaková vlna nebo ultrazvukové vlnění produkované kavitačním procesem pak nastává elastická deformace kapalného média a tudíž změna optických vlastností kapaliny. V laboratorních podmínkách lze využít Toeplerovy zákalové metody. Stav kavitace lze také posoudit pomocí laserů buďto užitím Tyndallova jevu, kde se zkoumá rozptyl světla na kavitačních bublinách v homogenním prostředí kapaliny, nebo metodou disperze světla na vznikajících a zanikajících kavitačních bublinách [2].

Kavitaci lze také měřit pomocí vibrací a zvuku nebo prozkoumáním opotřebovaných částí. Využití vibroakustické diagnostiky může být v technické praxi problém, jelikož je potřeba izolovat soustavu od okolních zdrojů hluku a vibrací, ovšem v laboratorních podmínkách je tato metoda využitelná [13].

Častěji se pro identifikaci a měření kavitace využívá vysokorychlostních kamer, jedná se o zařízení s vysokou snímkovací frekvencí, proto jsou z hlediska ukládání dat využívány zejména pro krátké děje. Při využití této metody je potřeba transparentního modelu a správného osvětlení. Pro následnou analýzu získáme digitální záznam, ze kterého lze určit mnoho dalších dat jako velikost bubliny, rychlost nárůstu a zániku bublin nebo rychlost pohybu bubliny a podobně.

## 2 OBSAH VZDUCHU V MINERÁLNÍM OLEJI

Vzduch se v minerálním oleji vyskytuje ve dvou formách a to buďto jako vzduch nerozpuštěný ve směsi s olejem nebo rozpuštěný. Nerozpuštěný vzduch v oleji nepříznivě ovlivňuje jeho stlačitelnost a tudíž tuhost systému [8].

Rozpuštěný vzduch představuje molekuly vzduchu, které jsou navázaný na molekuly oleje a rozpuštění vzduchu v oleji se řídí Henryho zákonem. Uvolňováním vzduchu z oleje dochází ke vzniku tzv. plynové kavitace [8].

$$V_{vr} = V_k \cdot k \cdot \frac{p_a}{p_o} \quad (2.1)$$

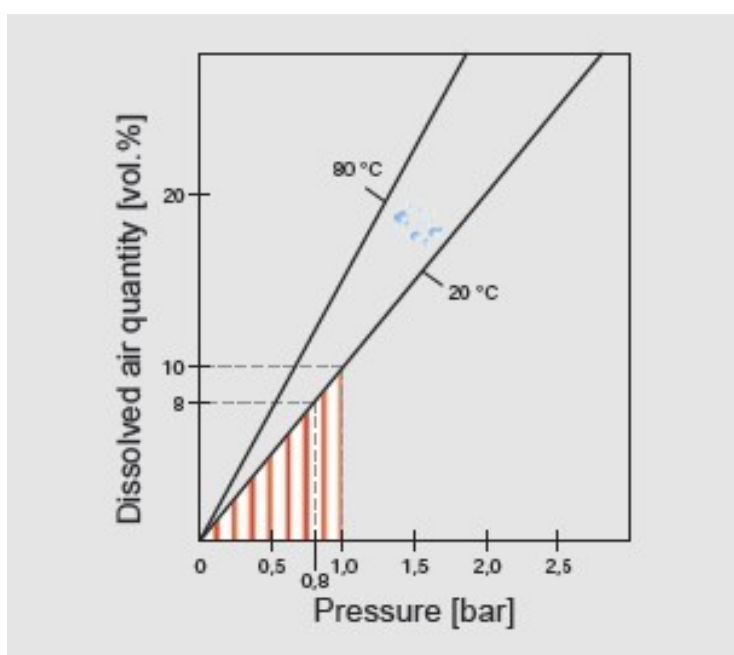
Kde  $V_{vr}$  je objemové množství vzduchu v oleji v rozpuštěném stavu,  $V_k$  je objemové množství oleje,  $p_a$  a  $p_o$  je konečný a počáteční (atmosférický) tlak,  $k$  je absorpční součinitel volí se  $k = 0,093$  až  $0,11$  [8].

Pro rozmezí teplot 20 až 80 °C lze závislost na teplotě zanedbat. Množství rozpuštěného vzduchu v oleji uvažujeme kolem 11% objemu minerálního oleje, kde tato hodnota lineárně roste se zvyšujícím se tlakem. Pokud se vlivem změny tlaku či teploty poruší rovnovážný stav, při kterém došlo k nasycení oleje vzduchem, dojde k uvolňování molekul vzduchu a následnému vzniku bublin, čímž vzroste množství nerozpuštěného vzduchu v oleji a vytvoří se směs oleje se vzduchem, nebo naopak dojde k rozpuštění dalšího vzduchu v oleji. Uvolňování vzduchu z oleje probíhá mnohem rychleji než jeho rozpouštění a tato doba závisí na třech hlavních parametrech [8]

- 1) viskozita oleje
- 2) povrch styku oleje s vzduchem
- 3) pohybový stav (klid, laminární nebo turbulentní proudění)

Doba, během které se uvolní, případně rozpustí, polovina objemu vzduchu v oleji se označuje jako  $t_p$  a pro náš případ je pro uvolňování vzduchu  $t_p = 3,6$  až  $7,6$  sekund a pro rozpuštění  $t_p = 6,1$  až  $10,2$  sekund [10].

Graf na obr. 2.1 popisuje vztah mezi tlakem, teplotou a množstvím rozpuštěného vzduchu v oleji, kde při  $20\text{ °C}$  a atmosférickém tlaku se v oleji nachází přibližně 10% rozpuštěného vzduchu. Při snížení tlaku na  $80\ 000\ \text{Pa}$  se zde nachází přibližně 8% rozpuštěného vzduchu [6].



Obr. 2.1 Rozpuštěný vzduch v oleji (v objemových procentech) v závislosti na tlaku (v barech) a teplotě (ve  $^{\circ}\text{C}$ ) [6]

Tato tabulka zobrazuje limitní hodnoty pro standartní nové oleje, kde v našem případě pro hydraulický olej VG 46 je mezní hodnota rozpuštěného vzduchu v oleji 10%.

| Limit values of typical standard for fresh oil   |    |    |    |     |       |        |
|--|----|----|----|-----|-------|--------|
| ISO VG/type                                      | 32 | 46 | 68 | 100 | (150) | (>320) |
| Turbine oil<br>DIN 51515, ISO 8068               | 5  | 5  | 6  | x   | x     | x      |
| Hydraulic fluid HLP/HM<br>DIN 51524/2, ISO 11158 | 5  | 10 | 13 | 21  | 32    | x      |

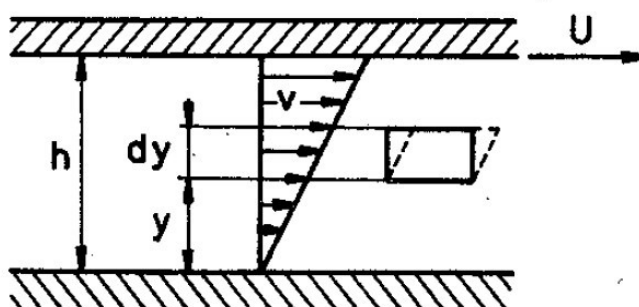
Obr. 2.2 Vzduchová kapacita pro nové oleje [6]

### 3 PROUDĚNÍ

Skutečné tekutiny jsou viskózní a stlačitelné, tudíž při jejich proudění dochází vlivem viskozity k vzájemnému působení sousedních částic třecí silou a na stěnách dochází k ulpívání částic. Vlivem tohoto tření dochází ke ztrátám energie, které se projeví poklesem tlaku, rychlosti nebo polohové energie kapaliny. Energie, která se spotřebovala k překonání tření, se uvolní jako teplo [12].

Pokud probíhá proudění mezi dvěma rovinnými deskami, kde se jedna pohybuje a druhá setrvává v klidu, pak mají částice, které ulpěly na povrchu, stejnou rychlost jako tyto desky. Tudíž na nepohybující se desce je rychlost částic nulová. Ostatní částice proudící mezi deskami mají rychlost rozloženou lineárně. Vlivem viskózního tření pohybující se částice strhávají do pohybu i okolní částice. Pro určení rychlosti částice ve vzdálenosti  $y$  od stojící desky využijeme vztahu (3.1) [12].

$$v = U \cdot \frac{y}{h} \quad (3.1)$$



Obr. 3.1 Proudění mezi dvěma deskami [12]

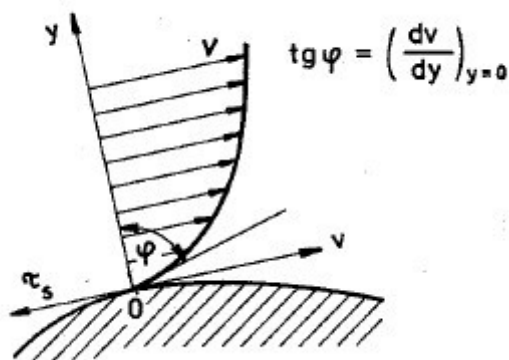
Smykové napětí  $\tau$  se určí dle Newtonova zákona viskozity z dynamické viskozity  $\eta$  a gradientu rychlosti  $\frac{dv}{dy}$

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.2)$$

Třecí síla  $F_t$ , kterou je nutno překonávat, a kterou působí kapalina na desku o ploše  $S$  je dána vztahem

$$F_t = S \cdot \tau \quad (3.3)$$

Obecně rychlost tekutiny určuje funkce  $v = v(y)$  a smykové napětí v libovolné vzdálenosti od stěny Newtonovým vztahem (3.2). Derivace gradientu rychlosti je rychlost úhlové deformace. Grafické znázornění  $v = v(y)$  je rychlostní profil viz obr. 3.2 [12].



Obr. 3.2 Rychlostní profil a tečné napětí [12]

Při takovém proudění se využívá předpokladu nekonečně tenkých vrstev kapaliny vzájemně po sobě klouzajících, takže se pohybují ve vrstvách nebo laminárně. Důkaz laminárního a turbulentního proudění provedl Reynolds, kdy do proudící kapaliny úzkou trubičkou přivedl obarvenou kapalinu. Při laminárním proudění zůstalo vlákno neporušeno, tudíž lze usoudit, že se pohyb děje ve vrstvách a částice se nepromíchají. Pokud rychlost přesáhne svou kritickou hodnotu, dojde k intenzivnímu promíchávání částic vlivem jejich turbulentních pohybů ve všech směrech, při tomto typu proudění částice neustále přecházejí z jedné vrstvy do druhé. Pro laminární proudění je rychlostní profil rotační paraboloid, kdežto u turbulentního proudění se přibližuje s rostoucí turbulencí obdélníku. Pro určení, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění popř. určení jejich přechodu se využívá Reynoldsova čísla [12].

### 3.1 Reynoldsovo číslo

U kritéria fyzikální podobnosti proudění jsou dominantní síly třecí a setrvačné.

$$\text{Síla třecí} \quad F_t = S \cdot \tau \approx \eta \cdot l \cdot v \quad (3.4)$$

$$\text{Síla setrvačná} \quad F_s = m \cdot a \approx \rho \cdot l^2 \cdot v^2 \quad (3.5)$$

Reynoldsovo číslo lze odvodit jako poměr síly setrvačné k síle třecí.

$$\frac{F_s}{F_t} = Re \quad (3.6)$$

$$\text{Po dosazení} \quad \frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\eta \cdot l \cdot v} = Re \quad (3.7)$$

$$\text{Po úpravě} \quad \frac{\rho \cdot l \cdot v}{\eta} = Re \quad (3.8)$$

Kde  $\nu$  je kinematická viskozita je definována

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.9)$$

$$\text{Pak} \quad \frac{l \cdot v}{\nu} = Re \quad (3.10)$$

Pomocí Reynoldsova čísla lze určit, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní.

Často se jako kritická hodnota mezi prouděními užívá  $Re = 2320$  [7].

## 3.2 Strouhalovo číslo

Strouhalovo číslo je podobně jako Reynoldsovo číslo podobnostní a bezrozměrné číslo, které je definováno pomocí sil setrvačných a impulsních (ze změny hybnosti). Výsledný vztah pro Strouhalovo číslo[12]

$$Sh = \frac{l}{v \cdot t} \quad (3.11)$$

Toto číslo může být pro periodické děje modifikováno a platí pro čerpadla.

V mém případě platí vztah (3.12).

$$Sh = \frac{n \cdot l}{v_1} \quad (3.12)$$

Kde  $v_1$  je přítoková rychlost,  $l$  je délka kavitační oblasti a  $n$  je počet kavitačních bublin vzniklých za jednotku času.[10]



## 4 VLASTNOSTI OLEJE

Jednou z nejdůležitějších a také nejznámějších vlastností olejů je viskozita a s ní úzce spojená hustota. Jelikož během experimentu dochází ke zdatelným změnám teploty a tyto veličiny jsou na teplotě závislé, je potřeba stanovit závislosti pro následné výpočty.

Pro experiment jsem použil hydraulický olej s označením RENOLIN VG 46 a pro tento olej bylo tedy potřeba stanovit jeho závislost hustoty a kinematické viskozity na teplotě. Bezpečnostní list daného oleje je k nalezení v příloze C.

### 4.1 Hustota

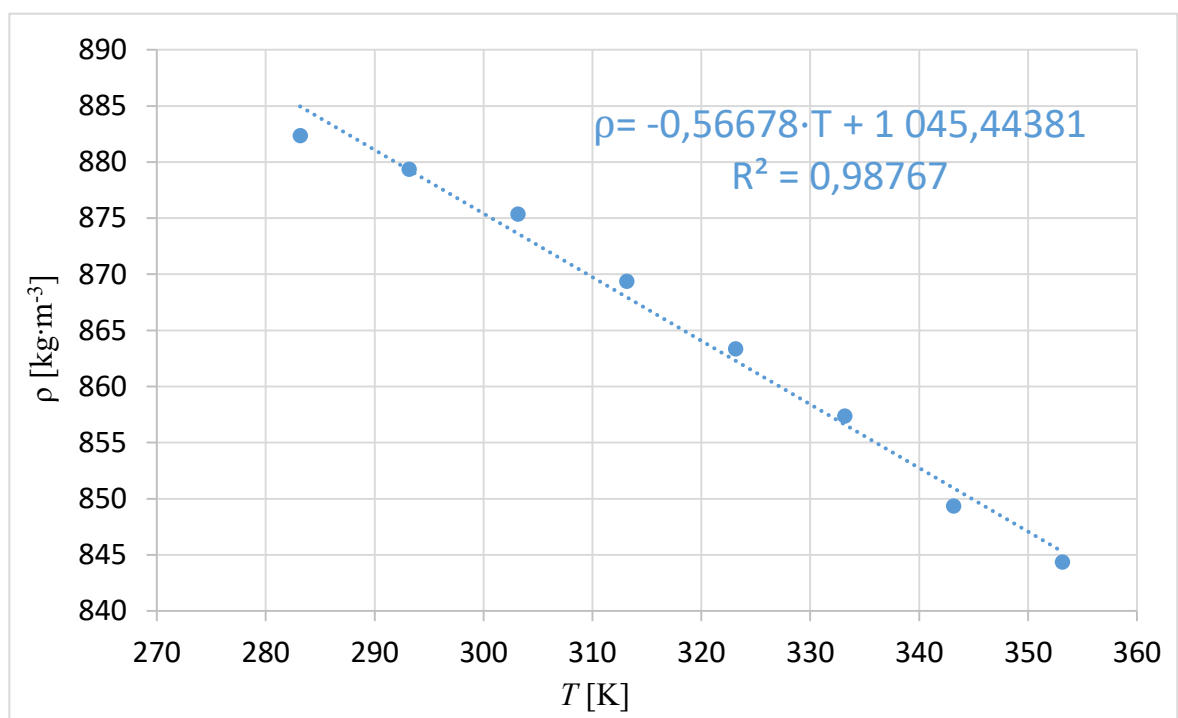
Aby mohla být určena závislost kinematické viskozity minerálního oleje na teplotě je nejprve potřeba určit jeho závislost hustoty na teplotě, tu lze stanovit pomocí Mohrových vážek viz obr. 4.1. Při této metodě je ponořeno tělísko na konci delšího ramene do měřeného vzorku a je nadlehčováno vztlakovou silou, poté se na delší rameno přidávají další závažíčka tak, aby dosáhlo rovnováhy. Hustota je poté dána polohou závažíček a jejich hmotností [4].



Obr. 4.1 Mohrovy vážky

| Teplota | Hmotnost | Hustota                 | Hustota                 |
|---------|----------|-------------------------|-------------------------|
| [K]     | [g]      | [g · cm <sup>-3</sup> ] | [kg · m <sup>-3</sup> ] |
| 283,15  | 8,81     | 0,8824                  | 882,376                 |
| 293,15  | 8,78     | 0,8794                  | 879,376                 |
| 303,15  | 8,74     | 0,8754                  | 875,375                 |
| 313,15  | 8,68     | 0,8694                  | 869,374                 |
| 323,15  | 8,62     | 0,8634                  | 863,372                 |
| 333,15  | 8,56     | 0,8574                  | 857,371                 |
| 343,15  | 8,48     | 0,8494                  | 849,370                 |
| 353,15  | 8,43     | 0,8444                  | 844,369                 |

Tab. 4.1 Hodnoty při měření hustoty



Obr. 4.2 Závislost hustoty na teplotě

Kde  $T$  je teplota a  $\rho$  je hustota.

Při měření hustoty se teplota pohybovala od 10 °C do 80 °C a získanou rovnicí využívám v následných výpočtech pro stanovení hustoty při změně teploty oleje.

## 4.2 Viskozita

Viskozita je pro skutečnou kapalinu dána poměrem mezi tečným napětím a změnou rychlosti, při zvýšení teploty viskozita klesá a míra závislosti viskozity na teplotě je dána viskozitním indexem. Viskozitu lze rozdělit na kinematickou a dynamickou [4].

Dynamická viskozita se značí  $\eta$  a vyplývá z Newtonova zákonu viskozity (3.2). Její závislost na teplotě lze vyjádřit následujícím vztahem

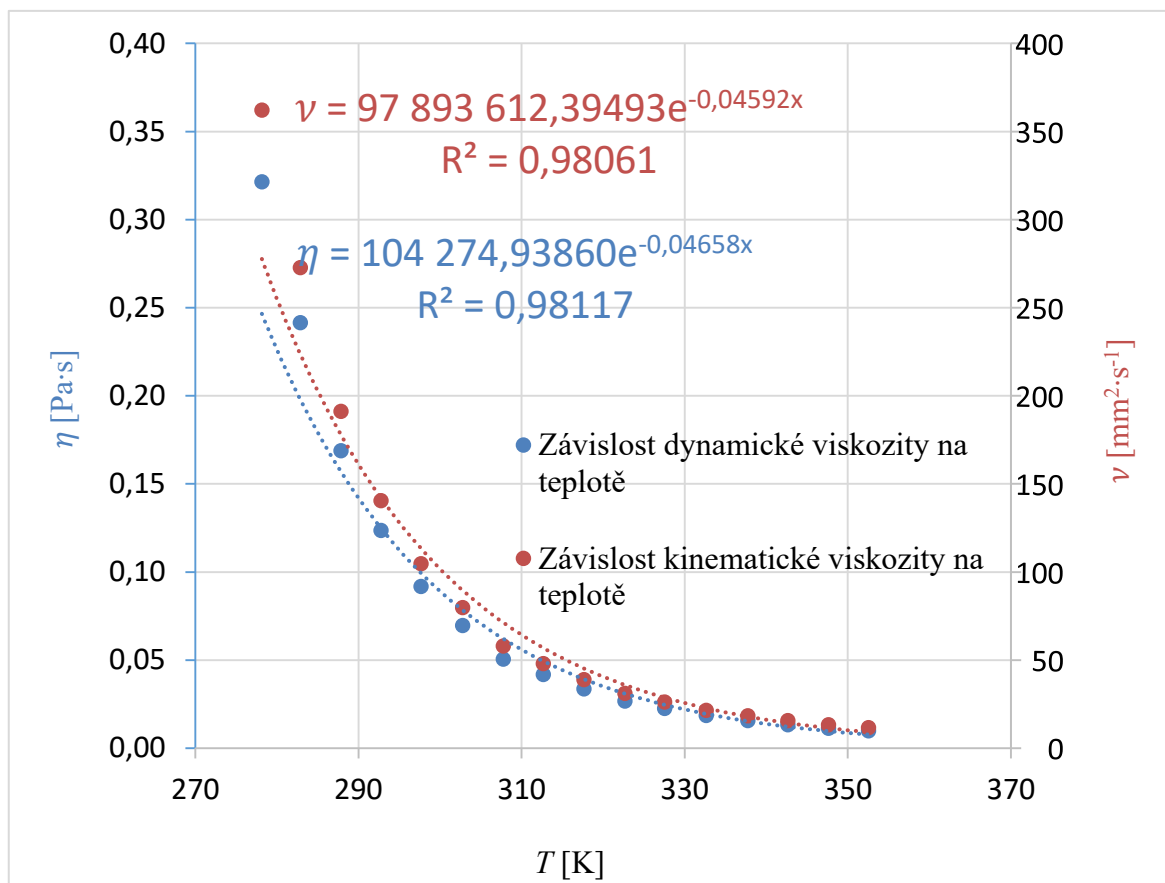
$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-a \cdot (T - T_0)} \quad (4.1)$$

Kde  $\eta_0$  je dynamická viskozita při teplotě  $T_0$ ,  $T$  je teplota oleje,  $a$  je parametr závislý na druhu kapaliny [4].

V praxi se častěji uvádí kinematická viskozita, která se značí  $\nu$ , udává se v jednotkách  $[m^2 \cdot s^{-1}]$  nebo  $[mm^2 \cdot s^{-1}]$  a výpočet vyplývá z dynamické viskozity a hustoty.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.2)$$

Pro zadanou úlohu byla dynamická viskozita oleje stanovena na rotačním viskozimetru Brookfield RVDV-II+Pro za pomoci vřetene SC24-21 a následně byla přepočtena na viskozitu kinematickou viz obr. 4.3.



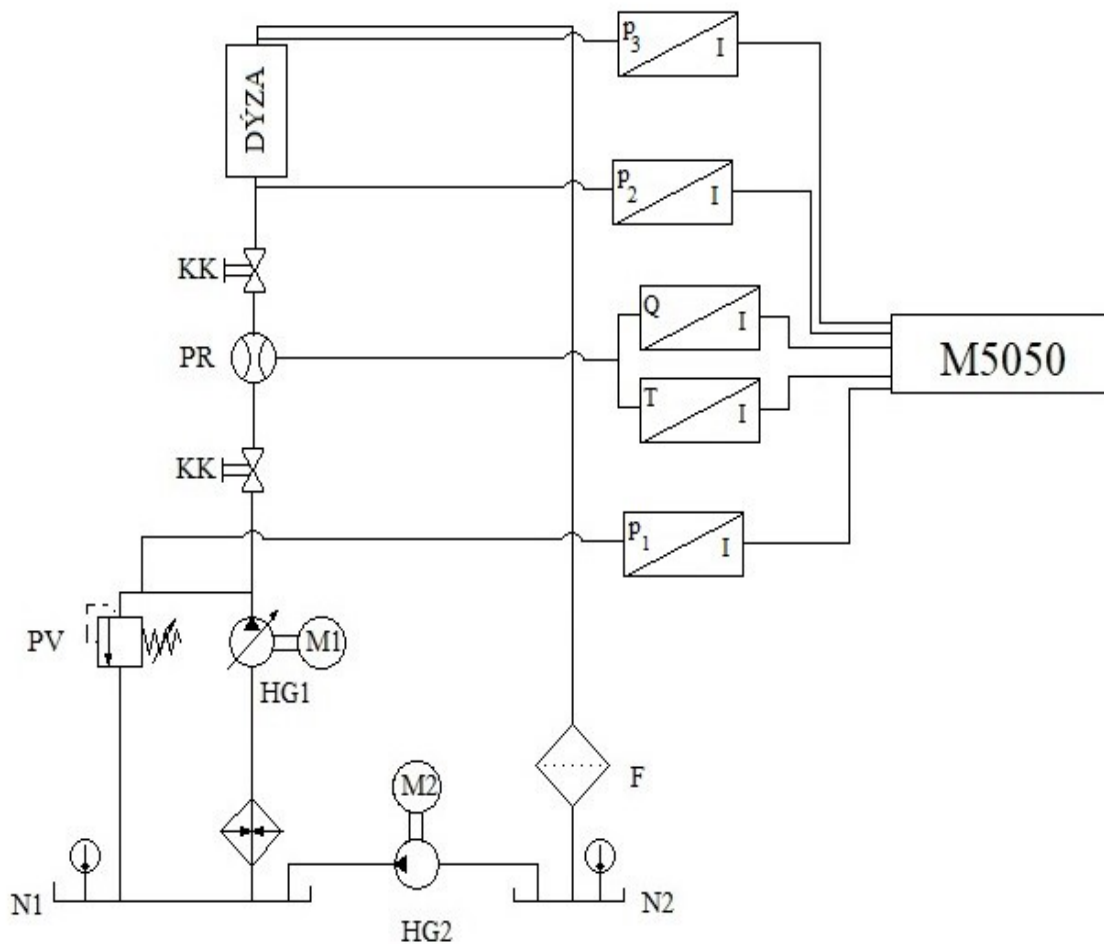
Obr. 4.3 Závislost dynamické a kinematické viskozity na teplotě

Kde  $T$  je teplota,  $\eta$  je dynamická viskozita a  $\nu$  je kinematická viskozita

Pomocí spojnice trendu v softwaru MS Excel lze snadno určit rovnice pro následný výpočet dynamické a kinematické viskozity v závislosti na teplotě. Nízká spolehlivost je způsobena velkými změnami pro nízké teploty oleje, ve kterých se během měření nepohybují, proto tyto rovnice lze pro následné výpočty použít.

## 5 OLEJOVÁ TRAŤ

### 5.1 Schéma



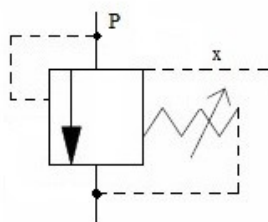
Obr. 5.1 Schéma olejové trati

Ohřivač zobrazený u nádrže N1 reprezentuje topné těleso uvnitř nádrže, pomocí kterého je olej mezi sériemi ohříván. Z nádrže N1 je kapalina přečerpávána regulačním hydrogenerátorem s naklápěcí deskou HG1, který je poháněn elektromotorem M1. Obvod je proti přetížení chráněn pojistným ventilem PV, před kterým měřím tlak  $p_1$ . Z nádrže je potrubí vedeno přes kostku, kde je permanentně otevřený kulový kohout, poté kapalina teče přes průtokoměr PR, kde měřím průtok a teplotu. Před dýzou

se nachází další kulový kohout, jehož uzavíráním jsem se pokusil změnit tlakové poměry v dýze pro dosažení kavitace, ale vliv byl zanedbatelný a tudíž jsem tyto hodnoty vyloučil z měření a pokračoval dále s plně otevřeným kohoutem. Před dýzou měřím tlak na vstupu do dýzy  $p_2$  a za dýzou tlak na výstupu z dýzy  $p_3$ . Z dýzy se kapalina dostává přes odpadní filtr do nádrže N2 a odtud se pomocí hydrogenerátoru HG2 poháněného elektromotorem M2 přečerpává zpět do nádrže N1 a dochází tím k promíchání kapaliny.

### 5.1.1 Popis prvků

Pojišťovací ventil PV je dvoustupňový tlakový ventil od firmy ATOS s katalogovým označením ARAM -20/350. Pro jeho regulaci se používá ruční kolo, kdy se zvyšování tlaku provádí otáčením ručního kola po směru hodinových ručiček [1].

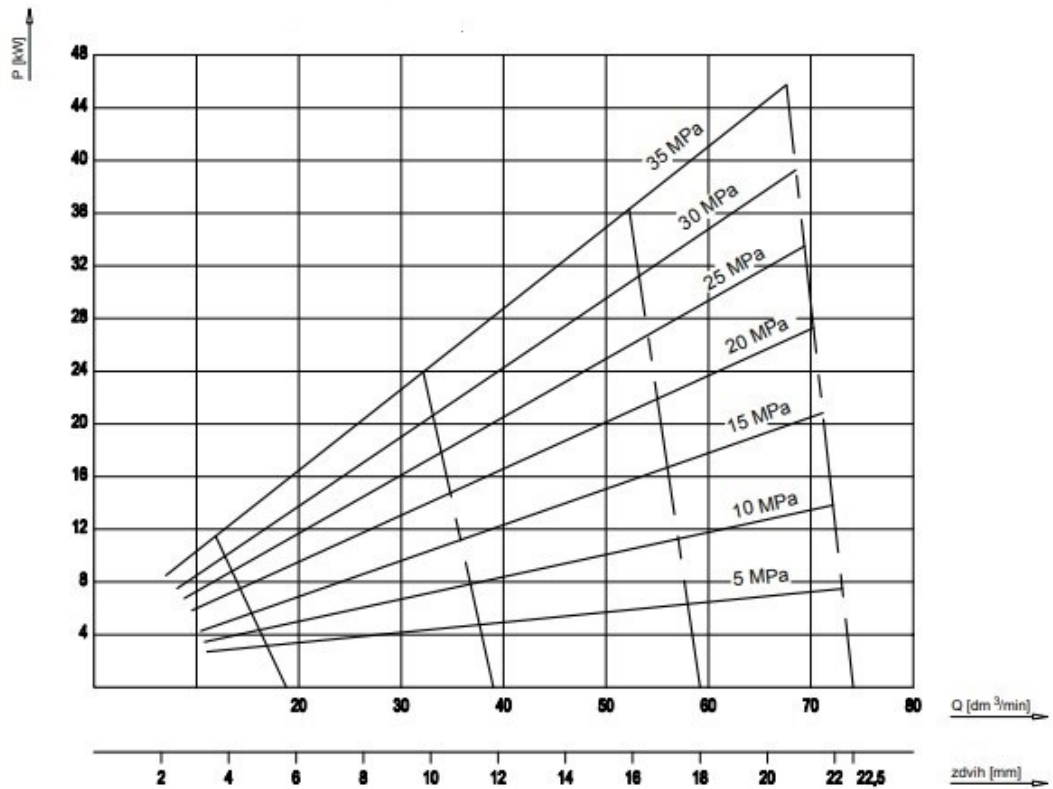


Obr. 5.2 Schématická značka dvoustupňového tlakového ventilu

Hydrogenerátor HG1 je axiální pístový regulační hydrogenerátor s naklápěcí deskou firmy Pelikán Vrchlabí s katalogovým označením PPAR 2-63. Naklápění desky je prováděno pomocí ručního kola, maximální geometrický objem hydrogenerátoru je  $V_g = 51,22 \text{ cm}^3$  a minimální geometrický objem je  $V_g = 0 \text{ cm}^3$  [14].

| Jmenovitý průtok      | Jmenovité otáčky | Celková účinnost při jmenovitých parametrech |
|-----------------------|------------------|--|
| $dm^3 \cdot min^{-1}$ | $min^{-1}$       | %  |
| 63                    | 1500             | 86   |

Tab. 5.1 Vybrané parametry hydrogenerátoru HGI [14]



Obr. 5.3 Charakteristika čerpadla z katalogového listu [14]

## 5.2 Použité senzory

Pro měření hydraulických parametrů jsem použil přístroj Hydrotechnik M5050 viz obr. 5.4. Jedná se o univerzální přístroj, který umožňuje měřit veličiny, jako jsou tlak, teplota, průtok a další, pomocí snímačů s elektrickým výstupem [5]. Naměřená data jsem zpracoval v programu MS Excel.



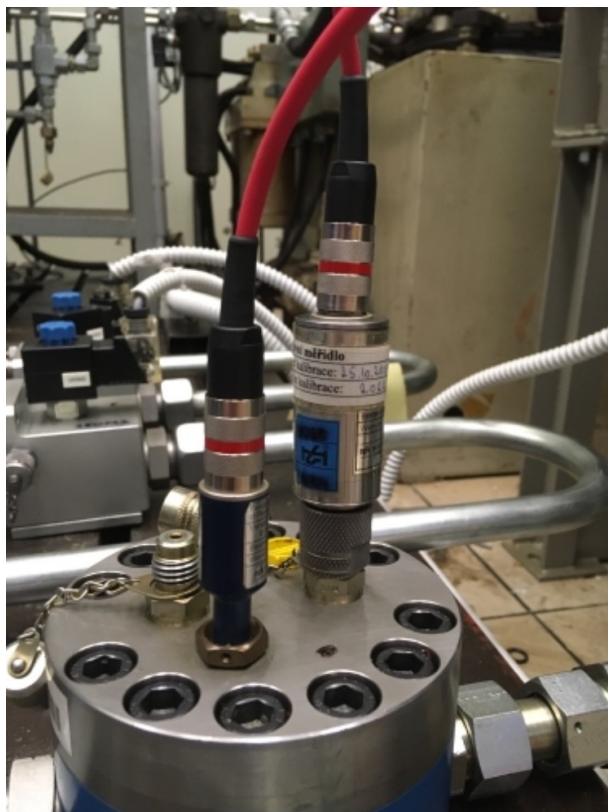


Obr. 5.4 Hydrotechnik M5050

Pro měření tlaku jsem použil snímače PR15 Hydrotechnik viz obr. 5.6, které jsem k obvodu připojil pomocí přípojek MINIMESS 1620, které umožňují připojení pod tlakem bez úniku kapaliny. Využil jsem snímače měřící relativní tlak s různým rozsahem. Snímač před pojistným ventilem  $p_1$  s rozsahem  $p_1 = (0 \div 60)$  bar, pro tlak před a za dýzou snímače s rozsahem  $p_{2,3} = (-1 \div 6)$  bar. Snímače mají výstupní signál  $I = (4 \div 20)$  mA a jejich přesnost je  $\pm 0,5\%$ . Odběry tlaku na dýze byly od sebe vzdáleny 400 mm [5].

Pro měření teploty jsem použil snímač Pt 100, který jsem k obvodu připojil přes MINIMESS přípojku, kterou je vybaven průtokoměr. Tento senzor má definovaný rozsah teplot  $t = (-50 \div 200)$  °C s přesností  $\pm 1\%$  a analogovým výstupem  $I = (4 \div 20)$  mA [5].

Průtok jsem měřil pomocí již zmíněného průtokoměru GFM-70 viz obr. 5.5, který měří průtok v rozsahu  $Q = (0,7 \div 70)$  dm<sup>3</sup> · min<sup>-1</sup> pro maximální tlak 40 MPa s přesností  $\pm 0,5\%$  [5].

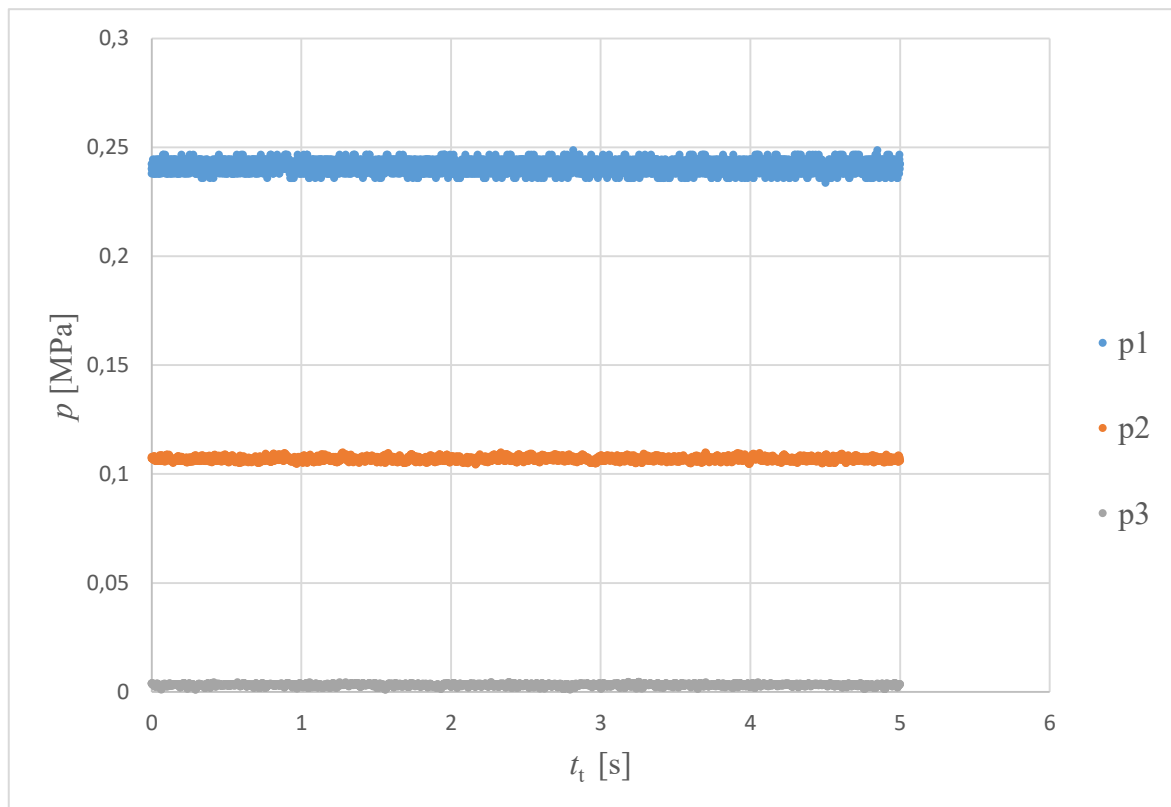


*Obr. 5.5 Průtokoměr GFM-70 s snímačem teploty*



*Obr. 5.6 Snímač tlaku PR15 Hydrotechnik*

Během měření jsem provedl 3 uložení pěti sekundových záznamů průběhu snímaných hodnot do přístroje Hydrotechnik M5050, abych zjistil, zda nedochází například k výraznějším odchylkám hodnot nebo tlakovým špičkám, které by mohly dýzu poškodit. Tyto záznamy jsem následně vyhodnotil.

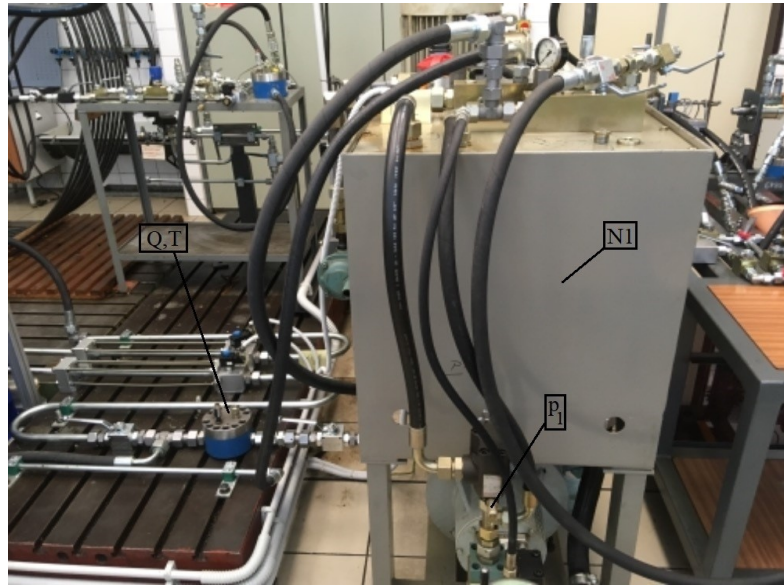


Obr. 5.7 Záznam snímání tlaků při posledním měření

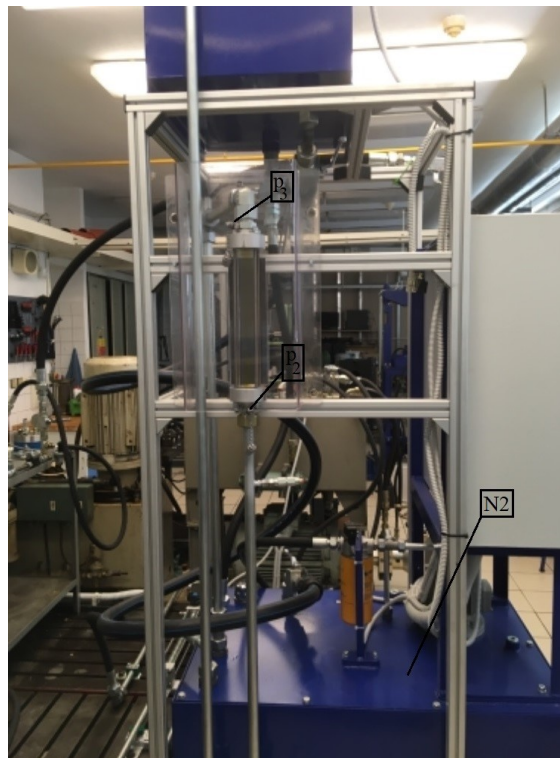
Kde  $p$  je hodnota tlaku a  $t_t$  je čas, po který je tento tlak zaznamenáván.

Z grafu obr. 5.7 je zřejmé, že na žádném z míst, kde jsem snímal tlak, nedocházelo k výraznějším tlakovým odchylkám, tudíž snímače pracují dle své předepsané přesnosti a v systému nedochází k rázu.

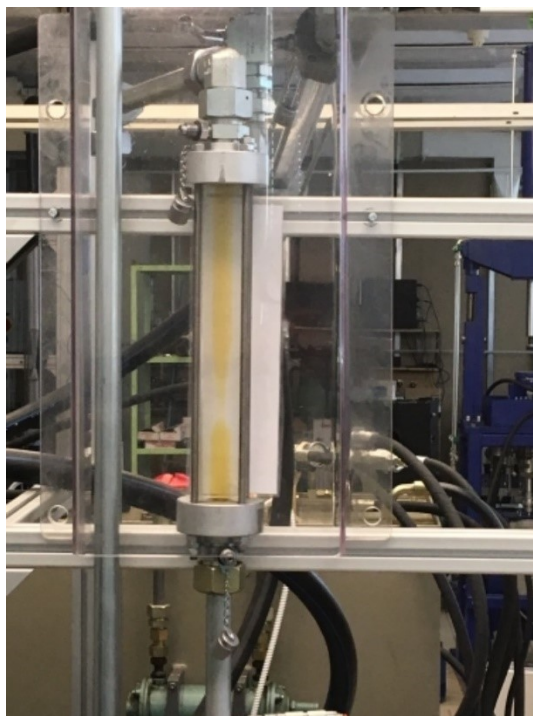
### 5.3 Olejová trať



*Obr. 5.8a Olejová trať*

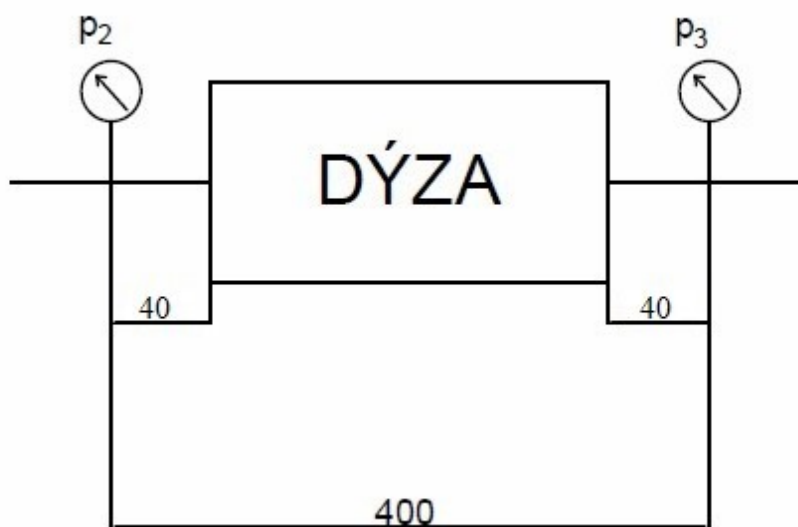


*Obr. 5.8b Olejová trať*



*Obr. 5.9 Pohled na dýzu*

Měřeným prvkem je kruhová dýza, známého tvaru s vstupním průměrem  $\varnothing 20$  mm a průměrem v nejužším místě  $\varnothing 6$  mm. Geometrie dýzy je zakreslena ve výkrese, který je k nahlédnutí v příloze A. Vzdálenost tlakových snímačů před dýzou a za dýzou je 400 mm viz obr. 5.10.



*Obr. 5.10 Schéma snímačů tlaků před a za dýzou (rozměry v mm)*

## 6 MĚŘENÍ

Provedl jsem 5 sérií měření, kdy jsem dle schématu viz obr. 5.1 měřil tlak před pojistným ventilem, před a za dýzou, průtok v obvodu a teplotu oleje, přičemž po každé sérii měření jsem provedl ohřátí oleje. Během měření došlo také k ohřevu oleje vlivem ztrát a časové náročnosti, kvůli ukládání dat z vysokorychlostní kamery pro vyhodnocení vzniku kavitace v obvodu. V každé sérii jsem provedl několik měření se změnou průtoku. Veškeré naměřené hodnoty jsou k nalezení v příloze C.

### 6.1 Postup měření

1. Nejdříve jsem k obvodu a k přístroji Hydrotechnik M5050 připojil senzory pro měření tlaků, průtoku a teploty, správně je nastavil a vynuloval.
2. Následně jsem připravil vysokorychlostní kameru a osvětlení dýzy.
3. Poté jsem spustil obvod a postupně nastavil hodnotu průtoku, aby nedošlo na dýze k rázu.
4. Dále jsem provedl několik měření, kdy jsem měnil průtok od minimálního k maximálnímu, několik záznamů z vysokorychlostní kamery a nechal jsem olej v nádrži, aby se ohřál pomocí topného tělíska za cirkulace oleje.
5. Opakoval jsem měření pro vyšší teplotu kapaliny, odečítal hodnoty z přístroje a ukládal záznam z vysokorychlostní kamery, pokud v dýze vznikaly kavitační bublinky.

## 6.2 Vyhodnocení měření

Tlaková ztráta  $\Delta p$  na dýze

$$\Delta p = p_2 - p_3 \quad (6.1)$$

Rychlost proudění  $v$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad (6.2)$$

Hustotu  $\rho$  a kinematickou viskozitu  $\nu$  určím dle získaných vztahů (obr. 4.2 a obr. 4.3).

Reynoldsovo číslo  $Re$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (6.3)$$

Kavitační součinitel  $K$ :

$$K = \frac{2 \cdot (p_{3abs} - p_w)}{\rho \cdot v^2} \quad (6.4)$$



| Relativní tlak před dýzou $p_2$ | Relativní tlak za dýzou $p_3$   | Tlakový spád $\Delta p$ | Průtok $Q$             | Teplota $t$            | Hustota $\rho$    |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| Pa                              | Pa                              | Pa                      | $m^3 \cdot s^{-1}$     | °C                     | $kg \cdot m^{-3}$ |
| 30200                           | 2700                            | 32900                   | 2,23E-04               | 25,8                   | 876,00            |
| 41900                           | -500                            | 42400                   | 2,64E-04               | 26                     | 875,89            |
| 56500                           | 2400                            | 54100                   | 3,06E-04               | 26,9                   | 875,38            |
| 72700                           | 5000                            | 67700                   | 3,50E-04               | 27,1                   | 875,26            |
| 90600                           | 7000                            | 83600                   | 4,02E-04               | 28,7                   | 874,36            |
| 112200                          | 9600                            | 102600                  | 4,59E-04               | 29,8                   | 873,73            |
| 132600                          | 12400                           | 120200                  | 4,95E-04               | 30                     | 873,62            |
| Kinematická viskozita $\nu$     | Rychlost v nejužším průřezu $v$ | $Re$ v nejužším průřezu | Kavitační parametr $K$ | Rychlost na vstupu $v$ | $Re$ na vstupu    |
| $m^2 \cdot s^{-1}$              | $m \cdot s^{-1}$                | -                       | -                      | $m \cdot s^{-1}$       | -                 |
| 1,07E-04                        | 7,887                           | 442,8                   | 3,608                  | 0,710                  | 132,8             |
| 1,06E-04                        | 9,337                           | 529,1                   | 2,632                  | 0,840                  | 158,7             |
| 1,02E-04                        | 10,828                          | 639,4                   | 2,015                  | 0,975                  | 191,8             |
| 1,01E-04                        | 12,385                          | 738,1                   | 1,579                  | 1,115                  | 221,4             |
| 9,35E-05                        | 14,200                          | 910,8                   | 1,225                  | 1,278                  | 273,2             |
| 8,89E-05                        | 16,216                          | 1094,0                  | 0,963                  | 1,459                  | 328,2             |
| 8,81E-05                        | 17,501                          | 1191,6                  | 0,848                  | 1,575                  | 357,5             |

Tab. 6.1 Naměřené a vypočtené hodnoty z první série měření

Příklady výpočtů jsem provedl pro první řádek tabulky viz tab. 6.1 a nezahrnují výpočet hustoty a viskozity, jelikož se jedná o dosazení do získaných rovnic.

Tlakový spád  $\Delta p$

$$\Delta p = p_2 - p_3 = 30200 - (-2700) = 32900 \text{ Pa}$$

Rychlost proudění v nejužším průřezu  $v$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 2,23 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,006^2} = 7,887 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění na vstupu  $v$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 2,23 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,02^2} = 0,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo v nejužším průřezu  $Re$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{7,887 \cdot 0,006}{1,07 \cdot 10^{-4}} = 442,3$$

Reynoldsovo číslo na vstupu  $Re$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{7,887 \cdot 0,02}{1,07 \cdot 10^{-4}} = 132,7$$

Kavitační parametr  $K$

$$K = \frac{2 \cdot (p_{3abs} - p_w)}{\rho \cdot v^2}$$

Nejprve je potřeba vypočítat absolutní tlak za dýzou  $p_{3abs}$ , tedy přičíst k relativnímu tlaku hodnotu atmosférického tlaku  $p_{atmosferický} = 100000 \text{ Pa}$

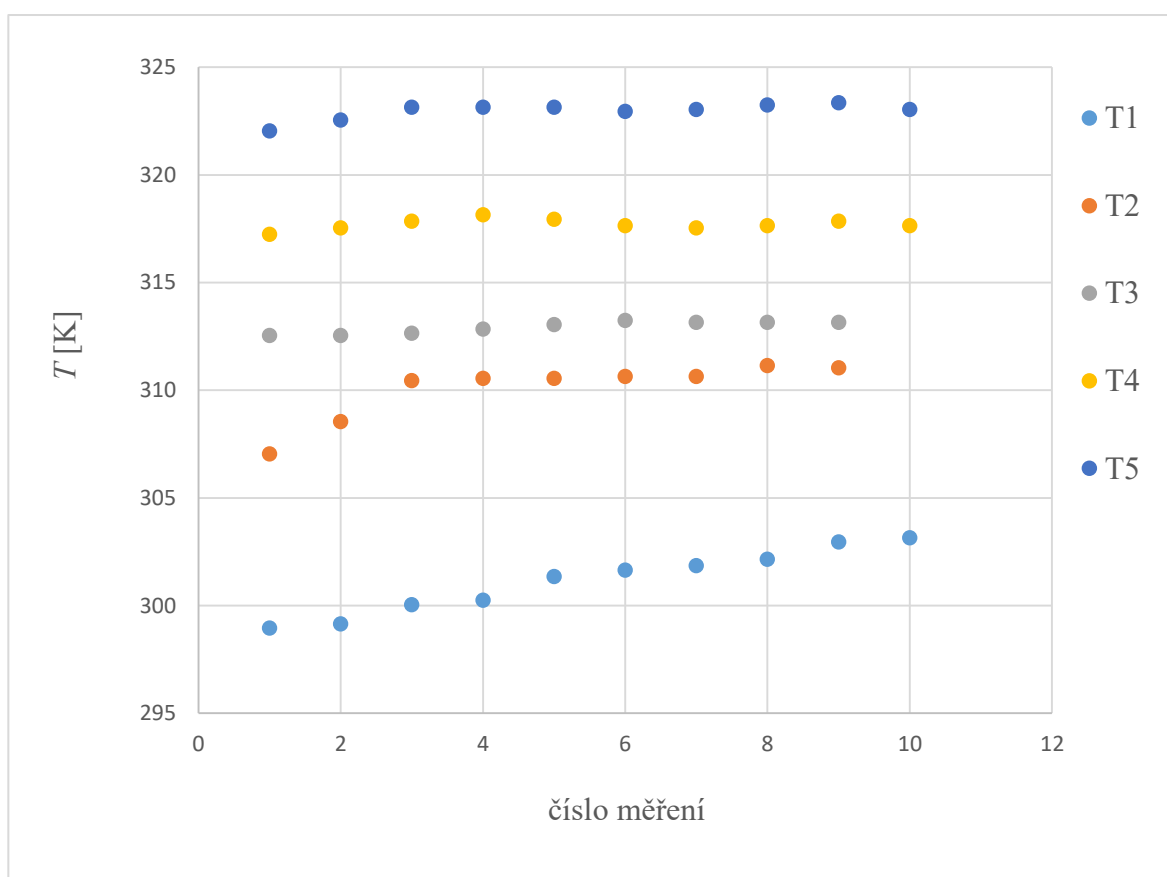
$$p_{3abs} = p_3 + p_{atmosferický} = -2700 + 100000 = 97300 \text{ Pa}$$

Tlak nasycených par  $p_w = 1 \text{ Pa}$

$$K = \frac{2 \cdot (97300 - 1)}{876 \cdot 7,887^2} = 3,57$$

Odchyly ve výpočtech od hodnot v tabulce jsou způsobeny zaokrouhlováním, kde hodnoty v tabulce jsou přesnější, jelikož byly vypočteny pomocí softwaru MS Excel. Naměřené a vypočtené hodnoty pro další série jsou v příloze C.

Během měření docházelo ke zvýšení teploty i během odečtu hodnot v rámci jedné série a to zejména kvůli již zmíněnému ukládání dat z vysokorychlostní kamery, které bylo časově náročné a došlo také k mírnému poklesu teploty, jelikož olej koloval mezi dvěma nádržemi a nebyl tedy dokonale promíchán. Měření jsem zahájil při teplotě oleje 25,8 °C, kdy nejvyšší dosažená teplota oleje byla 50,2 °C a další zahřívání jsem neuskutečnil, jelikož by mohlo dojít k výraznější degradaci oleje.

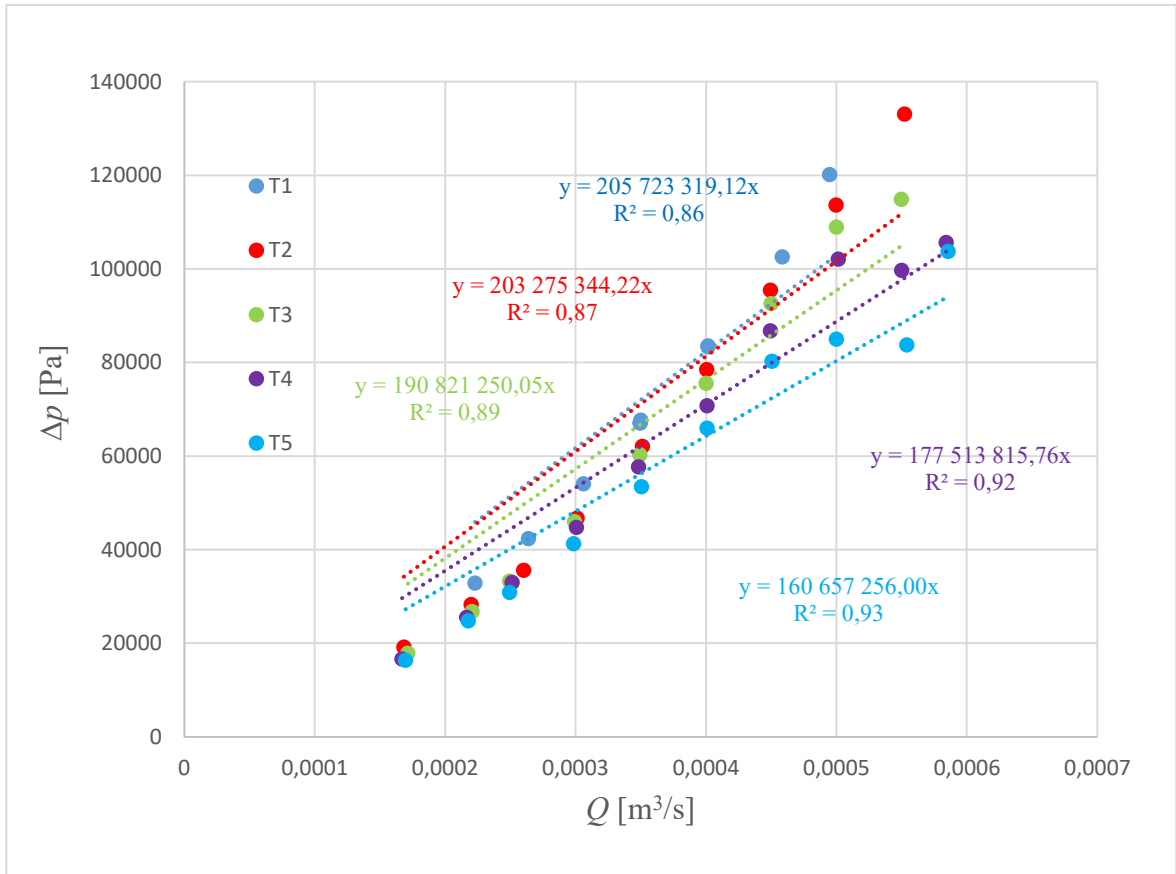


Obr. 6.1 Průběh teploty během měření

Kde  $T$  značí teplotu oleje.

Teplota T1 odpovídá teplotě oleje při první sérii měření, kdy ještě olej nebyl zahříván a teplota T5 odpovídá poslední sérii měření, která proběhla po posledním ohřevu oleje.

Z grafu obr. 6.2 lze vidět, že s rostoucím průtokem se tlakový spád zvětšuje téměř lineárně, při vyšší teplotě klesá tlaková ztráta a v určitých bodech lze pozorovat pokles



tlakové ztráty s rostoucím průtokem. Toto bylo způsobeno vznikem kavitace na dýze.

Obr. 6.2 Závislost tlakové ztráty na průtoku s regresními rovnicemi

Kde  $Q$  značí objemový průtok a  $\Delta p$  je tlakový spád na dýze.

Výpočet hodnoty Reynoldsova čísla na vstupu do dýzy je v rozmezí od  $Re = 132,8$  do  $Re = 1055,1$ , jedná se tedy o laminární proudění.

Pro tlakovou ztrátu platí

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (6.5)$$

Po dosazení z rovnice (6.2)

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4} \quad (6.6)$$

Ztrátový součinitel

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad (6.7)$$

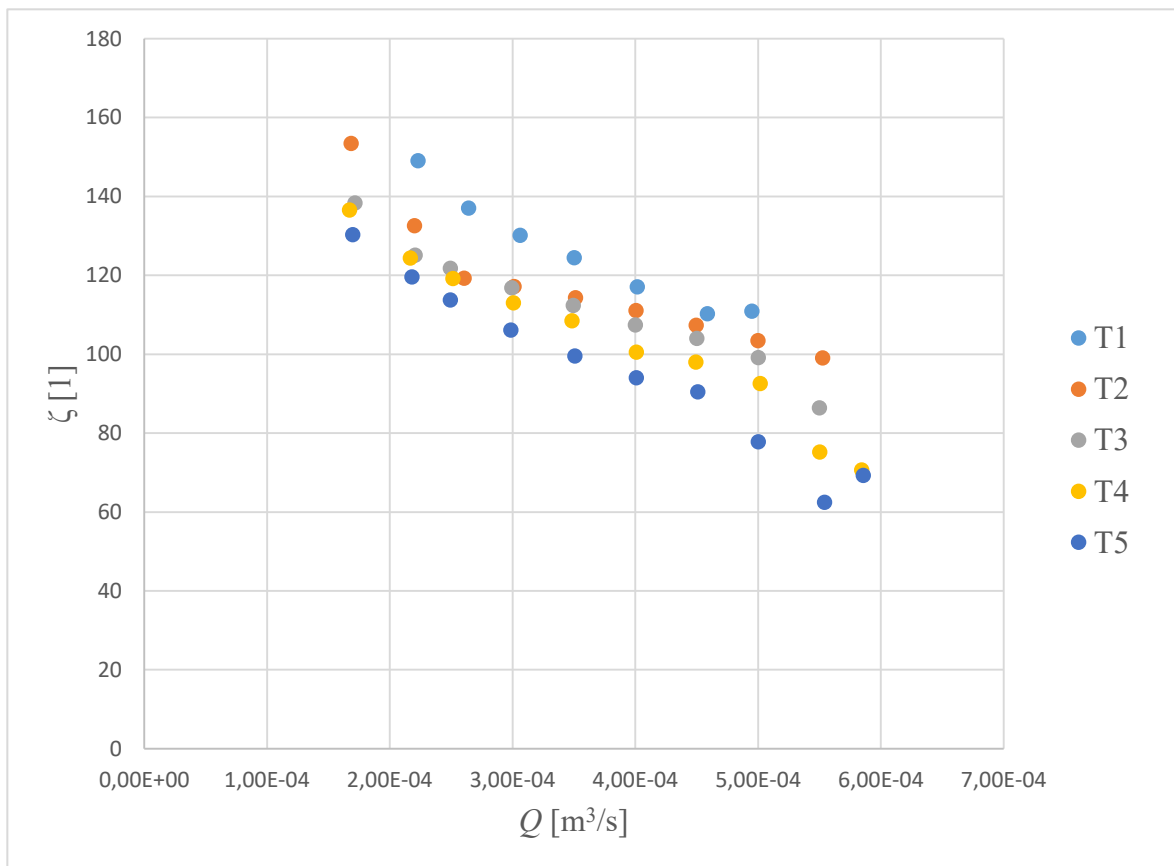
Po dosazení

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4} \quad (6.8)$$

Platí tedy rovnice pro laminární proudění  $\Delta p = R \cdot Q \rightarrow R = \frac{\Delta p}{Q}$ . Z tohoto vzorce můžeme odvodit jednotku odporu laminárního proudění  $R$ , která je  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$ . Avšak v dýze vlivem rozšíření může docházet k turbulencím a odtržení proudu.

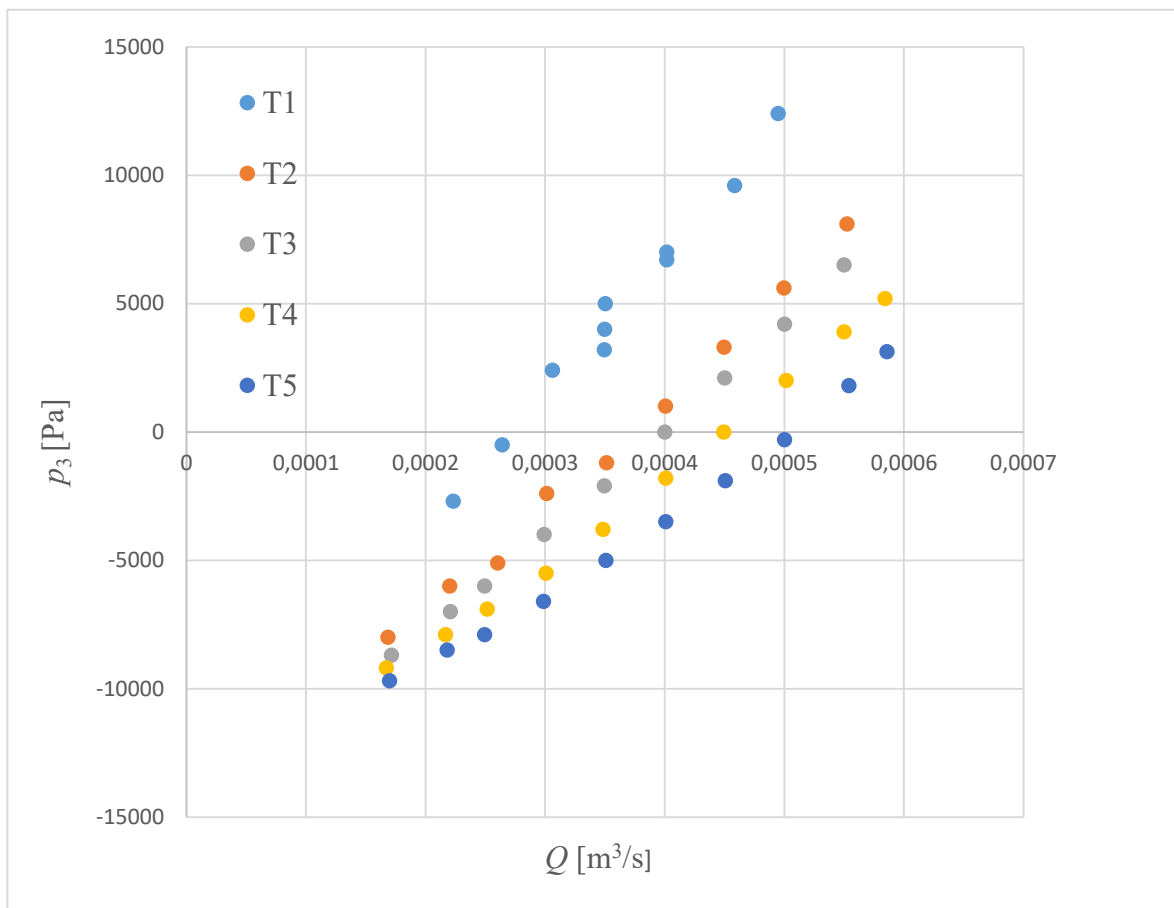
Pro vyhodnocení ztrátového součinitele na dýze vycházím z rovnice (6.5) a rychlosti na vstupu do dýzy.

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2} \quad (6.9)$$



Obr. 6.3 Průběh ztrátového součinitele na dýze

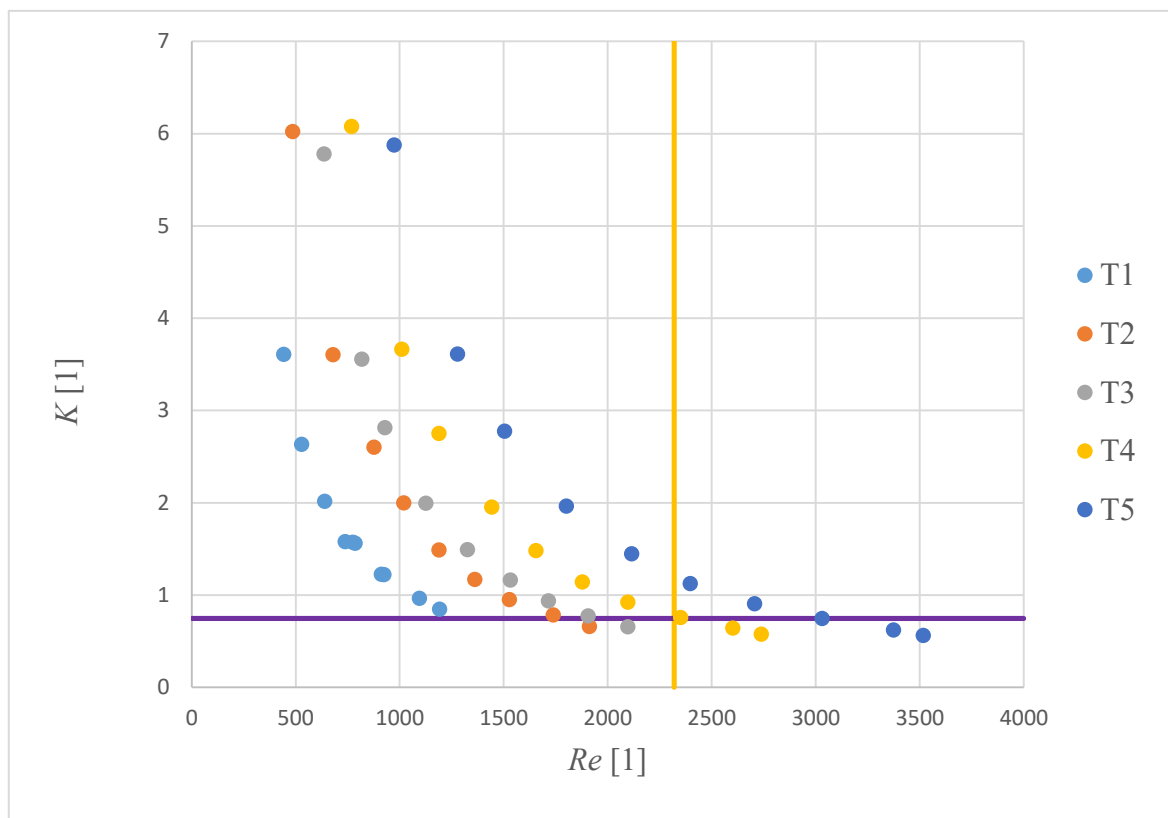
Kde  $\zeta$  je ztrátový součinitel dýzy a  $Q$  je objemový průtok.



Obr. 6.4 Průběh relativního tlaku za dýzou

Kde  $p_3$  je relativní tlak za dýzou a  $Q$  je objemový průtok.

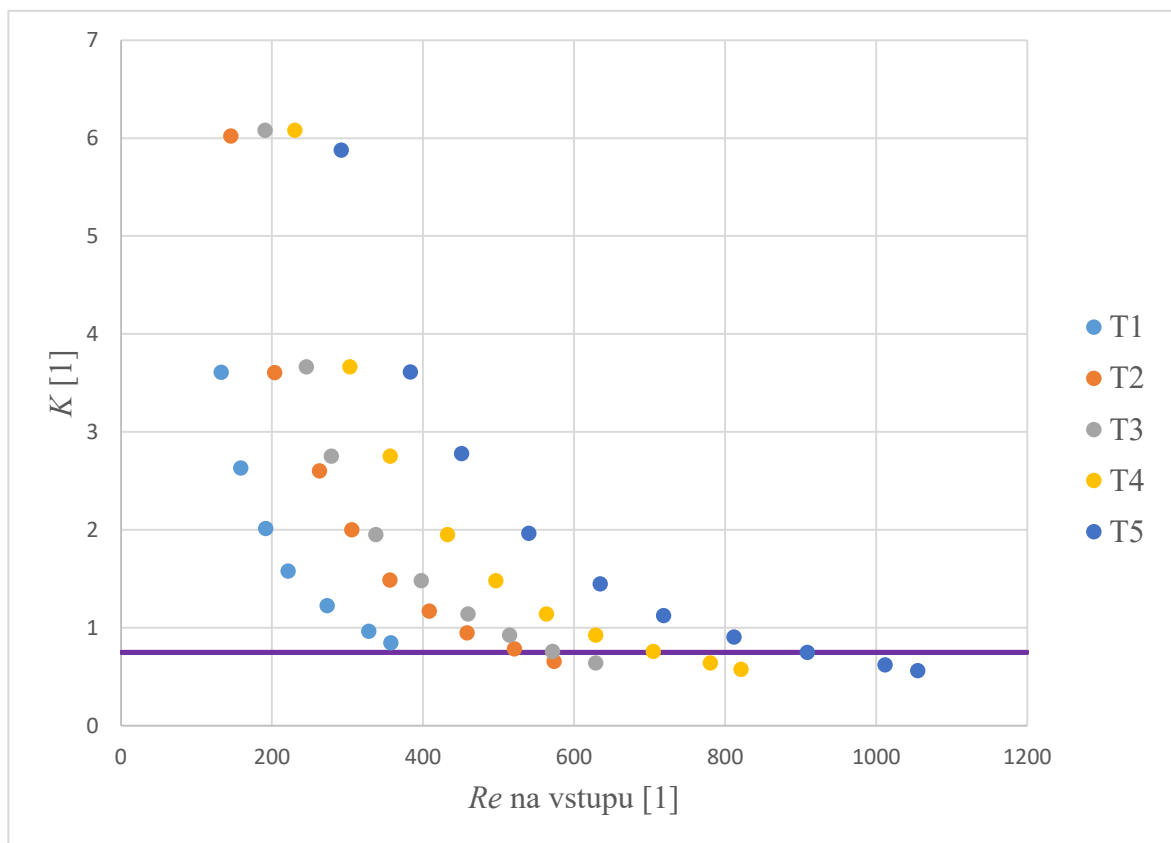
Z grafu obr. 6.4 lze pozorovat, že již při prvním měření byl za dýzou malý podtlak a první ohřátí oleje tento podtlak velmi zvýšilo. Díky změnám vlastností oleje v závislosti na teplotě, další ohřívání oleje dále mírně zvyšovalo podtlak. Toto je způsobeno závislostí viskozity daného oleje na teplotě viz obr. 4.3. Větší podtlak napomáhá vzniku kavitace.



Obr. 6.5 Závislost kavitačního parametru na Reynoldsově čísle v nejužším místě dýzy

Kde  $K$  je kavitační parametr a  $Re$  je Reynoldsovo číslo v nejužším průřezu dýzy.

S rostoucím Reynoldsovým číslem, v nejužším místě dýzy, klesá kavitační parametr, tudíž vznikají lepší podmínky pro vznik kavitace. První kavitace nastala při druhé sérii měření, kdy kavitační parametr měl hodnotu  $K = 0,658$ . Dalším měřením jsem zjistil, že nejnižší hodnota kavitačního parametru, kdy se na dýze vyskytoval kavitační jev, byla  $K = 0,747$ , tudíž tuto hodnotu uvažuji jako  $K_{poč}$  a v grafu ji znázorňuji fialovou vodorovnou čarou. Při dalších měření kdy hodnoty kavitačního parametru nabývají hodnot  $K < 0,747$  dochází rovněž ke kavitaci. Příčná čára zde znázorňuje hodnotu Reynoldsova čísla  $Re = 2320$ .



Obr. 6.6 Závislost kavitačního parametru na Reynoldsově čísle v nejužším místě

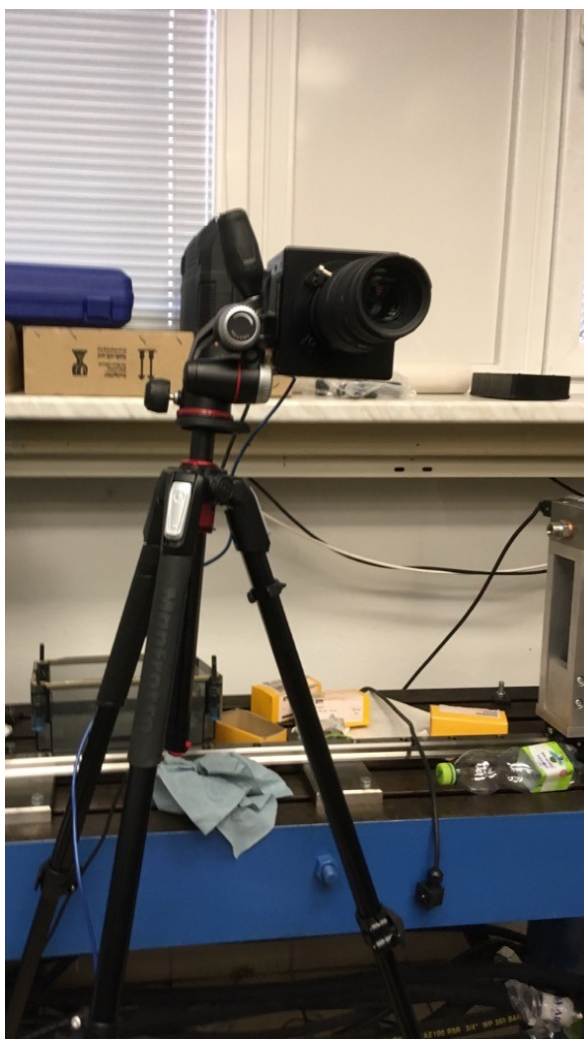
Kde  $K$  je kavitační parametr a  $Re$  je Reynoldsovo číslo na vstupu do dýzy.

Na vstupu do dýzy dochází pouze k laminárnímu proudění.

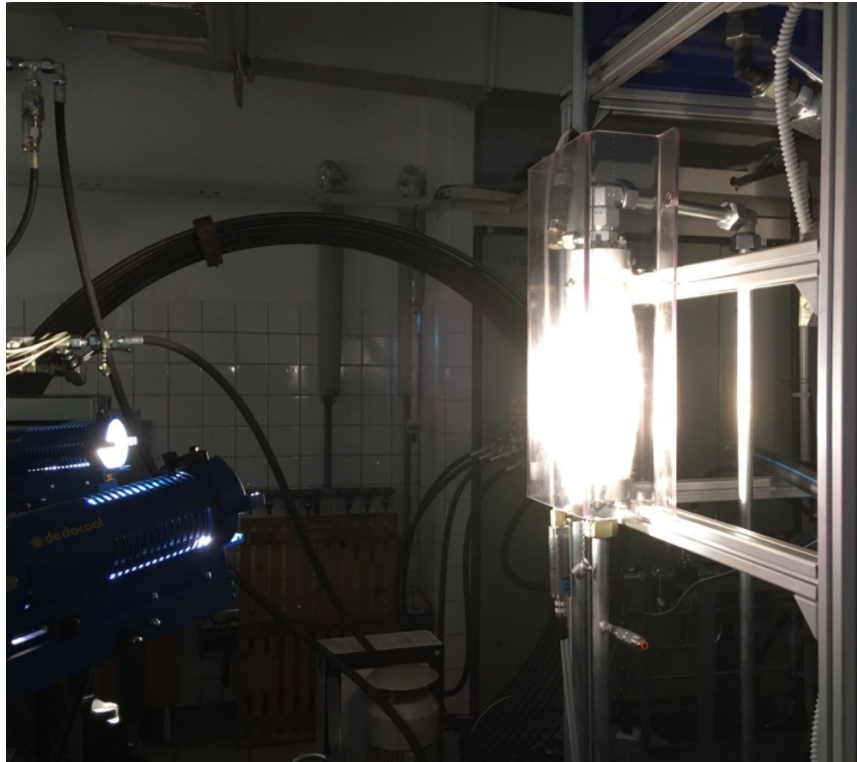


## 7 ZÁZNAMY Z VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

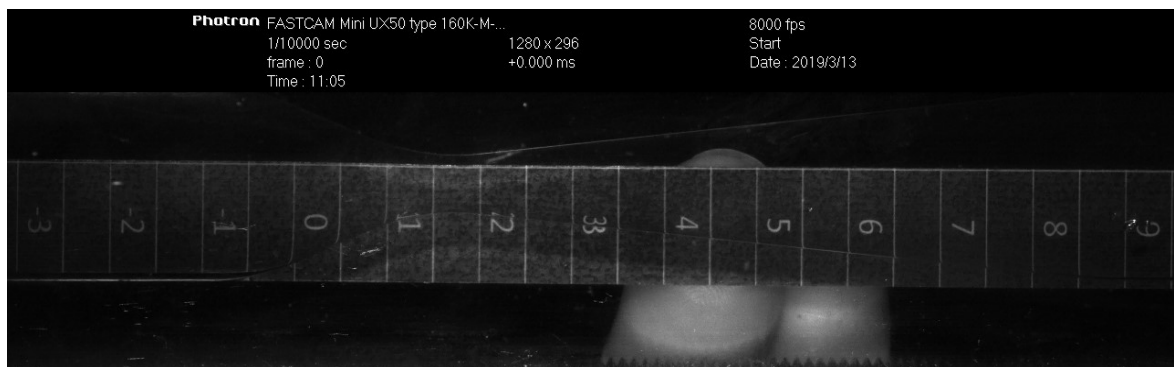
Pro snímání byla použita vysokorychlostní kamera Mini UX50 viz obr. 7.1, jelikož se jednalo o rychlý děj, snímal jsem 8000 snímků za sekundu s rozlišením 1280x296, což je velké množství dat pro ukládání a tudíž bylo potřeba po každém měření vybrat data pro uložení, kvůli časové úspory a snahy dosáhnout co nejmenší změny teploty oleje během série. Také bylo potřeba snímanou oblast osvětlit viz obr. 7.2 a stanovit měřítko snímané oblasti, které bylo 125 mm viz obr. 7.3. Katalogový list této kamery je k nalezení v příloze C.



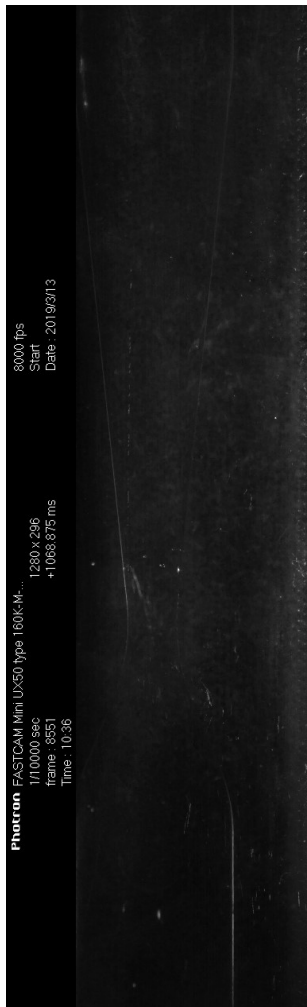
*Obr. 7.1 Ustavená vysokorychlostní kamera*



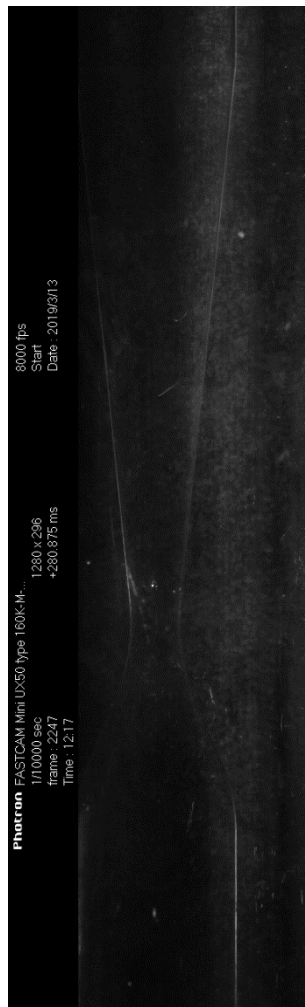
*Obr. 7.2 Osvětlení transparentní dýzy*



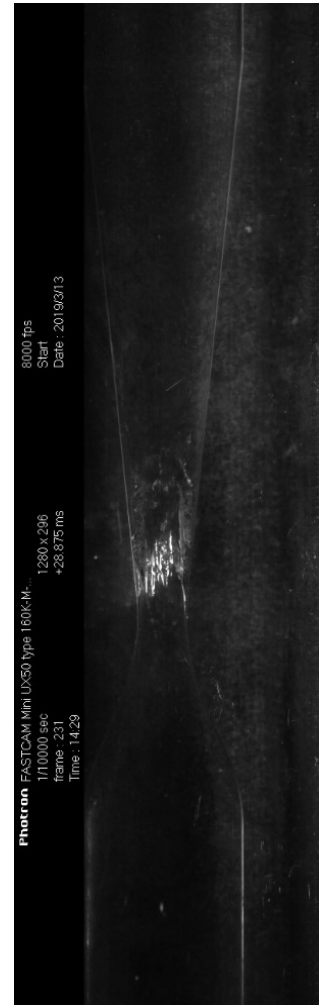
*Obr. 7.3 Měřítka snímané oblasti*



Obr. 7.4 a



Obr. 7.4 b



Obr. 7.4 c

Na obr. 7.4 a je snímek z vysokorychlostní kamery, který vznikl při první sérii měření, při objemovém průtoku  $Q = 21,01 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , teplotě oleje  $t = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativním tlaku před dýzou  $p_2 = 72700 \text{ Pa}$  a relativním tlaku za dýzou  $p_3 = 5000 \text{ Pa}$ . V tomto případě ke kavitaci nedocházelo. Druhý snímek obr. 7.4 b, vzniklý při poslední sérii měření při objemovém průtoku  $Q = 30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , teplotě oleje  $t = 50,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativním tlaku před dýzou  $p_2 = 84700 \text{ Pa}$  a relativním tlaku za dýzou  $p_3 = -300 \text{ Pa}$ , zobrazuje snímek, kdy kavitační parametr nabývá hodnoty  $K = 0,747$  a vznikají zde první kavitační bubliny. Na třetím snímku obr. 7.4 c pořízeném rovněž při poslední sérii měření, při objemovém průtoku  $Q = 35,14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , teplotě oleje  $t = 49,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativním tlaku před dýzou  $p_2 = 106900 \text{ Pa}$  a relativním tlaku za dýzou  $p_3 = 3120 \text{ Pa}$ , je možno vidět vyvinutý kavitační jev, zde kavitační parametr nabývá hodnoty  $K = 0,563$ .

## 8 ZÁVĚR

V této práci zkoumám hydraulické parametry při vzniku kavitace na transparentní dýze kruhového průřezu při proudění oleje, její následné vyhodnocení a jak kavitace tyto parametry ovlivňuje. Také zde řeším závislosti vlastností minerálního oleje na teplotě, režim proudění a práci s vysokorychlostní kamerou.

Při měření se podařilo dosáhnout kavitačního jevu pomocí ohřívání oleje, díky tomuto vznikl vyšší podtlak za dýzou viz obr. 6.4 a zlepšily se podmínky pro vznik tohoto jevu. Ohřev oleje nebyl vždy pro každou sérii stejný a to z důvodu již zmíněného ohřevu vlivem ztrát a časové náročnosti měření. Celé měření proběhlo v rozsahu teplot od minimální teploty 25,8 °C do teploty 50,2 °C. Došlo také k mírnému ochlazení oleje, během měření v sérii, jelikož byl přečerpáván mezi dvěma nádržemi a nebylo možné dosáhnout dokonalého promíchání.

Vyhodnocením jsem určil počáteční kavitační parametr  $K_{poc} = 0,747$  pomocí prozkoumání záznamu z vysokorychlostní kamery, kdy opravdu pro všechna měření, kde vyšel nižší kavitační parametr, vznikla na dýze kavitace. Kavitační parametr  $K_{poc}$  odpovídá danému minerálnímu oleji o teplotě 50,1 °C, kdy při průtoku 30 l/min byl relativní tlak před dýzou 84 700 Pa a relativní tlak za dýzou -300 Pa.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ATOS. Pressure relief valves type ARAM [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.atos.com/tables/english/C045.pdf>
- [2] BRDIČKA, Miroslav, SAMEK, Ladislav a TARABA, Oldřich. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [3] DRÁBKOVÁ, S. *Doprava kapalin* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2010 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>
- [4] HRUŽÍK, Lumír, BUREČEK, Adam. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST HYDRAULICKÝCH MECHANIZMŮ: Laboratorní úlohy* [online]. VŠB-TU Ostrava [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/studijni-opory/>
- [5] HRUŽÍK, Lumír. *MĚŘENÍ VELIČIN V HYDRAULICE s využitím přístroje Hydrotechnik*. VŠB-TU Ostrava, 2012.
- [6] HYDAC. *Fluid Control Contamination Handbook* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://www.hydac.fi/wp-content/uploads/2018/08/EN7603-9-04-18\\_Fluid-Control-Contamination-Handbook-web.pdf](https://www.hydac.fi/wp-content/uploads/2018/08/EN7603-9-04-18_Fluid-Control-Contamination-Handbook-web.pdf)
- [7] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2002 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>
- [8] KOPÁČEK, J. Vzduch v minerálním oleji a jeho měření. *Strojírenství* 36, 1986
- [9] LI, Wenguang. *Modeling Viscous Oil Cavitating Flow in a Centrifugal Pump* [online]. *Journal of Fluids Engineering*, 2015 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/281548124\\_Modeling\\_Viscous\\_Oil\\_Cavitating\\_Flow\\_in\\_a\\_Centrifugal\\_Pump](https://www.researchgate.net/publication/281548124_Modeling_Viscous_Oil_Cavitating_Flow_in_a_Centrifugal_Pump)
- [10] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: ACADEMIA, 1969.
- [11] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990.
- [12] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.

- [13] PARISH, Jeff. *Controlling cavitation* [online]. Valve MAGAZINE, 2009 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.proquip.com/images/proquip/PDFs/Controlling%20Cavitation.pdf>
- [14] PELIKÁN VRCHLABÍ. *Axiální pístové hydrogenerátory* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.pelikan-z.cz/images/pdf/gar-2.pdf>
- [15] PUCZOK, Petr. *Dynamické chování proudění v potrubí s olejem* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2017 [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117563/PUC0009\\_FS\\_N2301\\_2302T043\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117563/PUC0009_FS_N2301_2302T043_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## SEZNAM PŘÍLOH

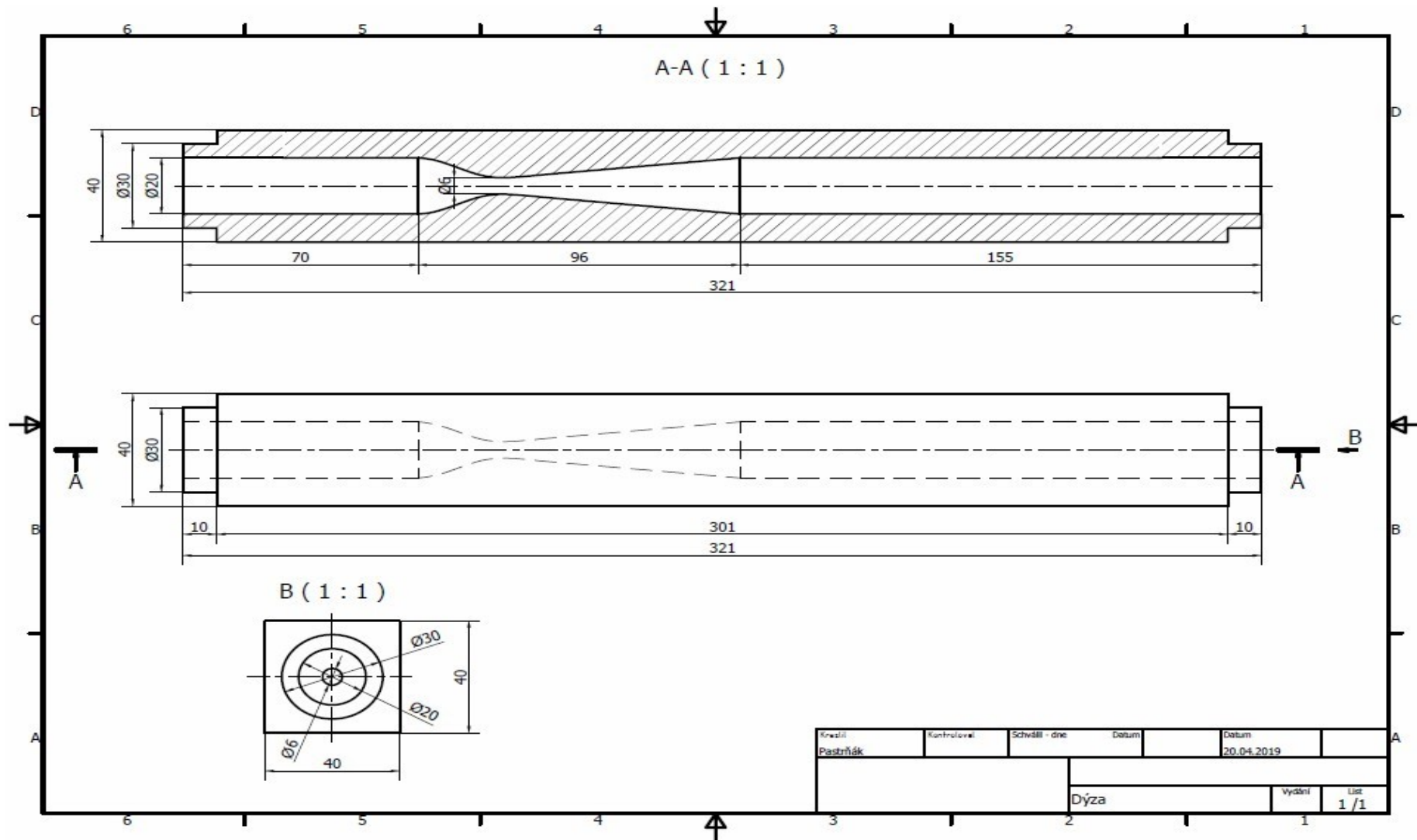
**Příloha A** – Geometrie měřeného prvku

**Příloha B** – Vývin a zánik kavitační bubliny.

**Příloha C** – Datový nosič DVD

# PŘÍLOHY

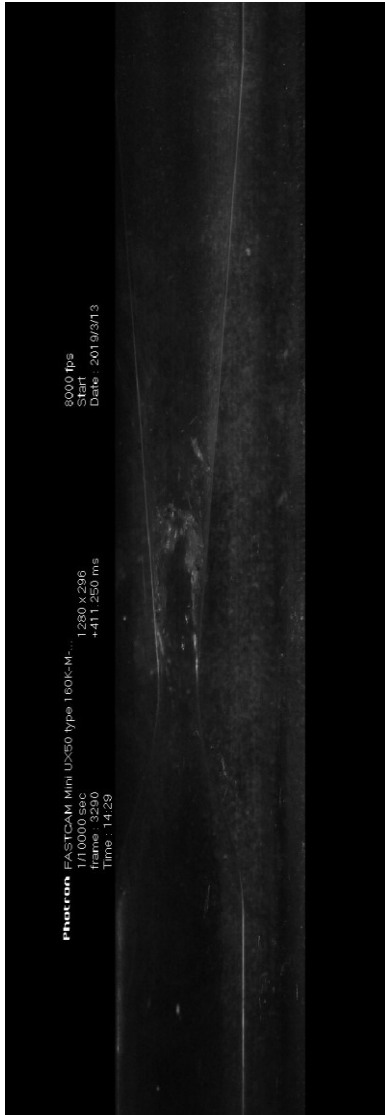
Příloha A



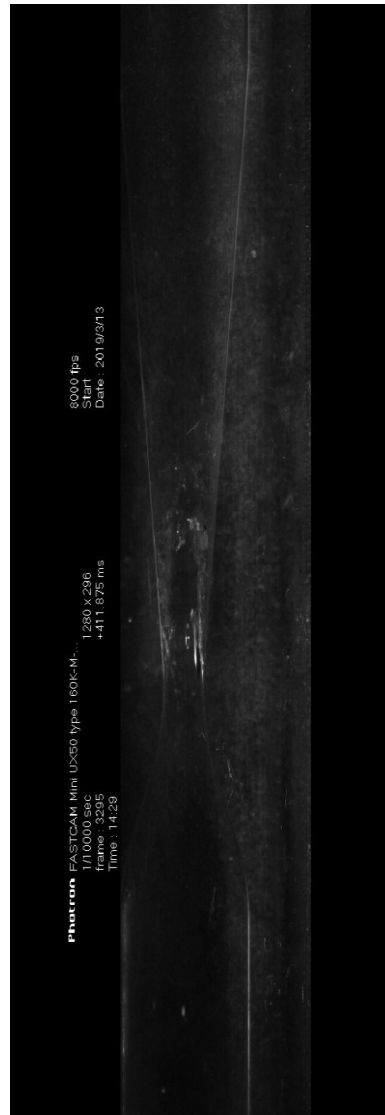


## Příloha B

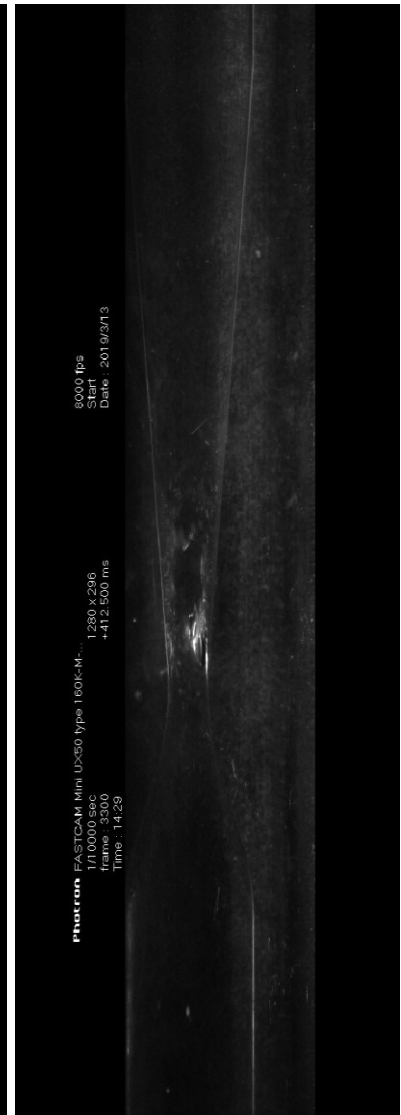
Tyto snímky byly pořízeny (obdobně jako obr. 7.4 c) při poslední sérii měření při objemovém průtoku  $Q = 35,14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , teplotě oleje  $t = 49,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativním tlaku před dýzou  $p_2 = 106900 \text{ Pa}$  a relativním tlaku za dýzou  $p_3 = 3120 \text{ Pa}$ , je zde možno vidět průběh kavitace a kavitační parametr zde nabývá hodnoty  $K = 0,563$ . Zobrazený je každý pátý snímek, který kamera zaznamenala od snímku číslo 3290 po snímek číslo 3315.



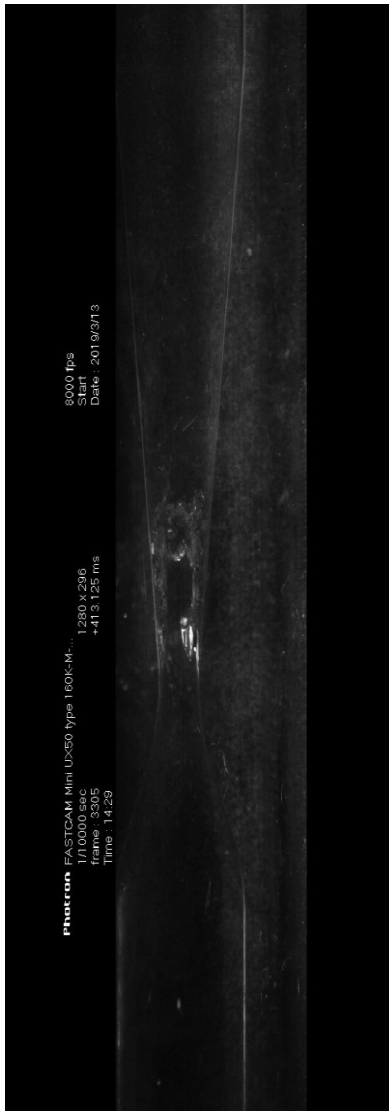
*Obr. P1*



*Obr. P2*



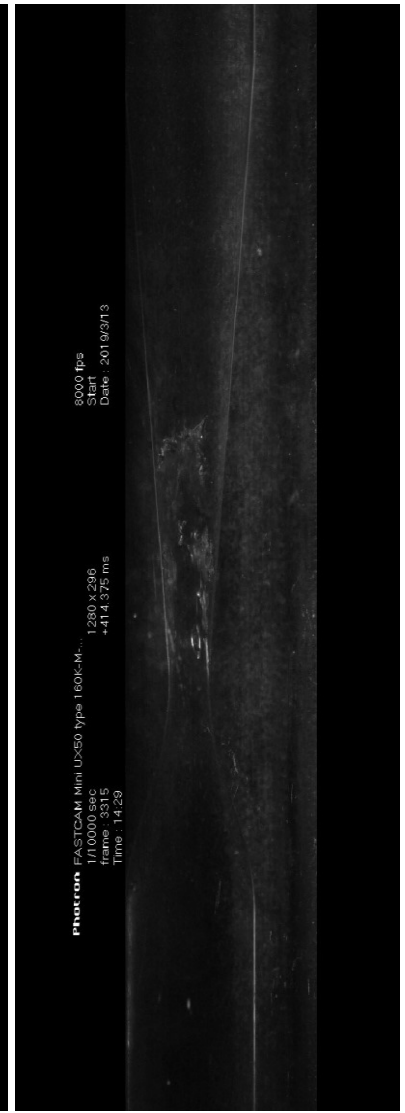
*Obr. P3*



*Obr. P4*



*Obr. P5*



*Obr. P6*