

1 Čerpání rotační olejovou vývěvou

4. prosince 2010

Vakuová fyzika a technika, FJFI ČVUT v Praze	
Jméno: Vojtěch Horný	Datum měření: 26. listopadu 2010
Pracovní skupina: 2	Ročník a kroužek: 3. ročník, pátek 11:45
Spolupracovali: Jaroslav Zeman, Jiří Slabý	Hodnocení:

Abstrakt

Seznámili jsme se s čerpáním jednostupňovou rotační olejovou vývěvou. Určili jsme čerpací rychlost a mezní tlaky pro čerpání s proplachováním a bez proplachování. Určovali jsme čerpací rychlost pro čerpání za konstantního tlaku. Ocejchovali jsme termočlánekový vakuometr McLeodovým kompresním manometrem. Poté jsme vypočítali a změřili vodivost kovové trubice ($d = 8,5$ mm, $l = 100$ cm). Naměřená hodnota odpovídá vypočítané hodnotě pouze řádově.

1 Úvod

Rotační olejová vývěva je mechanická transportní vývěva. Dosahuje poměrně vysokého kompresního poměru. Mezní tlak rotační olejové vývěvy je v řádech jednotek pascalů, pro vývěvu s proplachováním je řádově vyšší.

1.1 Poznámka

V době měření byl v Praze dle měření Českého hydrometeorologického ústavu atmosférický tlak 100 kPa. Pro účely tohoto měření beru tuto hodnotu jako přesnou. Chyba určení je totiž vzhledem k chybám určení jiných veličin zanedbatelná.

2 Pracovní úkoly

1. Sledujte čerpání uzavřeného objemu rotační olejovou vývěvou s uzavřeným a otevřeným proplachováním, a to od atmosférického 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 termočlánekový vakuometr v rozsahu 6 až 30 dílků sklápěcím kompresním vakuometrem McLeod. (cca 10 bodů)
5. Měřením tlakového spádu (termočlánekovým vakuometrem a McLeodem) a proudu vzduch (mikrobyretou) určete vodivost kovové trubice ($d = 8,5$ mm, $l = 100$ cm) pro výstupní tlaky od 5 do 50 Pa. Určete vodivost trubice výpočtem a výsledky srovnajte.

3 Základní pojmy a vztahy

3.1 Čerpací rychlost při čerpání ROV

V prvním úkolu se měří čerpací rychlost při čerpání recipientu rotační vývěvou. Vyjdeme-li ze vztahu pro čerpané množství

$$Q = pS = p \frac{dV}{dt} = -V \frac{dp}{dt},$$

jednoduchou úpravou dojdeme ke vztahu pro čerpací rychlost S :

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

3.2 Efektivní čerpací rychlost při konstantním tlaku

Ve druhém úkolu měříme efektivní čerpací rychlost při čerpání za konstantního tlaku. Tato metoda vychází z kontinuity proudění, tzn. rovnosti proudu napouštěného do aparatury a proudu čerpaného rotační vývěvou, matematicky zapsáno:

$$S_{EF}(p) \cdot p = q = p_A \cdot \frac{\delta V}{\delta t}. \quad (2)$$

Plyn jsme napouštěli do aparatury jehlovým ventilem. Proud vzduchu jsme měřili mikrobyretou. Veličinu $\frac{\delta V}{\delta t}$ jsme určili empirickým vzorcem

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

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

3.3 Vliv hadice na čerpací rychlost

Střední volná dráha molekuly se pro vzduch za normálních podmínek vypočítá ze vzorce

$$l_s = 6.6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{p} [m; Pa]. \quad (4)$$

Částice se pohybuje s pravděpodobnou rychlostí

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (5)$$

kde T je teplota a m je hmotnost částice. Střední rychlost se od pravděpodobné rychlosti liší:

$$v_s = 1,128 v_p \quad (6)$$

Hmotnost částice vzduchu vyjádříme ze znalosti molární hmotnosti vzduchu a Avogadrovy konstanty

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

a dosadíme do vztahů 5 a 6. Získáváme vztah pro střední rychlost částice

$$v_s = 1,128 \sqrt{\frac{2RT}{M_m}}. \quad (7)$$

Vodivost trubice délky l a průměru d za podmínek vizkózně molekulárního proudění se pak vypočítá podle empirického vzorce

$$C_{vm} = \frac{\pi d^2 d}{4 l} \left[\frac{\pi d}{128 l_s} + \frac{1}{3} \frac{2 + 2057 \frac{d}{l_s}}{2 + 3095 \frac{d}{l_s}} \right] \cdot v_s \quad (8)$$

3.4 Měření s McLeodovým manometrem

Jedná se o přímé měření tlaku. Hodnotu tlaku jsme určovali pomocí vzorce uvedeném na listu papíru u přístroje:

$$p = \frac{133,3lh}{1100 - l} [Pa, mm, mm] \quad (9)$$

Veličiny l a h znamenají vzdálenost mezi vrcholem uzavřené trubice a hladinou v této trubici a rozdíl hladin.

3.5 Vodivost kovové trubice

Mikrobyretou se měří proud vzduchu

$$q = p_A \frac{\delta V}{\delta t}, \quad (10)$$

kde $\frac{\delta V}{\delta t}$ se určí ze vztahu 3. Průměrný tlak v trubici se určí jednoduše jako

$$p_s = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (11)$$

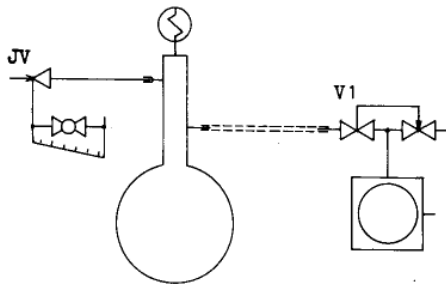
kde tlaky p_1 a p_2 jsou tlaky na vstupu a výstupu trubice. Pro samotnou vodivost trubice platí

$$C = \frac{q}{\Delta p} = \frac{p_A}{\Delta p} \frac{\delta V}{\delta t} \quad (12)$$

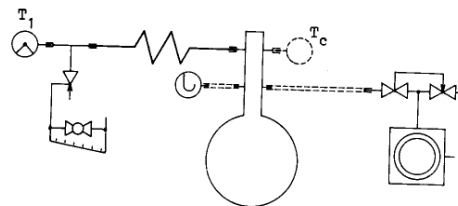
4 Pracovní postup a pozorované jevy

4.1 Čerpání rotační olejovou vývěvou

Ujistili jsme se, že měřicí aparatura je sestavena podle schématu na obrázku 1. Otevřeli jsme rychlospoj a tímto jsme v recipientu nastavili atmosférický tlak. Aparaturu jsme uzavřeli, zkontrolovali uzavření jehlového ventilu a spustili jsme rotační vývěvu. Zároveň jsme měřili čas. Měření jsme opakovali s uzavřeným i otevřeným proplachováním. Data z měření jsou uvedena v tabulce 1 a graficky znázorněna v grafu 1. Z grafu 1 je patrné, že



Obrázek 1: Schéma aparatury pro měření čerpacího procesu rotační olejové vývěvy a její čerpací rychlosti.



Obrázek 2: Schéma aparatury pro měření vodivosti trubice při viskózně molekulárním proudění.

v počáteční fázi se čerpání s proplachováním chová naprosto stejně jako čerpání bez proplachování. Zlom nastává okolo 170. sekundy, kdy hodnota tlaku dosahuje přibližně 200 Pa. Poté se naplno projevuje vliv proplachování, při kterém se do recipientu vhnání proplachovací vzduch.

Bohužel na Piraniho měrce se dají v tomto rozmezí spolehlivě odečítat pouze hodnoty 100 a 200 a nic mezi nimi. Při čerpání s proplachováním se tlak na 100 Pa dostal až v 8. minutě. a dále již klesl pouze na (90 ± 10) Pa, přesněji kvůli logaritmické škále těžko odhadovat.

Pro čerpání bez proplachování se nám povedlo dosáhnout mnohem nižšího tlaku, konkrétně $(2,6 \pm 0,5)$ Pa.

Určitou zajímavostí, které jsem si všiml během měření je skutečnost, že ručička Piraniho manometru byla ovlivňována vysokofrekvenční zkoušečkou, kterou používala skupina u vedlejšího stolu.

Pro ustálené čerpání (tlaky vyšší než 250 Pa) pokládám čerpací procesy za totožné. Vynesl jsem je do grafu 2, který znázorňuje závislost logaritmu tlaku na čase. Rozhodl jsem se proložit tuto závislost přímkou

$$\ln p = k \cdot t + q,$$

její směrnice k je potom rovna časové derivaci $\ln p$. Metodou nejmenších čtverců jsem učil parametry k a q .

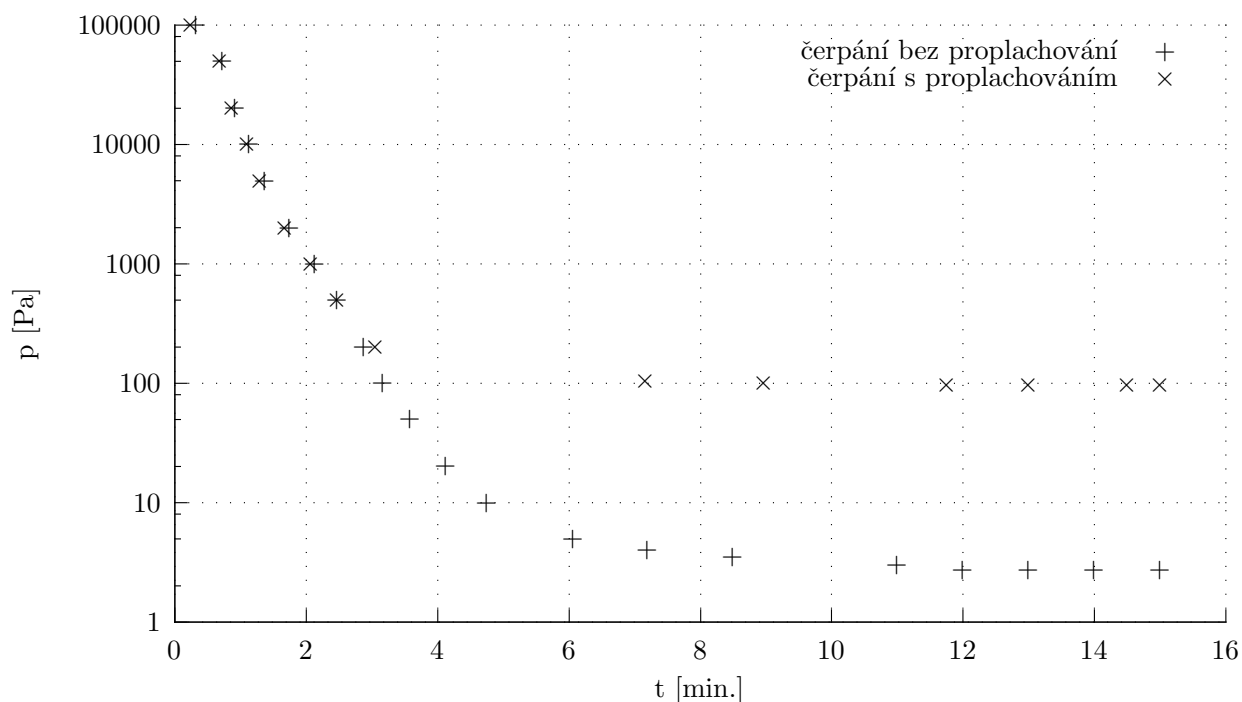
k	$-0,03814 \pm 0,0011$
q	$11,9 \pm 1,1$

Objem čerpané oblasti jsme odhadli na $(12,0 \pm 0,3)$ dm³. Dosadíme-li do vztahu 1, dostáváme hodnotu čerpací rychlosti

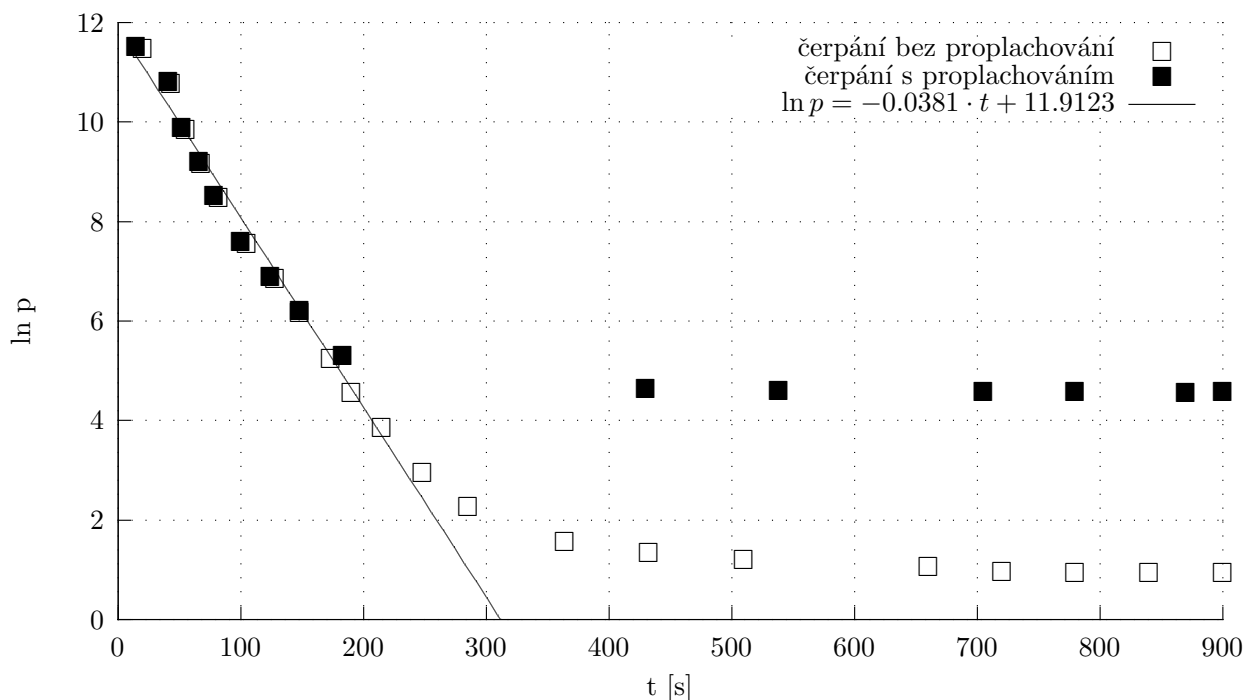
$$S = (0,46 \pm 0,02) \text{ l/s.}$$

bez proplachování		s proplachováním	
čas [min.]	tlak [Pa]	čas [min.]	tlak [Pa]
00:20	$1,0 \cdot 10^5$	00:15	$1,0 \cdot 10^5$
00:43	$5,0 \cdot 10^4$	00:41	$5,0 \cdot 10^4$
00:55	$2,0 \cdot 10^4$	00:52	$2,0 \cdot 10^4$
01:08	$1,0 \cdot 10^4$	01:06	$1,0 \cdot 10^4$
01:22	$5,0 \cdot 10^3$	01:18	$5,0 \cdot 10^3$
01:45	$2,0 \cdot 10^3$	01:40	$2,0 \cdot 10^3$
02:08	$1,0 \cdot 10^3$	02:04	$1,0 \cdot 10^3$
02:28	$5,0 \cdot 10^2$	02:28	$5,0 \cdot 10^2$
02:53	$2,0 \cdot 10^2$	03:03	$2,0 \cdot 10^2$
03:10	$1,0 \cdot 10^2$	07:10	$1,1 \cdot 10^2$
03:35	$5,0 \cdot 10^1$	08:58	$1,0 \cdot 10^2$
04:08	$2,0 \cdot 10^1$	11:45	90 ± 10
04:45	$1,0 \cdot 10^1$	13:00	90 ± 10
06:04	$5,0 \cdot 10^0$	14:30	90 ± 10
07:12	$4,0 \cdot 10^0$	15:00	90 ± 10
08:30	$3,5 \cdot 10^0$		
11:00	$3,0 \cdot 10^0$		
12:00	$2,6 \pm 0,5$		
13:00	$2,6 \pm 0,5$		
14:00	$2,6 \pm 0,5$		
15:00	$2,6 \pm 0,5$		

Tabulka 1: Čerpání rotační olejovou vývěvou s proplachováním a bez proplachování - závislost tlaku na čase. Vyšší hodnoty tlaku pouze orientační, proto udávány bez chyby určení.



Graf 1: Sledování poklesu tlaku během čerpání rotační olejovou vývěvou v závislosti na čase.



Graf 2: K určování čerpací rychlosti, závislost $\ln p$ na čase, p dosazován v Pa, čas v sekundách. Směrnice regresní přímky určuje hodnotu $\frac{d \ln p}{dt}$.

4.2 Měření efektivní čerpací rychlosti za konstantního tlaku

Jehlovým ventilem při zkratované mikrobyretě jsme v aparatuře vyladili postupně hodnoty tlaku 5, 10 a 20 Pa. Po ustálení tlaku jsme v mikrobyretě provedli měření proudu plynu. Měřili jsme tedy délku, o kterou vystoupila kapalina v mikrobyretě a čas, po který kapalina mikrobyretou stoupala. Naměřené hodnoty a statisticky zpracované efektivní rychlosti vypočítané podle vztahů 2 a 3 jsou uvedeny postupně v tabulkách 2, 3 a 4.

č.m.	t[s]	l[cm]	dV/dt[cm ³ /s]	S_{ef} [cm ³ /s]	
1	43	6	$6,6 \cdot 10^{-3}$	132,6	hrubá chyba
2	36	6	$7,9 \cdot 10^{-3}$	158,3	
3	36	6	$7,9 \cdot 10^{-3}$	158,3	
4	36,5	6	$7,8 \cdot 10^{-3}$	156,2	
5	36	6	$7,9 \cdot 10^{-3}$	158,3	
6	43	7	$7,7 \cdot 10^{-3}$	154,7	
				$S_{ef} = (157,2 \pm 0,8) \text{ cm}^3/\text{s}$	

Tabulka 2: Stanovení efektivní čerpací rychlosti pro čerpání za konstantního tlaku 5 Pa.

První měření pro každou velikost jsme vždy prohlásili za hrubou chybu a vyloučili z dalšího zpracování. Projevil se totiž vliv smáčivosti skleněné mikrobyrety. Měření pro 20 Pa je nejpřesnější. Věnovali jsme větší péči přesnému vyladění tlaku jehlovým ventilem. Obecně je ale třeba dodat, že měření může být zatíženo systematickou chybou. Přesnost Piraniho měřky totiž není uspokojivá. Uvedené hodnoty je tedy třeba brát s rezervou. Tabulka 5 ukazuje srovnání čerpacích rychlostí v závislosti na tlaku.

Osobně pokládám za zajímavé, že maximální čerpací rychlost byla naměřena pro prostřední hodnotu tlaku. Rozhodně tedy nemůžeme pokládat efektivní čerpací rychlost za lineární funkci tlaku na intervalu 5 až 20 Pa. V tomto intervalu totiž je určitě lokální maximum této funkce.

4.3 Vliv hadice mezi ROV a recipientem na čerpací rychlost

Změřili jsme délku hadice a průměr hadice ($l=(77 \pm 2)$ cm, $d=(2,0 \pm 0,1)$ cm). Pro čtyři hodnoty tlaku jsme vypočetli čerpací rychlost podle vzorce 7 za použití předchozích vzorců. Čerpací rychlost samozřejmě se vzrůstajícím tlakem stoupá. Vypočtením střední volné dráhy dle vzorce 4 jsme určili, že se pro dané hodnoty tlaku jedná

č.m.	t[s]	l[cm]	dV/dt[cm ³ /s]	S_{ef} [cm ³ /s]	
1	16	6	17,81 · 10 ⁻³	178,1	hrubá chyba
2	13,5	6	21,11 · 10 ⁻³	211,1	
3	13,3	6	21,43 · 10 ⁻³	214,3	
4	13,8	6	20,73 · 10 ⁻³	207,3	
5	13	6	21,92 · 10 ⁻³	219,2	
6	13	6	21,92 · 10 ⁻³	219,2	
				$S_{ef} = (214 \pm 2) \text{ cm}^3/\text{s}$	

Tabulka 3: Stanovení efektivní čerpací rychlosti pro čerpání za konstantního tlaku 10 Pa.

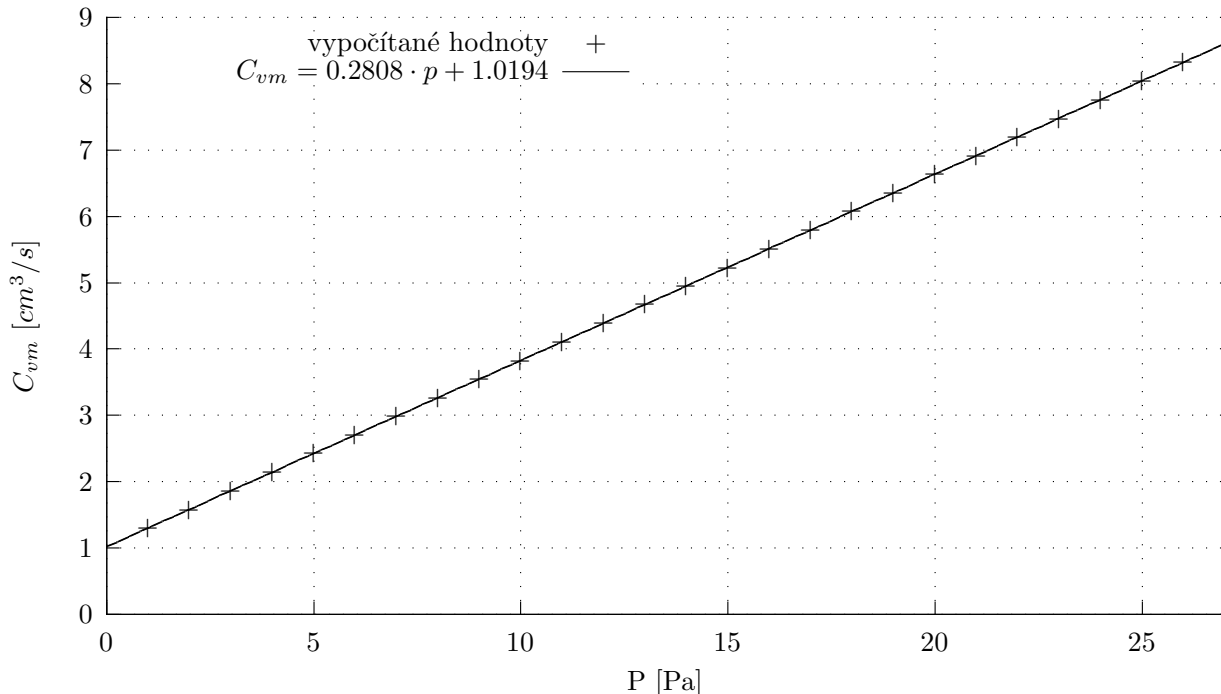
č.m.	t[s]	l[cm]	dV/dt[cm ³ /s]	S_{ef} [cm ³ /s]	
1	12,8	10	37,11 · 10 ⁻³	185,5	hrubá chyba
2	12	10	39,58 · 10 ⁻³	197,9	
3	12	10	39,58 · 10 ⁻³	197,9	
4	12	10	39,58 · 10 ⁻³	197,9	
5	11,9	10	39,92 · 10 ⁻³	199,6	
6	12	10	39,58 · 10 ⁻³	197,9	
				$S_{ef} = (198,2 \pm 0,3) \text{ cm}^3/\text{s}$	

Tabulka 4: Stanovení efektivní čerpací rychlosti pro čerpání za konstantního tlaku 20 Pa.

o viskózně molekulární proudění. Podle vztahů 6 a 8 a jsme vypočetli postupně střední rychlost molekul a vodivost hadice.

Střední rychlost molekul vzduchu pro teplotu 293 K vyšla $(463 \pm 2) \text{ m/s}$. Hodnoty vodivosti hadice a střední volná dráha molekul vzduchu při této teplotě pro několik hodnot tlaku jsou uvedeny v tabulce 6.

Graf 3 ukazuje závislost vodivosti trubice mezi rotační olejovou vývěvou a recipientem na tlaku v recipientu. Vidíme, že závislost lze v námi uvažovaném rozmezí považovat lineární. Znamenalo by to, že druhý člen v závorce ve vztahu 8 můžeme zanedbat.



Graf 3: Závislost vodivosti trubice mezi rotační olejovou vývěvou a recipientem na tlaku v recipientu

4.4 Cejchování termočláňkového manometru

Na aparatuře podle schématu na obrázku 2 jsme instalovali termočláňkovou měрку do polohy T_C a místo T_1 jsme zaslepili kovovou uzávěrkou. Nastavovali jsme jehlovým ventilem tlak v intervalu 5 až 30 Pa. Po ustálení

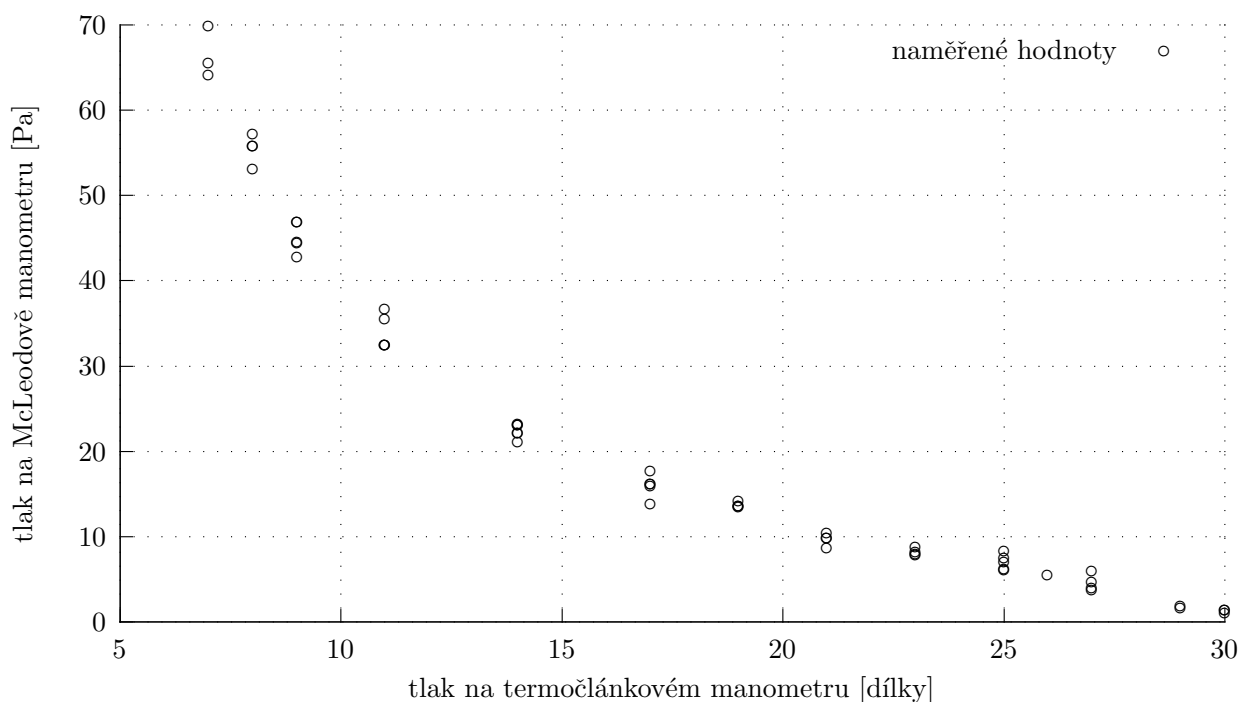
velikost tlaku	efektivní čerpací rychlost
5 Pa	$(157,2 \pm 0,8) \text{ cm}^3/\text{s}$
10 Pa	$(214 \pm 2) \text{ cm}^3/\text{s}$
20 Pa	$(198,2 \pm 0,3) \text{ cm}^3/\text{s}$

Tabulka 5: Vliv velikosti tlaku na efektivní čerpací rychlost za konstantního tlaku.

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

Tabulka 6: Střední volná dráha molekul vzduchu a vodivost hadice spojují ROV s recipientem při teplotě 293 K v závislosti na tlaku v recipientu. Chyba určení je přibližně 8%.

tlaku jsme změřili tlak jak McLeodovým, tak termočláňkovým manometrem. Měření jsme několikrát opakovali. Regulovali jsme tlak jehlovým ventilem. Celkem jsme ocejšovali 12 různých bodů, provedli jsme celkem 54 odečtů. Závislost tlaku naměřeným McLeodovým manometrem na počtu dílků na termočláňkovém manometru je na grafu 4.



Graf 4: Cejšování termočláňkového manometru McLeodovým manometrem

Data jsem zpracoval tak, že jsem pro každou skupinku hodnot vypočítal její těžiště a tyto těžiště jsem spojil postupně lineárně. Dle mého názoru toto zpracování přináší dostatečně přesný odhad tlaku pro měřené termočláňkovým manometrem a pokoušet se o lepší regresi vzhledem k malé přesnosti odečítání tlaku McLeodovou metodou ani nemá valný smysl.

4.5 Vodivost kovové trubice

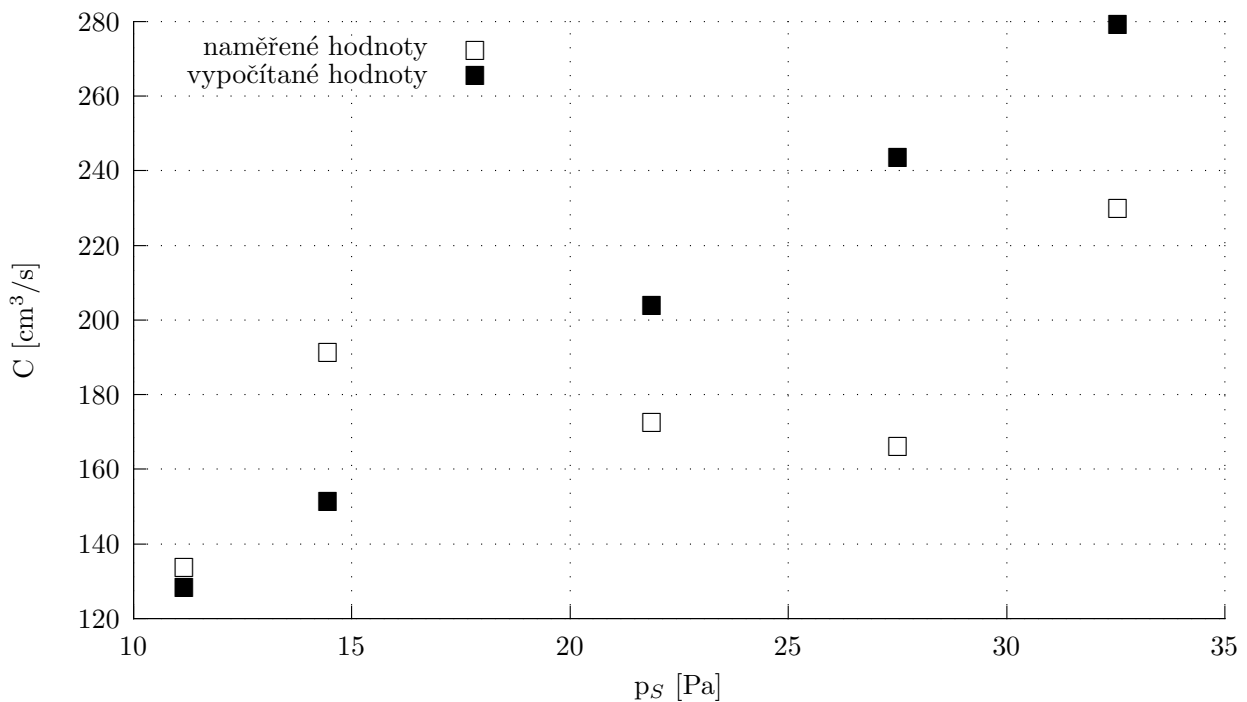
Na aparatuře podle obrázku 2 jsme instalovali termočláňkovou měрку do polohy T_1 a polohu T_C jsme uzavřeli kovovou zátkou. Pootevřením jehlového ventilu jsme nastavili na termočláňkové měřce vhodnou hodnotu tlaku na vstupu do trubice. Měřili jsme hodnoty tlaku na vstupu i výstupu trubice. Mikrobyretou jsme měřili proud vzduchu. Z důvodu nedostatku času jsme měření provedli jen pro pět hodnot tlaku, pro každou hodnotu jsme však měření několikrát opakovali.

Data z měření jsou v tabulce 7 a v grafu 5. Je vidět, že vypočtená a naměřená hodnota se souhlasí pouze řádově. Chyba byla způsobena více faktory, vyzdvihl bych nepřesné určování tlaku McLeodovým manometrem.

rem, následné přenesení chyby cejchováním na termočlánekový manometr a nepřesné určení proudu vzduchu mikrobyretou.

p_1 [Pa]	l [mm]	h [mm]	p_2 [Pa]	τ [s]	l' [cm]	$\frac{dV}{dt}$ [cm ³ /s]	C_n [cm ³ /s]	C_v [cm ³ /s]
30	11	10	13	11	7	0,029	173	204
39	13	10,3	16	9	7	0,037	167	243
45	14	12	21	7	8	0,055	231	279
20	9,5	8	9	19	8	0,020	192	151
16	8,5	6,5	7	12	3	0,012	134	128

Tabulka 7: Určování vodivosti kovové trubice - p_1 - tlak na termočlánekovém manometru, l - vzdálenost mezi vrcholem uzavřené trubice a hladinou, h - rozdíl hladin v McLeodově manometru, p_2 - tlak na McLeodově manometru, τ - doba výstupu kapaliny v mikrobyretě, l' - výška výstupu kapaliny v mikrobyretě, $\frac{dV}{dt}$ - změna objemu za čas v mikrobyretě, C_n - naměřená hodnota vodivosti kovové trubice, dle vztahu 12, C_v - hodnota vodivosti trubice vypočítaná podle vzorce 8.



Graf 5: Závislost vodivosti kovové trubice na středním tlaku v trubici

5 Závěr

Sledovali jsme čerpání uzavřeného objemu rotační olejovou vývěvou od atmosférického až po přibližný mezní tlak. Pozorování jsme prováděli jak pro čerpání s proplachováním, tak bez proplachování. Obě pozorování probíhala 15 minut. Pro čerpání bez proplachování jsme dosáhli tlaku $(2,6 \pm 0,5)$ Pa, pro čerpání s proplachováním (90 ± 10) Pa. Čerpací rychlost byla zpočátku pro oba případy stejná, tzn. $(0,46 \pm 0,02)$ l/s.

Pro tři hodnoty tlaku jsme určili čerpací rychlost při konstantním tlaku. Výsledky jsou v tabulce 5. Je zajímavé, že čerpací rychlost je vyšší pro tlak 10 Pa než pro tlaky 5 Pa a 20 Pa.

Hadice mezi ROV a recipientem samozřejmě ovlivňuje vodivost čerpací rychlost. Představuje jakýsi odpor. Vodivost hadice stoupá pro tlaky mezi 5 a 30 Pa s tlakem lineárně. Podle vztahu 8 se dá vodivost výrazně zvýšit zvětšením průřezu trubice ($C \sim d^4$) a také zkrácením trubice ($C \sim \frac{1}{l}$).

Ocejchovali jsme termočlánekový manometr McLeodovým kompresním manometrem. Cejchování není moc přesné, protože se nepodařilo uspokojivě přesně změřit tlak McLeodovým manometrem. Chyba se proto přenesla i na měření s termočlánekovým manometrem.

Výpočtem a nepřímým měřením jsme určili vodivost kovové trubky. Výpočet a naměřená hodnota souhlasí pouze řádově. Z důvodu nedostatku času jsme provedli měření pouze pro 5 hodnot. Snažili jsme se ale pro každou hodnotu provést více měření za účelem vyloučení náhodné chyby.

Reference

- [1] KRÁL, J.: *Cvičení z vakuové techniky*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996
- [2] Kolektiv KF FJFI ČVUT: *Návody k přístrojům*, [online], [cit. 24. dubna 2010], <http://praktika.fjfi.cvut.cz/ProvPokyny/chybynav/CHYBY1n.pdf>
- [3] ERBEN, M.: *Vakuová technika, učební text* FCHT UP, Pardubice, 2008 [online], [cit. 17. listopadu 2010], webak.upce.cz/~koanch/DOWNLOAD/Ucebni%20texty/Skriptum_vacuum.pdf