

Datum měření: 7.11.2014

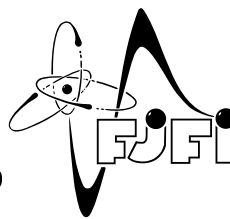
Skupina: Pá 14:30

Jméno: David Roesel

Kroužek: FE

Spolupracovali: Schönfeldová, Vyšín

Klasifikace:



1 Pracovní úkoly

1. Sledujte čerpání uzavřeného objemu rotační olejovou vývěvou (ROV) s uzavřeným a otevřeným proplachováním, a to od atmosferického tlaku až po přibližný mezní tlak. Ze závislosti $\ln p = f(t)$ určete čerpací rychlost.
2. Určete čerpací rychlost z měření proudu plynu (mikrobyretou) při konstantním tlaku. Proveďte pro tři hodnoty tlaku od 5 do 20 Pa.
3. Určete, jak ovlivňuje efektivní čerpací rychlost hadice mezi ROV a recipientem.
4. Ocejchujte termočláňkový vakuometr v rozsahu 6 až 30 dílků sklápěcím kompresním vakuometrem McLeod (cca 10 bodů).
5. Měřením tlakového spádu (termočláňkovým vakuometrem a McLeodem) a proudu vzduchu (mikrobyretou) určete vodivost kovové trubice ($\varnothing = 8,5$ mm, $l = 100$ cm) pro vstupní tlaky od 5 do 50 Pa. Určete vodivost trubice výpočtem a výsledky srovnejte.

2 Úvod

Rotační olejová vývěva (ROV) je mechanická transportní vývěva. Rotační olejové vývěvy typicky dosahují tlaků v řádu jednotek Pascalů bez proplachování, s proplachováním potom tlaků o dva řády vyšších.

V rotačních olejových vývěvách se dosahuje poměrně vysokého kompresního poměru, což může pro plyny s vysokou kritickou teplotou vést k jejich zamíchání do oleje, který se tím znehodnotí, jelikož se pak z oleje v nežádaných místech aparatury plyn může opět uvolňovat. Zabraňuje se tomu používáním tzv. proplachování, které vede k tomu, že se výstupní ventil otevírá dříve, než by stihlo vlivem tlaku dojít ke kondenzaci par. V experimentu se budeme snažit ověřovat, že proplachování opravdu zvyšuje mezní tlak vývěvy o jeden až dva řády.

3 Vypracování

3.1 Teoretický úvod

3.1.1 Čerpací proces ROV

Čerpáme-li pomocí rotační olejové vývěvy recipient a sledujeme-li tlak, využijeme následující vztahy:

$$q = pS = p \frac{dV}{dt} = -V \frac{dp}{dt}, \quad (1)$$

kde q je zdroj plynu (netěsnost), V čerpaný objem, p tlak a t čas. Snadnou úpravou se pak dostaneme k finální podobě vzorce

$$S = -V \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} = -V \frac{d \ln p}{dt}. \quad (2)$$

Z teorie pro nás bylo také důležité vědět, že dotyky po sobě klouzajících částí a výstupní ventil nejsou dokonale těsné a olej jimi prolíná, což nevadí za provozu, kdy je neustále hnán ven z výstupu. Pokud by ale rotační olejová vývěva neběžela a ve vstupním hrdle by zůstal snížený tlak, byl by olej nasáván rozdílem tlaků a mohl by se dostat až do čerpaného objemu, což by vedlo ke znečištění aparatury. Po jejím vypnutí bylo tedy třeba rotační vývěvu zavzdušnit vhodným přepnutím jejího ventilu.

3.1.2 Měření čerpací rychlosti při konstantním tlaku

Dále budeme potřebovat měřit efektivní čerpací rychlost při konstantním tlaku. Vycházíme přitom z kontinuity proudění, tedy z rovnosti mezi proudem plynu čerpaného rotační vývěvou a proudem plynu napouštěného do aparatury. Zapišeme-li tuto rovnost matematicky, dostáváme

$$S_{EF}(p) \cdot p = q = p_A \frac{\delta V}{\delta t}, \quad (3)$$

kde δV je objem vzduchu odsátý z mikrobyrety za čas δt , p tlak v místě určování efektivní čerpací rychlosti S_{EF} , q proud vzduchu a p_A atmosferický tlak. Hodnoty poměru $\frac{\delta V}{\delta t}$ budeme určovat vztahem

$$\frac{\delta V}{\delta t} = \frac{l}{\tau} \cdot 4,75 \cdot 10^{-2} \quad \left[\text{cm}; \text{s}; \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right], \quad (4)$$

uvedeným na mikrobyretě. Veličina l je délka, o kterou vystoupala kapalina v mikrobyretě za čas τ .

3.1.3 Vliv hadice na čerpací rychlost

Střední volnou dráhu molekuly ve vzduchu za normálních podmínek můžeme určit ze vztahu

$$l_s = 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{p} \quad [\text{m}; \text{Pa}], \quad (5)$$

kde p je tlak. Pravděpodobná rychlost pohybujících se částic v_p je definována jako

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (6)$$

kde T je teplota, m je hmotnost částice. Vztah pravděpodobné rychlosti v_p a střední rychlosti v_s je

$$v_s = 1,128 \cdot v_p. \quad (7)$$

Hmotnost částice vzduchu můžeme získat za znalosti molární hmotnosti molekul vzduchu M_m a Avogadrovy konstanty N_A pomocí vzorce

$$m = \frac{M_m}{N_A}.$$

Hodnotu molární hmotnosti molekul vzduchu uvažujeme $M_m = 28,96 \text{ g} \cdot \text{mol} \cdot 10^{-1}$. Dosadíme-li tento vzorec do vztahu (7) a ten následně do (6), získáme pro střední rychlost částice vztah

$$v_s = 1,128 \cdot \sqrt{\frac{2RT}{M_m}}, \quad (8)$$

kde R je plynová konstanta. Vodivost trubice, která je dlouhá l a má průměr \varnothing , můžeme za podmínek viskózně molekulárního proudění vypočítat podle empirického vzorce [2]

$$C = \frac{\pi \varnothing^2}{4} \frac{\varnothing}{l} \left[\frac{\pi}{128} \frac{\varnothing}{l_s} + \frac{1}{3} \frac{2 + 2,057 \frac{\varnothing}{l_s}}{2 + 3,095 \frac{\varnothing}{l_s}} \right] \cdot v_s. \quad (9)$$

3.1.4 Měření pomocí McLeodova manometru

Měření tlaku McLeodovým manometrem je přímé a platí vzorec uvedený v dokumentaci přístroje u experimentu

$$p = \frac{133,3 \cdot lh}{1100 - l} \quad [\text{Pa}; \text{mm}; \text{mm}], \quad (10)$$

kde l je vzdálenost mezi vrchem uzavřené trubice a hladinou v ní a h je rozdíl hladin.

3.1.5 Měření vodivosti trubice

Pro vodivost trubice C s tlaky na koncích p_1 a p_2 platí

$$C = \frac{q}{p_1 - p_2}, \quad (11)$$

kde q je proud plynu, který je dán vztahem

$$q = p_A \cdot \frac{\delta V}{\delta t}, \quad (12)$$

kde veličina $\frac{\delta V}{\delta t}$ je dána vztahem (4).

Průměrný tlak p_s v trubici lze určit ze vztahu

$$p_s = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (13)$$

kde p_1 je tlak na vstupu a p_2 tlak na výstupu trubice.

3.2 Postup měření

3.2.1 Čerpací proces ROV

Zkontrolovali jsme, že aparatura je sestavena dle schématu na Obr. 1. Aparaturu jsme odšroubováním rychlospoje, který spojoval recipient s Piraniho manometrem, napustili vzduchem na atmosferický tlak. Poté jsme ji uzavřeli, spustili Piraniho manometr a zapnuli ROV. V okamžiku otevření ventilu, který vedl z ROV do recipientu, jsme začali měřit čas. Sledovali jsme, jak se s časem mění tlak v recipientu a zaznamenávali jej. Totéž měření jsme provedli pro ROV s proplachováním.

3.2.2 Měření čerpací rychlosti při konstantním tlaku

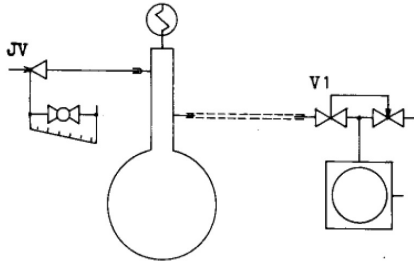
Čerpací aparaturu jsme nechali zapojenou dle schématu na Obr. 1. Aparaturu jsme vyčerpali pomocí ROV bez proplachování a snažili se za pomoci jehlového ventilu docílit konstantního tlaku 5 Pa. Po ustálení tlaku jsme odaretovali mikrobyretu a měřili čas, za který vystoupil olej v mikrobyretě na hodnotu 10 cm. Celé měření jsme zopakovali ještě pro konstantní tlak 10 a 20 Pa.

3.2.3 Měření pomocí McLeodova manometru

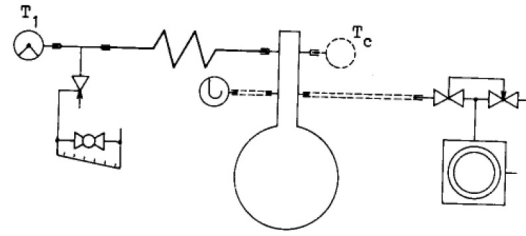
Pro cejchování termočláňkového vakuometru jsme přestavili aparaturu dle schématu na Obr. 1. Místo Piraniho manometru jsme umístili termočláňkovou měрку a místo, kde byla původně termočláňková měрка, jsme uzavřeli kovovou záslepkou. Vyčerpali jsme aparaturu a jehlovým ventilem jsme opět nastavili konstantní tlak na 9 dílků termočláňkového vakuometru. Otočili jsme McLeodův vakuometr a odečetli hodnoty hladin. Celé měření jsme provedli ještě desetkrát v rozmezí od 9 do 22 dílků.

3.2.4 Měření vodivosti trubice

Aparaturu jsme sestavili podle schématu na Obr. 2. Jehlovým ventilem jsme nastavili konstantní tlak na termočláňkové měрке, poté jsme otočili McLeodovým vakuometrem a odečetli hodnoty. Dále jsme odaretovali mikrobyretu a měřili čas, za který olej vystoupil na hodnotu 10. Měření jsme provedli ještě pro 5 dalších hodnot tlaků.



Obr. 1: Schéma čerpací aparatury pro měření čerpacího procesu ROV a a její čerpací rychlosti - převzato z [2].



Obr. 2: Schéma aparatury pro měření vodivosti trubice při viskózně molekulárním proudění - převzato z [2].

3.3 Naměřené hodnoty

3.3.1 Čerpací proces ROV

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1 a zobrazeny v grafech na Obr. 4 a 5. Objem aparatury byl $V = 11,35 \text{ l}$.

Pomocí fitování hodnot získaných při čerpání ROV bez proplachování v časovém rozmezí $t = 0 - 250 \text{ s}$ jsme získali směrnici

$$\frac{d(\ln p)}{dt} = (-0,038 \pm 0,001). \quad (14)$$

Čerpací rychlost jsme poté určili pomocí rovnice (2) jako

$$S_{uz} = (0,43 \pm 0,02) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15)$$

s chybou dle (6.4).

Pro čerpací rychlost s proplachováním pak v časovém rozmezí $t = 0 - 350 \text{ s}$ vyšla směrnice fitu

$$\frac{d(\ln p)}{dt} = (-0,033 \pm 0,001) \quad (16)$$

a čerpací rychlost tedy podle vztahu (2) jako

$$S_{ot} = (0,37 \pm 0,02) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17)$$

s chybou dle (6.4).

3.3.2 Měření čerpací rychlosti při konstantním tlaku

Naměřená data jsou uvedena v Tab. 2. Hodnotu atmosferického tlaku jsme brali z [3] jako $p_A = 101670 \text{ Pa}$.

Hodnoty $\frac{\delta V}{\delta t}$ jsme určili dle vztahu (4). Efektivní čerpací rychlost jsme poté spočetli za pomoci vztahu (3).

3.3.3 Vliv hadice na čerpací rychlost

Délku a průměr trubice spojující ROV s recipientem jsme brali jako $l = (70 \pm 1) \text{ cm}$ a $\varnothing = (1,9 \pm 0,1) \text{ cm}$ (chybu odhadujeme). Pro pět hodnot tlaků v rozmezí $p = 5 - 25 \text{ Pa}$ jsme vypočítali střední volnou dráhu l_s ze vztahu (5). Z vypočtené hodnoty jsme zjistili, že se nejspíše jedná o viskózně molekulární proudění. Ze vztahu (8) jsme stanovili střední rychlost molekul vzduchu pro teplotu $T = 293 \text{ K}$, která činila $v_s = 463 \text{ m/s}$. Pro dané tlaky jsme určili vodivost C_{vm} této trubice pomocí vztahu (9). Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3. Závislost vodivosti trubice na tlaku v recipientu je vynesena v grafu na Obr. 6 a proložena lineárním fitem.

3.3.4 Měření pomocí McLeodova manometru

Naměřená data jsou uvedena v Tab. 4 a vynesena do grafu Obr. 7. Tlak p jsme spočítali pomocí vzorce (10).

3.3.5 Měření vodivosti trubice

Naměřená data se nachází v Tab. 5. Na Obr. 8 je vynesena závislost naměřené a vypočítané vodivosti kovové trubice na středním tlaku. Hodnotu tlaku p_1 na vstupu trubice jsme spočítali ze vzorce (10), hodnotu tlaku p_2 na výstupu jsme pak brali z hodnot získaných cejchováním termočláňkového vakuometru. Střední hodnotu tlaku jsme získali pomocí vzorce (13). Hodnoty naměřené vodivosti C_{nam} jsme získali ze vztahu (11). Vodivost C_{vm} jsme vypočítali vztahem (9).

3.4 Diskuse

3.4.1 Čerpací proces ROV

Při sledování čerpání uzavřeného objemu jsme zjistili, že rotační olejová vývěva dosahuje s proplachováním horších tlaků než bez něj a to zhruba o jeden a půl řádu. To přesně odpovídá našemu předpokladu, který říká, že horší tlak vlivem proplachování je cenou za neznečištění oleje látkami, které by se do něj při vyšších tlacích zamíchaly.

I přes odpovídající rozdíl řádů tlaku při zapnutém a vypnutém proplachování musíme konstatovat, že jsme nedosáhli předpokládaných tlaků. U rotační olejové vývěvy by bylo rozumné očekávat tlak kolem 1 Pa, avšak naše zaznamenané minimum bylo těsně pod hodnotou 5 Pa. Jedním z důvodů mohly být netěsnosti v aparatuře, které mohly být přítomny již před naším příchodem k experimentu. Dvakrát za experiment nám vypadlo z některých spojů těsnění a je možné, že jsme způsobili menší netěsnost jeho nedostatečným očištěním. Další nezanedbatelný důvod bylo mírné přetočení (přenastavení) Piraniho měřky, která na začátku experimentu při atmosferickém tlaku ukazovala nesmyslně nízký tlak, takže ji bylo nutno vedoucím praktika jemně přenastavit. Tlak, kterého jsme dosáhli, tedy nemůžeme nazývat tlakem mezním.

Lineární proložení naměřených dat jsme dělali na úseku 0 – 250 sekund od zapnutí vývěvy, jelikož po tuto dobu působil průběh závislosti $\ln p = f(t)$ lineárně. Námí určená čerpací rychlost by se rozhodně drobně změnila v případě, že bychom změnili interval, na kterém jsme hodnoty fitovali. Celou první část jsme navíc měřili na poměrně nepřesném Piraniho vakuometru, který nám dovoľoval odečítat s rozumnou spolehlivostí pouze některé hodnoty a při automatickém přepínání rozsahů se někdy zasekával. Chyby naměřených hodnot tedy můžou být větší, než ty námí určené.

3.4.2 Měření čerpací rychlosti při konstantním tlaku

Při měření čerpací rychlosti při konstantním tlaku jsme zjistili, že efektivní čerpací rychlost S_{EF} roste se stoupajícím tlakem, nikoliv však lineárně. Naměřené hodnoty by šly proložit parabolickou křivkou, ale vzhledem k malému množství určených hodnot by to nemělo valný smysl. Podařilo se nám ověřit, že efektivní čerpací rychlost byla pro každý tlak nižší než ta, kterou jsme určili v první úloze.

V jednom ze tří případů se některým z nás zdálo, že pohyb oleje v mikrobyřetě nebyl konstantní, ale nepodařilo se nám tento jev znovu reprodukovat. Nejsme si také jisti, na kolik při větších čerpacích rychlostech ovlivnil rychlost stoupání oleje jeho zbytek z předešlého měření na spodku trubičky.

3.4.3 Vliv hadice na čerpací rychlost

Z grafu na Obr. 6 je zcela patrné, že v případě viskózně-molekulárního proudění roste vodivost trubice s tlakem lineárně. Dle našich výpočtů se zdá, že by vodivost hadice mezi recipientem a rotační olejovou vývěvou měla být dost vysoká na to, aby příliš neovlivňovala čerpací rychlost. Pokud bychom za ROV umístili vývěvu, která by byla schopna dosáhnout řádově lepších tlaků, bylo by možné, že by vodivost hadice snižovala S_{EF} v limitě až k hodnotě $S_{EF} \approx C$.

3.4.4 Měření pomocí McLeodova manometru

Vzhledem k tomu, že otočení jehlového ventilu mělo jistou latenci, nepodařilo se nám při měření pomocí McLeodova manometru ustálit tlak na žádné z hodnot. Ve výsledku jsme měření prováděli tak, že jsme otevřeli ventil natolik, aby se tlak měnil co nejpomaleji a čekali jsme, než ručička dojde na polohu, ve které jsme chtěli tlak ustálit. V ten moment jsme rychle provedli odečtení hodnot a postup s mírnou změnou natočení jehlového ventilu opakovali. Přesnost měření by šla zvýšit v případě, že bychom věnovali ustálení tlaku větší množství času.

V jednom momentu jsme zapoměli otočit McLeodův manometr do původní polohy a nechali jsme klesnout tlak v aparatuře, což mělo za následek nahromadění rtuti v levé trubičce manometru. Opravování tohoto problému nás nějakou dobu zdrželo, ale předpokládáme, že jsme nijak neovlivnili žádná z následujících měření. K nepřesnostem však mohlo docházet při odečítání ze stupnic, konkrétně při přesném stanovování polohy hladiny v kapiláře.

3.4.5 Měření vodivosti trubice

Vodivost trubice jsme určili výpočtem a měřením a můžeme říct jen to, že se hodnoty shodují řádově (jak je patrné z grafu na Obr. 8). Vzhledem k nedostatkům popsaným v předchozích bodech však řádovou shodu považujeme za dobrou. Pro přesnější porovnání by stálo za to provést cejchování termočláňkového vakuometru několikrát, jelikož jsme při něm brali hodnoty za absolutně přesné a adekvátně tomu jsme je místo fitu v grafu na Obr. 7 propojovali. Při tomto měření navíc dělalo několik lidí na experimentu nezávisle na sobě a je možné, že každý měřil svoji část v jiném momentu.

4 Závěr

Sledovali jsme čerpání uzavřeného objemu rotační vývěvou (ROV) s uzavřeným a otevřeným proplachováním, a to od atmosferického tlaku až po tlak, který se ustálil na dostatečně dlouhou dobu (nemůžeme ho nazvat mezním). Ze závislosti $\ln p = f(t)$ jsme určili čerpací rychlost jak pro uzavřené $S_{uz} = (0,43 \pm 0,02) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, tak pro otevřené $S_{ot} = (0,37 \pm 0,02) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ proplachování.

Určili jsme čerpací rychlost z měření proudu plynu (mikrobyretou) při třech různých hodnotách konstantního tlaku.

Určili a diskutovali jsme, jak hadice mezi ROV a recipientem ovlivňuje efektivní čerpací rychlost.

Ocejchovali jsme termočláňkový vakuometr v rozsahu 6 až 30 dílků sklápěcím vakuometrem McLeod (cca 10 bodů).

Měření tlakového spádu (termočláňkovým vakuometrem a McLeodem) a proudu vzduchu (mikrobyretou) jsme určili vodivost kovové trubice pro několik vstupních tlaků. Vodivost trubice jsme určili výpočtem a výsledky jsme tabulkově i graficky srovnali.

5 Použitá literatura

- [1] Kolektiv KF, *Chyby měření* [Online], [cit. 19. prosince 2014]
<http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>
- [2] Král, J.: *Cvičení z vakuové techniky*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996
- [3] ČHMÚ: *Aktuální informace o počasí na území České republiky*, [online], [cit. 19. prosince 2014],
<http://pr-asv.chmi.cz/synopy-map/pocasisp.php?ukazatel=stanice&pozadi=&pozadi=mapareg&graf=ano>

Přílohy

6 Statistické zpracování dat

Pro statistické zpracování využíváme aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6.1)$$

jehož chybu spočítáme jako

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.2)$$

kde x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty, n je počet měření, \bar{x} aritmetický průměr a σ_0 jeho chyba [1]. Při nepřímém měření počítáme hodnotu s chybou dle následujících vztahů:

$$u = f(x, y, z, \dots), \quad (6.3)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma_x), \quad y = (\bar{y} \pm \sigma_y), \quad z = (\bar{z} \pm \sigma_z), \quad \dots,$$

kde u je veličina, kterou určíme nepřímo z měřených veličin x, y, z, \dots

Pak

$$\bar{u} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots),$$

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots}, \quad (6.4)$$
$$u = (\bar{u} \pm \sigma_u).$$

6.1 Tabulky a grafy

t_1 [s]	p_1 [Pa]	t_2 [s]	p_2 [Pa]
0,00	1E+05	0	1E+05
19,55	5E+04	21,31	5E+04
32,58	2E+04	38,51	2E+04
46,56	1E+04	55,29	1E+04
61,92	5E+03	72,44	5E+03
84,62	2E+03	96,92	2E+03
104,73	1E+03	118,23	1E+03
123,23	5E+02	140,04	5E+02
144,63	2E+02	169,82	2E+02
163,68	1E+02	222,75	1E+02
192,36	5E+01	659,41	9E+01
231,11	2E+01		
297,79	1E+01		
674,90	5E+00		
1602,40	5E+00		

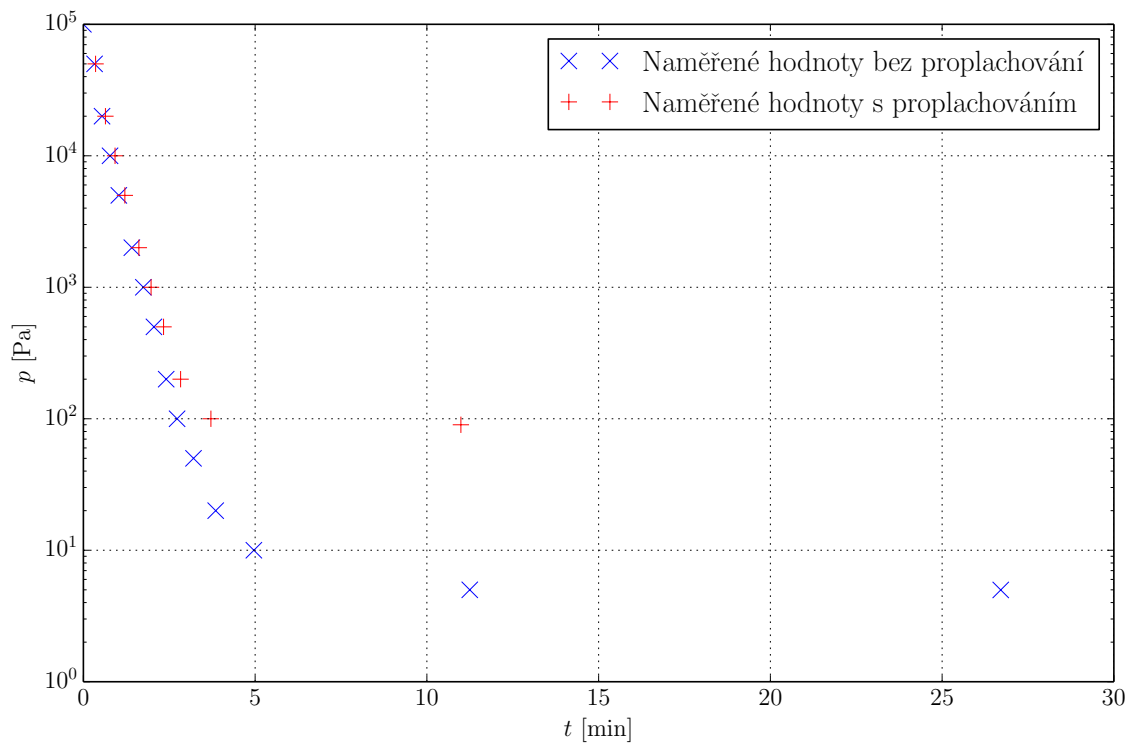
Tab. 1: Naměřené hodnoty při čerpání ROV bez proplachování a s ním; $p_{1,2}$, $t_{1,2}$ jsou hodnoty tlaku a času bez proplachování resp. s proplachováním.

p [Pa]	τ [s]	l [cm]	$\delta V/\delta t$ [mm ³ /s]	S_{EF} [cm ³ /s]
5	159,3	10	3	61
10	34,5	10	14	140
20	14,1	10	34	171

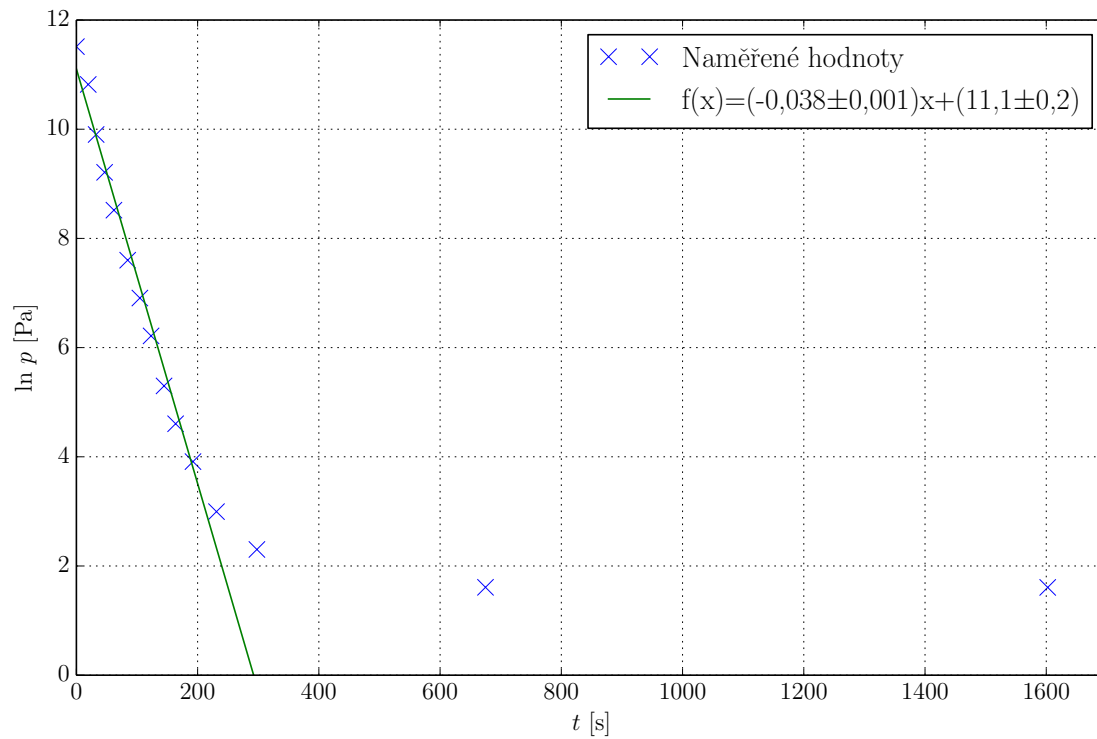
Tab. 2: Naměřené hodnoty pro výpočet efektivní čerpací rychlosti S_{EF} ; p je tlak, τ je čas, za který olej v mikrobyretě vystoupil o délku l a δV je objem vzduchu odsátý z mikrobyrety za čas δt .

p [Pa]	l_s [mm]	C_{vm} [dm ³ /s]
5	1,32	2,1
10	0,66	3,3
15	0,44	4,6
20	0,33	5,8
25	0,26	7,1

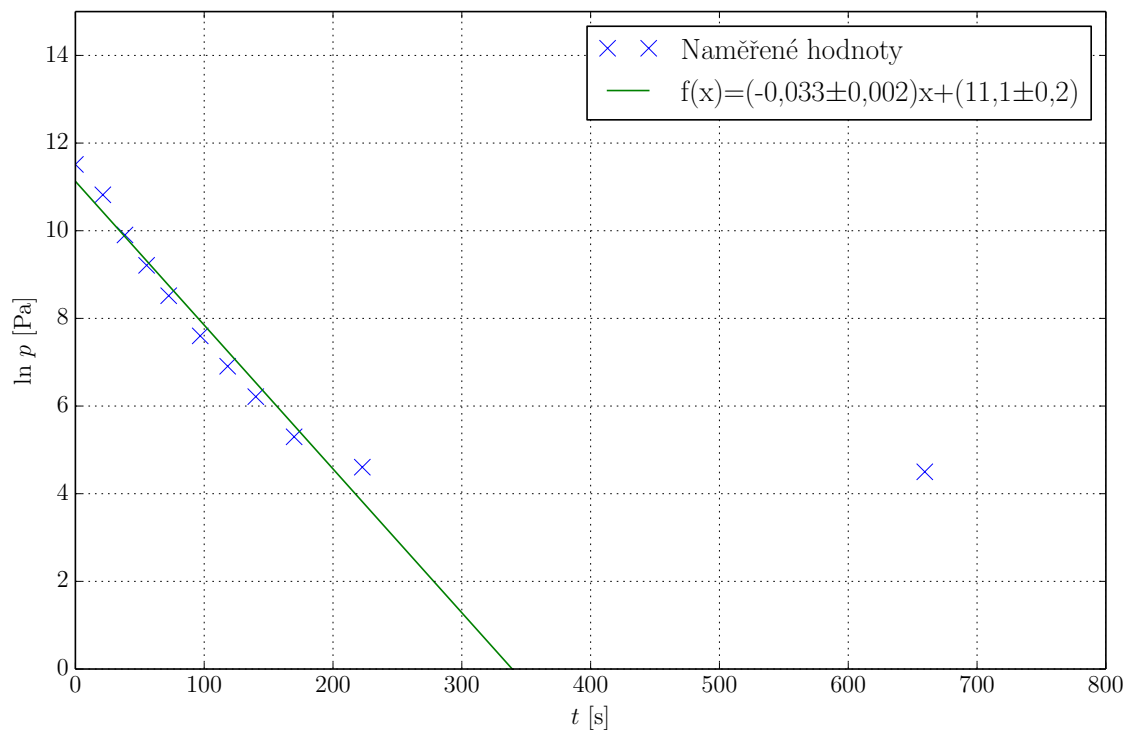
Tab. 3: Vypočítané hodnoty pro získání vodivosti trubice C_{vm} ; p je tlak, l_s je střední volná dráha a C_{vm} je vodivost trubice při viskózně molekulárních podmínkách.



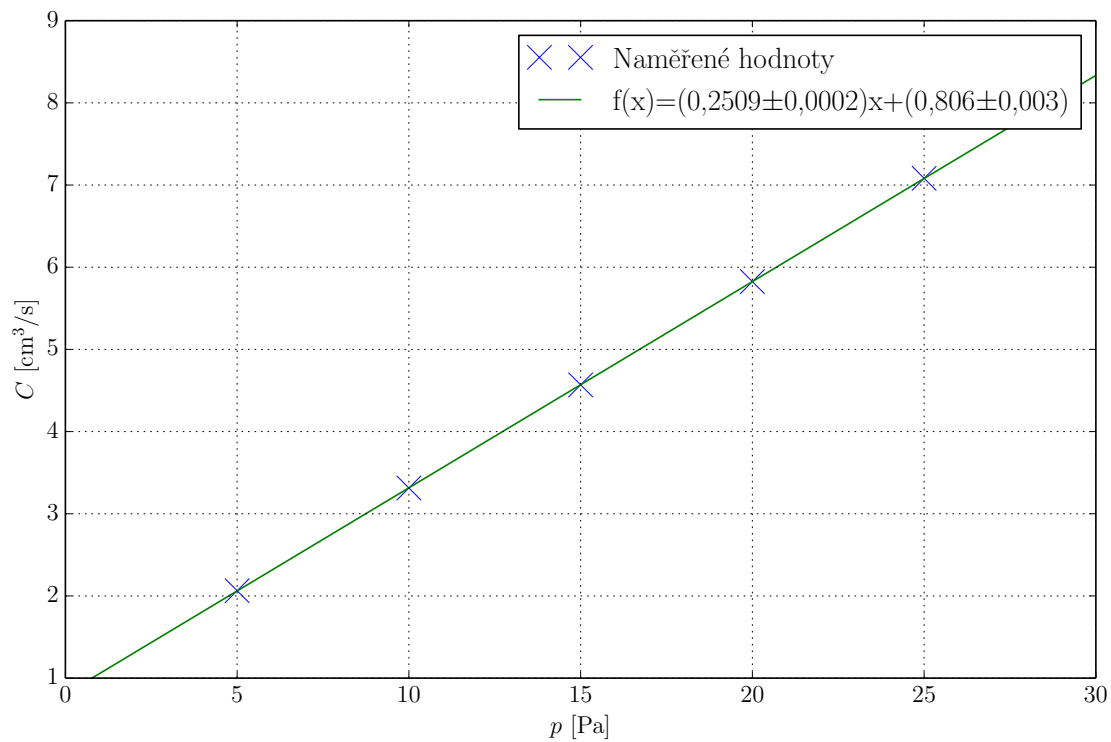
Obr. 3: Graf závislosti poklesu tlaku na čase při čerpání ROV bez proplachování a s proplachováním.



Obr. 4: Graf závislosti $\ln p$ na čase při čerpání ROV bez proplachování, graf je proložen lineárním fitem v oblasti $t = 0 - 250$ s.



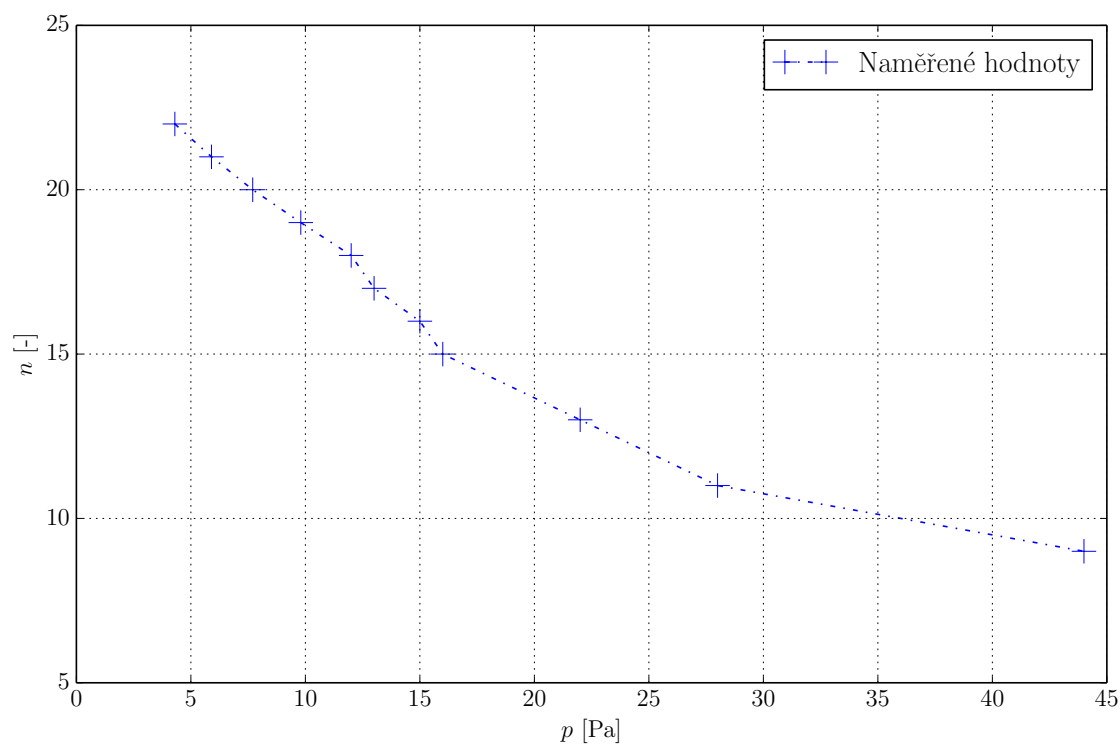
Obr. 5: Graf závislosti $\ln p$ na čase při čerpání ROV s proplachováním, graf je proložen lineárním fitem v oblasti $t = 0 - 250$ s.



Obr. 6: Graf závislosti vodivosti trubice mezi ROV a recipientem na tlaku v recipientu.

l [mm]	h [mm]	p [Pa]	n [-]
7,0	5,0	4	22
8,0	6,0	6	21
9,0	7,0	8	20
10,0	8,0	10	19
11,0	9,0	12	18
11,5	9,5	13	17
12,0	10,0	15	16
12,5	10,5	16	15
14,5	12,5	22	13
16,0	14,0	28	11
20,0	18,0	44	9

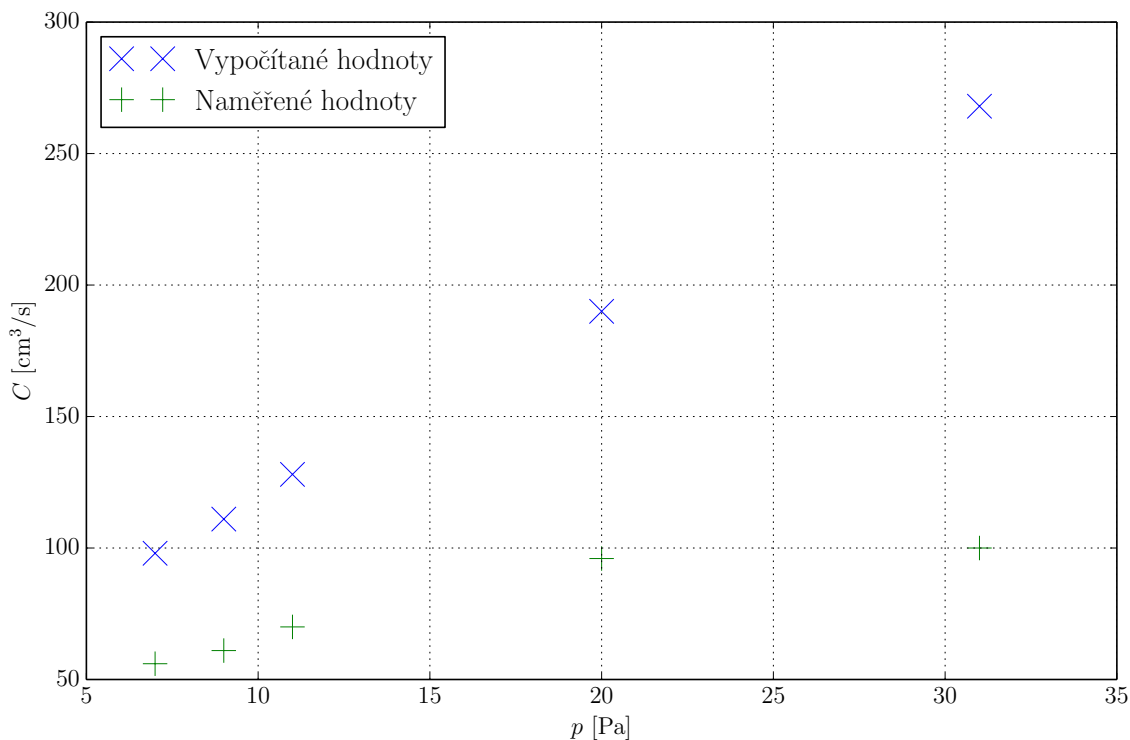
Tab. 4: Naměřené hodnoty pro cejchování termočláňkového manometru McLeodovým manometrem; l je vzdálenost mezi vrcholem uzavřené trubice a hladinou v této trubici v McLeodově vakuometru, h je rozdíl hladin v tomto vakuometru, p je tlak v recipientu měřený McLeodovým vakuometrem a n je počet dílků na termočláňkovém vakuometru.



Obr. 7: Cejchování termočláňkového manometru; n je počet dílků termočláňkového manometru a p je tlak naměřený McLeodovým vakuometrem.

l [mm]	h [mm]	p_1 [Pa]	n [-]	p_2 [Pa]	τ [s]	$\delta V/\delta t$ [mm ³ /s]	p_s [Pa]	C_{vm} [cm ³ /s]	C_n [cm ³ /s]
6,5	6,5	4	19	10	138,4	3	7	98	56
7,5	7,5	5	18	12	112,2	4	9	111	61
8,0	8,0	6	16	16	67,6	7	11	128	70
11,0	11,0	12	11	28	32,5	15	20	190	96
13,0	13,0	18	9	44	17,9	27	31	268	100

Tab. 5: Naměřené hodnoty pro výpočet vodivosti kovové trubice; l je vzdálenost mezi vrcholem uzavřené trubice a hladinou v této trubici v McLeodově vakuometru, h je rozdíl hladin v tomto vakuometru, p_1 je tlak na začátku trubice měřený McLeodovým vakuometrem, n je počet dílků na termočláňkovém vakuometru, p_2 je tlak na konci trubice určený z cejchování termočláňkového manometru, τ je čas, za který olej v mikrobyretě vystoupil o 10 cm, δV je objem vzduchu odsátý z mikrobyrety za čas δt , p_s je střední tlak v trubici, C_n je naměřená vodivost a C_{vm} je vypočítaná vodivost.



Obr. 8: Graf závislost naměřené a vypočítané vodivosti kovové trubice na středním tlaku p_s .