

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Techniky získávání nízkých tlaků
v experimentálních aparaturách, měření vakua**



Autor:	Radek Pavlačka
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná Fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok:	2017

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D., a že jsem použil zdroje, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne

.....

podpis

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Radek Pavlačka
Název práce	Techniky získávání nízkých tlaků v experimentálních aparaturách, měření vakua
Typ práce	diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2017
Počet stran	66
Počet příloh	0
Jazyk	český
Abstrakt	Tato práce je zaměřena na vakuovou techniku. První část je věnovaná fyzikálním principům a popisu základních typů vývěv a měrek. Druhá část je zaměřena na konkrétní laboratorní sestavu s difúzní vývěvou a její testování. Třetí část práce se zabývá šířením zvuku ve vakuu, kde hlavním cílem je experimentální ověření vlivu tlaku prostředí na přenos zvuku.
Klíčová slova	vakuum, difúzní vývěva, čerpací vodivost, šíření zvuku

Bibliographical identification:

Author's first name and surname	Radek Pavlačka
Title	Technics used for vacuum reaching in the experimental apparatus, vacuum measurement
Type of thesis	master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
The year of presentation	2017
Number of pages	66
Number of appendices	0
Language	czech
Abstract	This work is focused on vacuum technology. The first part is devoted to the physical principles and description of the basic types of vacuum pumps and gauges. The second part is focused on specific laboratory assembly with diffusion pump and its testing. The third part deals with the propagation of sound in a vacuum, where the main objective is to experimentally verify the influence of pressure on the transmission of sound.
Keywords	vacuum, diffusion pump, conductance, sound propagation

Děkuji vedoucímu diplomové práce, doc. RNDr. Jiřímu Pechouškovi Ph.D., za odborné vedení a věnovaný čas během zpracování této práce.

Obsah

Úvod	8
1 Vakuum	9
1.1 Tlak.....	9
1.1.1 Jednotky tlaku.....	10
1.2 Dělení vakua.....	11
1.3 Základní vztahy.....	12
1.4 Čerpací vodivost ^[2]	14
1.5 Čerpací rychlost.....	19
2 Získávání vakua (typy vývěv)	21
2.1 Vývěvy mechanické.....	23
2.1.1 Vývěvy pístové.....	23
2.1.2 Vývěvy rotační	24
2.2 Vývěvy pracující na základě přenosu impulzu.....	25
2.2.1 Vývěvy Rootsovy	25
2.2.2 Vývěvy molekulární	26
2.2.3 Vývěvy difúzní	27
2.3 Vývěvy adsorpční.....	28
3 Měření vakua (typy vakuometrů)	30
3.1 Vakuometry kapalinové.....	31
3.2 Vakuometry membránové.....	32
3.3 Vakuometry tepelné.....	33
3.4 Vakuometry ionizační.....	33
4 Laboratorní sestava.....	36
4.1 Použitelnost a zacházení s laboratorní sestavou.....	37
4.1.1 Čerpací harmonogram ^[5]	37
4.2 Difúzní vývěva D 130 (LAVAT) ^[6]	39
4.3 Rotační vývěva VRO 05/21 (LAVAT) ^[7]	40
4.4 Vakuometr Pirani VPR 1 (LAVAT) ^[8]	41
4.5 Vakuometr Penning VPG 1 (LAVAT) ^[9]	42
4.6 Vakuometr Penning AIM-S-NW25 (Edwards) ^[10]	44

4.7 Vakuová komora SVC-6050 (MTI Corporation) ^[13]	45
5 Experimentální část	47
5.1 Testování laboratorní sestavy.....	47
5.1.1 Ověření funkčnosti rotační vývěvy.....	47
5.1.2 Ověření funkčnosti difúzní vývěvy	48
5.1.3 Ověřování čerpací vodivosti.....	50
5.1.4 Ověřování vlivu tvaru a velikosti čerpaného prostoru na kvalitu čerpání.....	53
5.2 Šíření zvuku ve vakuu.....	55
5.2.1 Teorie ^[15]	55
5.2.2 Provedení.....	56
5.2.3 Výsledky a diskuze.....	57
Závěr.....	67
Seznam použitých pramenů.....	68

Úvod

Slovo vakuum je odvozené z latinského slova *vacuus*, což v překladu znamená prázdný. Dokonalé vakuum, jakožto prostor zcela zbavený látky, je pouze teoretická představa a ve skutečnosti jej nelze dosáhnout. V praxi slovo vakuum tedy znamená menší tlak než je tlak atmosférický.

Vakuová technologie je zaměřená na získávání, měření a udržování vakua pro různé aplikace ve výzkumu a průmyslu. Ve vědě se užívá vakuum zejména ke zvyšování střední volné dráhy elektronů, iontů nebo neutrálních částic pro různá výzkumná zařízení. V průmyslu je vakuum používáno spíše k potlačování nežádoucích procesů, které vznikají především na povrchu látek. Mezi hlavní průmyslová odvětví využívající vakuum patří elektronika (integrované obvody, atd.), elektrotechnika (světelné zdroje, atd.), chemický průmysl (vakuová destilace, pokovování, napařování, atd.) a potravinářský průmysl (konzervace potravin, sušení a podobně). Vakuová technologie pronikla prakticky do všech odvětví lidské činnosti a denně se tak můžeme setkat s výrobky, které nějakým způsobem souvisí s využitím vakua.

K získávání a měření vakua slouží vakuové vývěvy a vakuometry (manometry). Cílem první části práce je tedy kromě seznámení se s fyzikálními principy vakuové techniky, také popis základních typů vývěv a měrek, jejich aplikace a funkčnost. Druhá část práce je pak zaměřená na konkrétní typ difúzní vývěvy jako laboratorní sestavy, její testování a provedení různých experimentálních měření.

Tento text by měl tedy zároveň sloužit jako manuál k celé laboratorní sestavě pro budoucí uživatele.

1. Vakuum

Vakuum je v technické praxi označení pro prostor, v němž je tlak plynu podstatně nižší než normální atmosférický tlak. V teoretické fyzice pojem vakuum znamená stav systému s nejnižší možnou energií. Tedy v ideálním případě je vakuum prostor, v němž není přítomná žádná částice hmoty ani záření. Takové vakuum je označováno jako dokonalé. Pokud dokonalé vakuum neobsahuje ani pole (např. gravitační), mluvíme o tzv. prázdném prostoru. [1, 2]

Vakuum lze zavést v klasické fyzice. Podle kvantové teorie však ani prostor bez jakékoliv hmoty není zcela prázdny, ale neustále v něm vznikají a zanikají páry částic a antičástic. Tyto kvantové jevy souvisí s tzv. energií vakua, která vychází z Heisenbergova principu neurčitosti. [1]

K vymezení vakua používáme jednotky tlaku. Dokonalému vakuu by tedy odpovídala nulová hodnota.

1.1 Tlak

Tlak je fyzikální veličina, kterou obvykle značíme symbolem p . Základní definice tlaku je jednotka síly působící kolmo na jednotku plochy. Tato definice je však pro pochopení fyzikální podstaty tlaku v plynech nedostačující. Fyzikální podstata spočívá v tepelném pohybu molekul plynu, které narážejí na stěny nádoby a tím vytvářejí definovaný tlak. Tato skutečnost vyplývá z kinetické teorie plynů, podle které je tlak definován kinetickou energií molekul v daném objemu, vyjádřenou počtem srážek molekul plynu se stěnami nádoby:

$$p = \frac{z\sqrt{2\pi MRT}}{StN_A}, \quad (1)$$

kde z je počet nárazů molekul plynu na stěnu o ploše S za čas t , N_A je Avogadrova konstanta a MRT je součin molární hmotnosti plynu, univerzální plynové konstanty a teploty. [1]

1.1.1 Jednotky tlaku

Hlavní jednotkou tlaku, odvozenou ze základních jednotek SI, je pascal (Pa), kde

$$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}. \quad (2)$$

Je to tlak, který vyvolá síla jednoho newtonu rovnoměrně rozložená na ploše s obsahem jednoho metru čtverečního kolmé ke směru síly. Existuje mnoho dalších jednotek, kterými lze tlak vyjádřit. Některé z nich jsou velmi často používány (například torr¹), jiné méně, ale lze se s nimi stále setkat například ve starší odborné literatuře. Vedlejší jednotky nejsou odvozeny ze základních jednotek, ale pomocí převodních vztahů (viz tabulka 1).

	Pa	torr	atm	bar	psi	psf	kp·cm⁻²
Pa	1	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,4504 \cdot 10^{-4}$	$2,0885 \cdot 10^{-2}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$
torr	133,322	1	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,9337 \cdot 10^{-2}$	2,7844	$1,3594 \cdot 10^{-3}$
atm	$1,01325 \cdot 10^5$	760	1	1,01325	14,69595	2116,22	1,033227
bar	$1 \cdot 10^5$	750,06	0,98692	1	14,5038	2088,5	1,0197
psi	6894,76	51,715	0,068046	0,068948	1	144,00	0,070306
psf	47,88	0,35913	$4,7254 \cdot 10^{-4}$	$4,788 \cdot 10^{-4}$	$6,9444 \cdot 10^{-3}$	1	$4,882 \cdot 10^{-4}$
kp·cm⁻²	98067	735,58	0,9678	0,98067	14,223	2048,3	1

Tabulka 1: Převodní vztahy pro různé jednotky tlaku. Převzato z [1].

Jednotka torr je hydrostatický tlak jednoho milimetru rtuťového sloupce na hladině moře při teplotě 0 °C. Jednotka atm je fyzikální atmosféra a vychází ze standardního tlaku atmosférického vzduchu. Jednotka psi (libra na čtvereční palec) je definovaná jako tlak odpovídající gravitační síle působící prostřednictvím tělesa o hmotnosti jedné libry na plochu jednoho čtverečního palce na hladině moře. Obdobně jako psi je definovaná jednotka psf (libra na čtvereční stopu). Jednotka kp·cm⁻² (kilopond na centimetr čtvereční) je tzv. technická atmosféra a odpovídá hydrostatickému tlaku deseti metrů vodního sloupce. [1, 4]

¹ Jednotka torr se v textu často vyskytuje z důvodu čerpání ze starší nebo cizojazyčné literatury.

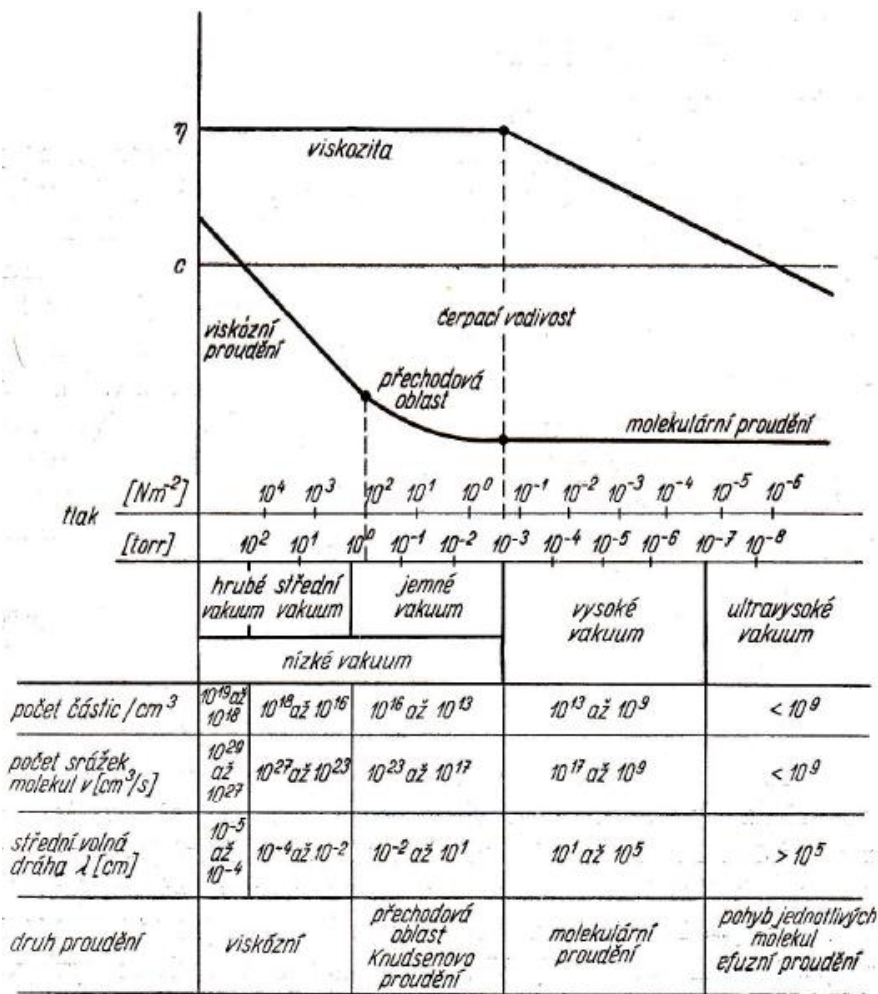
1.2 Dělení vakua

Ve vakuové technice používáme tlaky v rozsahu asi šestnácti řádů, proto je z praktických důvodů užitečné jejich dělení do několika oblastí². Tyto oblasti jsou charakterizovány odlišnými průběhy některých fyzikálních jevů závislých na tlaku. Odlišnými průběhy myslíme změnu viskozity plynu, čerpací vodivosti plynu a střední volné dráhy molekul. [4]

Bylo zjištěno, že při určitém tlaku (přibližně 10^{-3} torr) nastávají zásadní změny ve vlastnostech plynu (viz obrázek 1). Viskozita je do uvedeného tlaku stálá, poté začne lineárně klesat. Čerpací vodivost naopak do uvedeného tlaku klesá a poté se již nemění. Střední volná dráha s klesajícím tlakem roste a od uvedeného tlaku nabývá již hodnot větších než rozměry běžných vakuových potrubí či přístrojů. Můžeme tedy považovat tlak 10^{-3} torr za hranici mezi oblastmi nízkého a vysokého vakua. Všechny tyto změny ve vlastnostech plynu úzce souvisí s jeho druhem proudění. [4]

Oblast nízkého vakua lze dále dělit na hrubé, střední a jemné vakuum. Hrubé a střední vakuum je charakterizováno viskózním prouděním. U jemného vakua se vyskytuje Knudsenovo proudění (přechodová oblast mezi viskózním a molekulárním prouděním). Oblast vysokého vakua je tedy charakterizovaná molekulárním prouděním. Kromě nízkého a vysokého vakua ještě rozlišujeme oblast ultravysokého a extrémně vysokého vakua. [1, 2, 4]

² Dělení vakua do oblastí se může lišit dle použité literatury. Mohou se lišit jak názvy oblastí, tak i hodnoty rozmezí tlaků. Princip dělení však zůstává stejný.



Obrázek 1: Dělení vakua. Převzato a upraveno z [4].

1.3 Základní vztahy

Schopnost proudění plynu ve vakuovém systému, při dané teplotě, je závislá na tlaku plynu (druhu proudění) a na velikosti a geometrii systému. Zavádí se proto bezrozměrný parametr K_n (**Knudsenovo číslo**), pomocí kterého lze určit, o jaký druh proudění plynu se jedná. Toto číslo je definované:

$$K_n = \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

kde λ je střední volná dráha molekul plynu a D je charakteristický rozměr (omezení) vakuového systému, například průměr potrubí, přes který plyn proudí. **Střední volná dráha** je definovaná jako průměrná vzdálenost, kterou molekula musí urazit, aby se srazila s druhou a je nepřímo úměrná tlaku plynu:

$$\lambda = \frac{RT}{p\sqrt{2}\pi\sigma^2 N_A}, \quad (4)$$

kde σ je tzv. kolizní průměr molekuly. Pro vzduch o teplotě 25 °C je střední volná dráha:

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p} \text{ cm}, \quad (5)$$

kde p je tlak v jednotce torr. U vysokého vakua, kde $K_n > 1$ ($\lambda > D$), molekuly narážejí spíše na stěny vakuového systému než mezi sebou. Za těchto podmínek je proudění plynu již nadále nezávislé na tlaku a je určeno výhradně geometrií vakuového systému. Takové proudění nazýváme molekulární. Naopak viskózní proudění, vyskytující se v oblasti nízkého vakua, nastává, je-li $K_n < 0,01$ ($\lambda < 0,01 D$) a tedy molekuly plynu narážejí především mezi sebou. Takové proudění závisí i na viskozitě a tlaku plynu. [1, 2, 4]

Proudění plynu ve vakuovém obvodu má jistou podobnost s obvodem elektrickým. Předpokládejme, že plyn proudí skrz libovolné potrubí, pak pokles tlaku na potrubí je obdobný, jako pokles napětí na rezistoru. Tedy **čerpací odpor** (impedance) potrubí, nebo jakékoli části vakuového obvodu, je definován:

$$Z = \frac{p_A - p_B}{Q}, \quad (6)$$

kde p_A a p_B je tlak na začátku a na konci potrubí. Q je množství plynu, které protéká v jednotce času vakuovým obvodem za konstantní teploty a tlaku. Tato veličina může být měřena v libovolné části vakuového obvodu. Pro ideální plyn platí:

$$Q = p \frac{dV}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{RT}{M}, \quad (7)$$

kde dV/dt (dm/dt) je objem (hmotnost) plynu, protékajícího libovolným průřezem vakuového systému za jednotku času. [2, 4]

Podobně jako v elektrickém obvodu, tak i zde se počítá s převrácenou hodnotou odporu, kterou nazýváme **čerpací vodivost** (schopnost proudění plynu částmi vakuových systémů). Je to množství plynu, tekoucí v jednotce času potrubím, při jednotkovém rozdílu tlaků na koncích potrubí. Čerpací vodivost je dána vzorcem:

$$F = \frac{1}{Z} = \frac{Q}{p_A - p_B}. \quad (8)$$

U molekulárního proudění vodivost nezávisí na tlaku, ale výhradně na geometrii vakuového systému. Vodivost u viskózního proudění závisí jak na geometrii vakuového systému, tak i tlaku. [2, 4]

Máme-li několik potrubí zapojených sériově nebo paralelně, postupujeme podle stejných principů jako u elektrického obvodu s rezistory. Při sériovém zapojení několika potrubí sčítáme čerpací odpory jednotlivých potrubí nebo převrácené hodnoty vodivostí. U paralelního zapojení naopak.

1.4 Čerpací vodivost^[2]

Prostředkem k získávání vakua je tzv. vývěva, kterou si lze představit jako otvor do prostoru s nižším tlakem. Uvažujme tedy vakuový obvod jako dvě velké nádoby s rozdílnými tlaky, spojené otvorem v nekonečně tenké zdi mezi nádobami. Jestliže nádoby A a B jsou stejné teploty, pak molekulární proudění plynu skrz otvor (jakéhokoliv tvaru) můžeme vyjádřit veličinou Q jako:

$$Q = 3,64 \cdot A \cdot (p_A - p_B) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \text{torr} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (9)$$

kde A je plocha otvoru v cm^2 a p je tlak v jednotce torr. Podle vztahu (8) určíme vodivost otvoru, která je pro molekulární proudění daná vztahem:

$$F_o = \frac{Q}{p_A - p_B} = 3,64 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (10)$$

Pokud jsou nádoby A a B spojené dlouhým potrubím s jednotným průřezem (jakéhokoliv tvaru) po celé délce, pak vodivost pro molekulární proudění je dána rovnicí:

$$F_t = 19,4 \cdot \left(\frac{A^2}{HL}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (11)$$

kde A je plocha průřezu, L je délka potrubí a H je obvod. Všechny rozměry jsou v cm. Tato rovnice platí pouze u potrubí, jejichž délka je alespoň stokrát větší než příčné rozměry [2].

Rovnici (11) lze aplikovat na potrubí nejrůznějších specifických tvarů. Nejčastějšími typy jsou například dlouhé válcové potrubí, potrubí ve tvaru mezikruží (koaxiální) nebo potrubí s obdélníkovým průřezem. Vodivost dlouhého válcového potrubí délky L a průměru D je dána vztahem:

$$F_t = 3,81 \cdot \left(\frac{D^3}{L}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad 1 \cdot s^{-1}. \quad (12)$$

Vodivost potrubí ve tvaru mezikruží o průměru vnitřního rozměru D_1 a vnějšího rozměru D_2 je dána rovnicí:

$$F_t = 3,81 \cdot \frac{(D_2 - D_1)^2 (D_2 + D_1)}{L} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad 1 \cdot s^{-1}. \quad (13)$$

Vodivost potrubí s obdélníkovým průřezem s délkami stran b a c je dána vztahem:

$$F_t = 9,7 \cdot \frac{b^2 c^2}{(b + c)L} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad 1 \cdot s^{-1}. \quad (14)$$

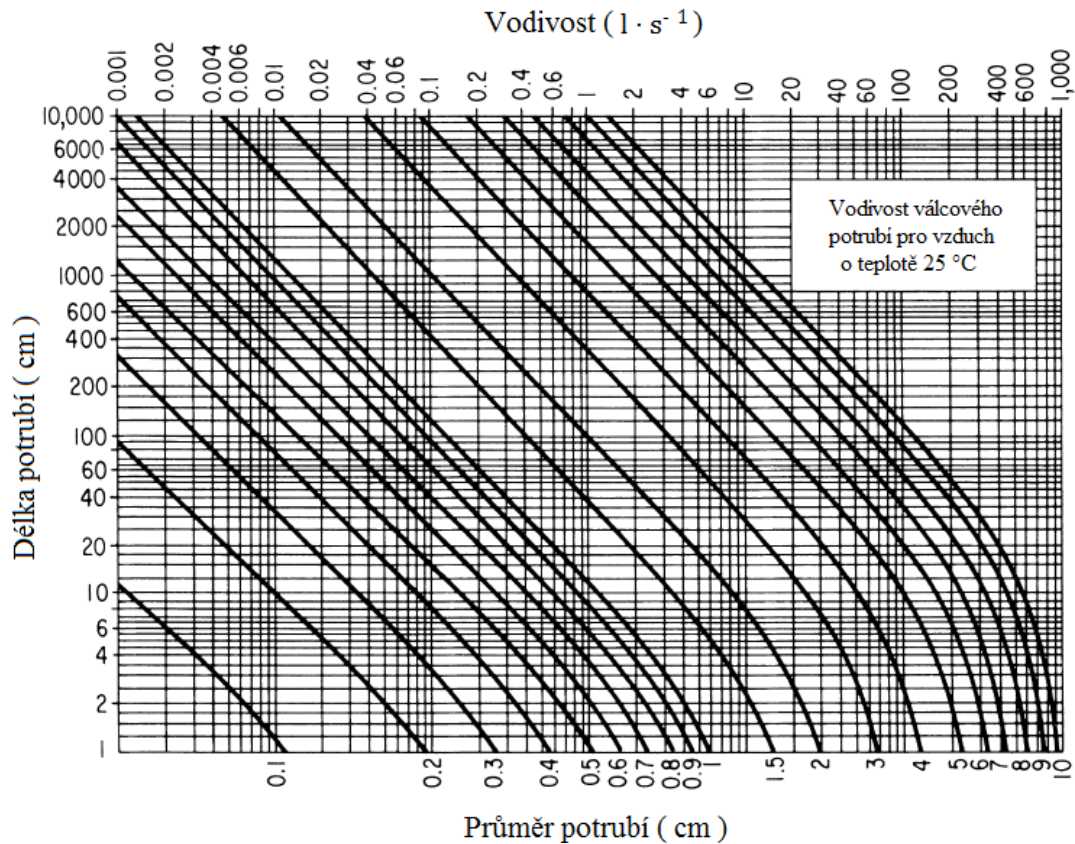
Pro krátké potrubí s jednotným průřezem (libovolného tvaru), kde $L \approx D$, je vodivost pro molekulární proudění dána výrazem:

$$F_{st} = 3,64 \cdot A \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{3,64 \cdot HL}{19,4 \cdot A}}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad 1 \cdot s^{-1}. \quad (15)$$

Tento výraz je obecnějším vztahem k rovnici (11) a lze jej tedy použít i pro dlouhá potrubí. Počítáme-li však s dlouhým potrubím ($L \gg D$), je přínosné výraz (15) zredukovat na jednodušší výraz (11). Tuto rovnici lze také aplikovat na potrubí nejrůznějších tvarů. Nejčastěji používané potrubí je válcové, jehož vodivost je dána výrazem:

$$F_{st} = 2,85 \cdot D^2 \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{3L}{4D}}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad 1 \cdot s^{-1}. \quad (16)$$

Graf vodivosti válcového potrubí v závislosti na délce a průměru, pro vzduch o teplotě 25 °C, je znázorněn na obrázku 2.



Obrázek 2: Vodivost válcového potrubí pro molekulární proudění a vzduch o teplotě 25 °C podle vztahu (16). Převzato a upraveno z [2].

Všechny předchozí rovnice vodivosti jsou založeny na předpokladu, že otvory potrubí jsou malé ve srovnání s rozměry nádob A a B. Pokud tomu tak není, jsou nutné korekce a rovnice tak nabývají jiných tvarů. Například efektivní vodivost otvoru mezi nádobami, z nichž jedna má tvar potrubí:

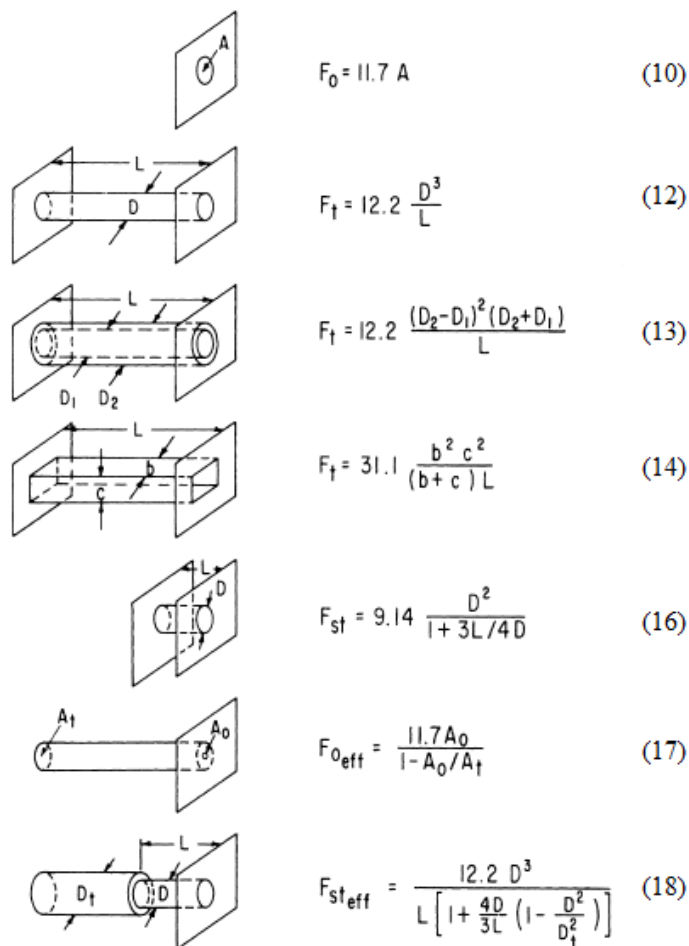
$$F_{0\text{eff}} = F_0 \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{A_0}{A_t}} \right) = 3,64 \cdot A_0 \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{A_0}{A_t}} \right) \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad l \cdot s^{-1}, \quad (17)$$

kde A_0 je plocha otvoru mezi nádobami a A_t je plocha průřezu potrubí. Tuto rovnici lze také aplikovat na otvor mezi nádobami, které jsou obě ve tvaru potrubí. Rovnice platí, pouze pokud rozměry otvoru nepřesáhnou polovinu z rozměru průřezu potrubí [2]. Dalším

příkladem může být efektivní vodivost krátkého válcového potrubí mezi nádobami, z nichž jedna má tvar širšího válcového potrubí:

$$F_{\text{st,eff}} = 3,81 \cdot \frac{D^3}{L} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{4D}{3L} \left(1 - \frac{D^2}{D_t^2} \right)} \right] \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (18)$$

kde D_t je průměr širšího válcového potrubí. Je nutné připomenout, že všechny výše uvedené rovnice platí pouze pro molekulární proudění. Na obrázku 3 je přehled výše zmíněných vodivostí různých vakuových systémů pro vzduch o teplotě 25 °C.



Obrázek 3: Přehled vodivostí v jednotce $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ pro vzduch o teplotě 25 °C podle očíslovaných rovnic. Převzato a upraveno z [2].

Zvýšení impedance způsobené zakřivením potrubí je zanedbatelné do úhlu 90° [2]. V praxi pak vodivost počítáme tak, že zakřivené potrubí bereme jako rovné o stejné délce os.

Pro viskózní proudění jsou rovnice vodivosti složitější. Zvýšení impedance způsobené zakřivením již také nelze zanedbávat. Uvedeme si tedy pouze příklady vodivostí jednoduchých vakuových systémů. Například vodivost rovného válcového potrubí:

$$F_t = 3,21 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{D^4}{\eta L}\right) \cdot p \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (19)$$

kde η je viskozita plynu v jednotce P (poise) a p je aritmetický průměr vstupního a výstupního tlaku v potrubí. Pro vzduch o teplotě 25 °C přejde rovnice (19) na tvar:

$$F_t = 177 \cdot \left(\frac{D^4}{L}\right) \cdot p \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (20)$$

Porovnáme-li rovnice vodivostí molekulárního a viskózního proudění pro válcové potrubí, vidíme, že vodivost pro viskózní proudění je mnohonásobně větší. Tuto skutečnost jsme také očekávali. Vodivost otvoru pro vzduch o teplotě 25 °C je dána vztahem:

$$F_o = 20,3 \cdot \frac{A}{\left(1 - \frac{p_B}{p_A}\right)} \quad \text{l} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (21)$$

Stejně jako u předchozího vztahu, tak i zde je vodivost otvoru větší než u molekulárního proudění. Platnost této rovnice je pouze za podmínky $p_B < 0,525 p_A$ [2].

Procesy v oblasti přechodu mezi viskózním a molekulárním prouděním ($0,01 < K_n < 1$) jsou složité a stejně tak k nim příslušná matematická teorie. Nicméně i zde existuje pár empirických rovnic pro nejjednodušší systémy, jako například vodivost jednoduchého válcového potrubí a podobně.

1.5 Čerpací rychlost

Čerpací rychlost je definovaná jako objem plynu, odčerpávaný z vakuového systému za jednotku času. Čerpací rychlost označujeme symbolem S a je dána vztahem vyplývajícím z rovnice (7):

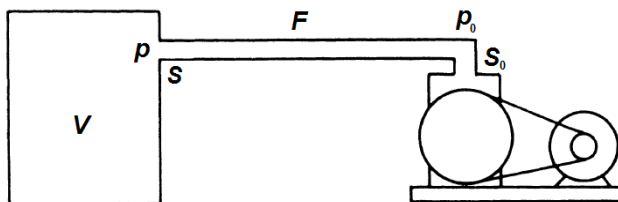
$$S = \frac{dV}{dt} = \frac{Q}{p}. \quad (22)$$

Veličinu Q můžeme měřit v libovolném místě vakuového obvodu, tlak p však měříme přímo u ústí vývěvy. Čerpací rychlost se určuje převážně v litrech za sekundu, má tedy stejný rozměr jako čerpací vodivost. Čerpací vodivost je dána geometrickými rozměry potrubí, čerpací rychlost nikoliv, předpokládá však vnější zdroj energie (vývěvu) a proto oba pojmy nezaměňujeme. [4]

Uvažujme vakuový systém (obrázek 4) složený z nádoby o tlaku p , která je spojena potrubím o čerpacím odporu Z s vývěvou, jejíž čerpací rychlost je S_0 a tlak u ústí vývěvy je p_0 . Budeme vycházet ze vztahu (8). Pokud čerpací rychlost u ústí potrubí do nádoby označíme S , pak platí:

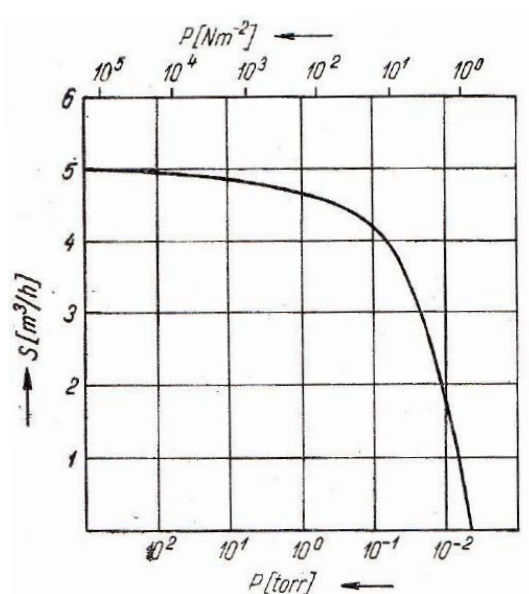
$$\frac{1}{S} = \frac{p}{Q} = \frac{ZQ + p_0}{Q} = Z + \frac{p_0}{Q} = Z + \frac{1}{S_0} = \frac{1}{F} + \frac{1}{S_0}. \quad (23)$$

Tato rovnice je důležitým vztahem pro navrhování vakuových systémů. Určuje efektivní čerpací rychlost S vývěvy o čerpací rychlosti S_0 , je-li připojena na nádobu potrubím s impedancí Z . Pokud je čerpací vodivost mnohem menší než čerpací rychlost vývěvy, pak platí $S \approx F$ a výsledná čerpací rychlost je určena impedancí potrubí. Pokud je vodivost naopak mnohem větší, pak $S \approx S_0$ a čerpací rychlost je určena vývěvou. [2, 4]



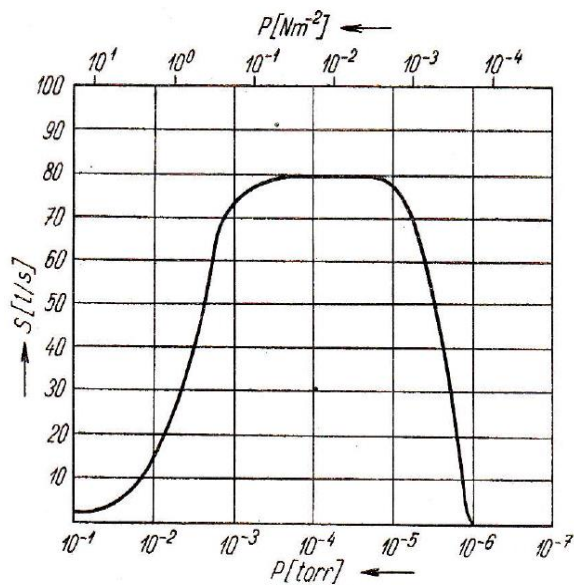
Obrázek 4: Schéma vakuového systému pro výpočet efektivní čerpací rychlosti podle vztahu (23). Převzato a upraveno z [2].

Jelikož žádný vakuový systém není dokonale těsný, neustále tak přisává malé množství plynu. To způsobí, že při určitém dosaženém tlaku (mezní tlak) vývěva již není schopna čerpat, neboť množství odčerpaného plynu se rovná množství přisátého plynu skrz netěsnosti. Přestože vývěva při mezním tlaku stále nasává s určitou čerpací rychlostí, efektivní čerpací rychlost je rovna nule. Efektivní čerpací rychlost vývěvy je tedy značně závislá na tlaku, blížíci se k jeho mezní hodnotě. Změny v průběhu čerpací rychlosti (popř. efektivní čerpací rychlosti) jsou dány podle druhu vývěvy. Zaměříme se tedy pouze na vývěvy v naší laboratorní sestavě (viz obrázky 5 a 6). [2, 4]



Obrázek 5: Závislost efektivní čerpací rychlosti na tlaku u rotačních vývěv.

Převzato z [4].



Obrázek 6: Závislost efektivní čerpací rychlosti na tlaku u difúzních vývěv.

Převzato z [4].

U olejové rotační vývěvy (obrázek 5) vidíme podle očekávání, že se snižováním tlaku v komoře čerpací rychlost klesá. Difúzní vývěva má poněkud složitější průběh. Z obrázku 6 lze tedy vyčíst jistou potřebu předvakua pro správnou funkci difúzní vývěvy.

2. Získávání vakua (typy vývěv)

Vývěvy jsou součástí vakuového systému a jejich úlohou je odvádět molekuly plynu z čerpaného prostoru. Výroba vakua je tedy otázkou zředění plynu.

Vývěvy rozdělujeme podle čerpacích principů na dvě hlavní skupiny³. První skupinou jsou vývěvy pracující na základě přenosu molekul, tedy vývěvy transportní. Druhou skupinou jsou pak vývěvy adsorpční, pracující na základě vazby molekul na svých stěnách. Transportní vývěvy pak můžeme podle způsobu přenosu dále dělit na dvě hlavní skupiny, konkrétně na vývěvy mechanické a vývěvy pracující na základě přenosu impulzu (viz tabulka 2). [3]

Vývěvy	Transportní (vývěvy pracující na základě přenosu molekul)	Mechanické	Pístové	Membránová, atd.
				Kapalinové
				Rotační
				Vodokružní
			Vývěvy pracující na základě přenosu impulzu	Dmychadla
				Rootsovy
	Molekulární (Turbomolekulární)			
	Vodní			
	Ejektorové			
		Difúzní	Oleјové	
		Rtuťové		
	Vývěvy využívající tepelné transpirace a ionizace molekul			
Adsorpční (vývěvy založené na vazbě molekul)	Kondenzační, Sorpční, Iontové			

Tabulka 2: Rozdělení vývěv podle čerpacích principů. Převzato a upraveno z [3].

Nejdůležitějšími charakteristickými vlastnostmi vývěv jsou čerpací rychlost, mezní tlak, mezní výstupní tlak (minimální hodnota předvakua) a kompresní poměr (poměr výstupního tlaku k vstupnímu) [4].

³ Rozdělení vývěv do skupin se často liší dle použité literatury. Principy dělení však opět zůstávají stejné.

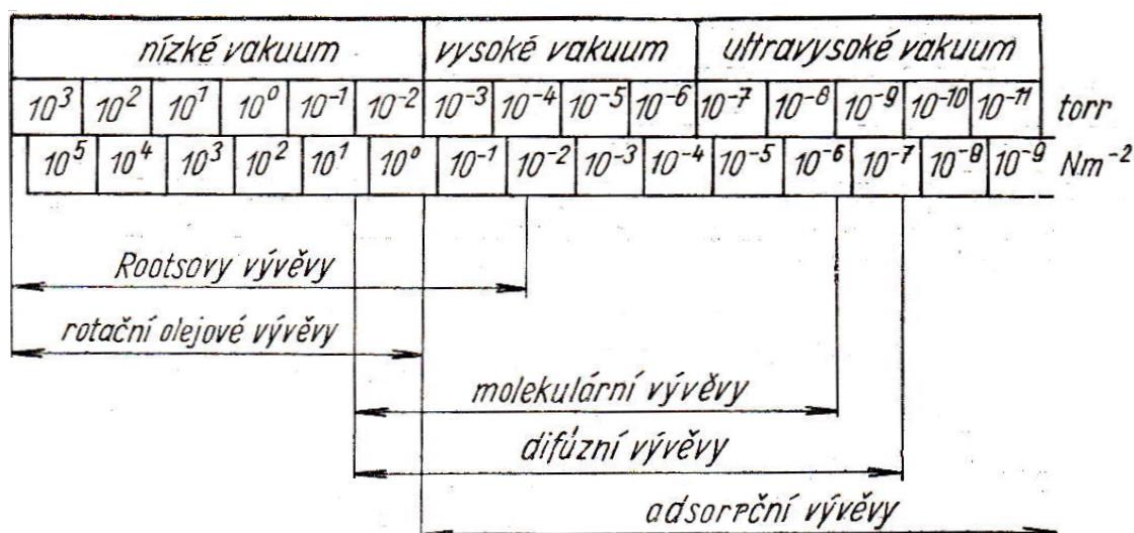
Mezní výstupní tlak neboli minimální hodnota předvakua je označení pro tlak, proti němuž může vývěva pracovat. Čím nižšího tlaku chceme dosáhnout v čerpaném prostoru, tím nižší musí být tlak na výstupní straně (předvakuum). Některé typy vývěv pracují přímo proti atmosférickému tlaku, například pístové nebo rotační, a těch pak využíváme k vytvoření potřebného předvakua pro jiné vývěvy, které to vyžadují. [4]

Mezní tlak je nejnižší hodnota, které může být dosaženo v čerpaném prostoru. U většiny typů vývěv závisí především na hodnotě předvakua. Mezní tlak může být také omezen řadou nežádoucích vlivů, jako například mikroskopické netěsnosti vakuového systému a podobně. [4]

Kompresní poměr vývěvy je poměr výstupního mezního tlaku (předvakua) a vstupního mezního tlaku. Jeho hodnota závisí podstatně na druhu čerpaného plynu. Například pro vodík je mnohonásobně menší než pro vzduch. [4]

Čerpací rychlost vývěvy byla popsána v předchozí podkapitole. Vývěvy lze však charakterizovat mnoha dalšími veličinami a závislostmi, které si již nebudeme uvádět.

Velký rozsah tlaků, jímž musíme při čerpání projít, nám nedovoluje použít pouze jediného způsobu čerpání v celém rozsahu. V praxi proto používáme různé metody čerpání vhodné pro různé rozsahy tlaků (viz obrázek 7).



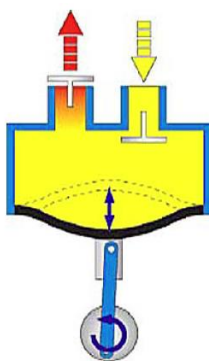
Obrázek 7: Rozsah činnosti různých druhů vývěv. Převzato a upraveno z [4].

2.1 Vývěvy mechanické

Mechanické vývěvy pracují na základě cyklické změny objemu ve vývěvě. Mají tedy pracovní komoru, která v první části cyklu zvětšuje svůj objem (klesá v ní tlak) a čerpá tak plyn ze systému. V druhé části cyklu se komora od systému oddělí, zmenšuje svůj objem (zvyšuje se v ní tlak) a tedy vytlačuje plyn do okolního prostoru. Mechanické vývěvy jsou schopné čerpat bez dalšího pomocného zařízení (bez další vývěvy), tudíž výstupní tlak je roven atmosférickému. Proto jsou označovány jako vývěvy primární nebo předvakuové, jelikož se používají k předčerpávání jiných vývěv. Myšlenka zapojení dvou vývěv do série byla jako první užitá právě u mechanických, a proto vznikly vývěvy dvoustupňové, které mají obecně nižší mezní tlak a větší účinnost. Mechanické vývěvy pak dále dělíme na pístové a rotační. [3]

2.1.1 Vývěvy pístové

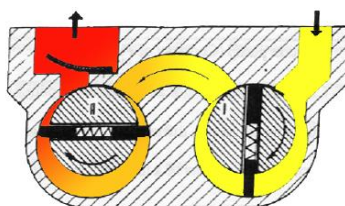
Jedná se o nejstarší druh mechanických vývěv. Jsou složeny z válce, v němž se pohybuje motorem poháněný a olejem těsněný píst pomocí klikového mechanismu. Pístové vývěvy bývají téměř vždy dvoustupňové. Mají velkou čerpací rychlost (až několik tisíc litrů za sekundu), ale naproti tomu vysoký mezní tlak (řádově 10^2 Pa (~ 1 torr) pro dvoustupňové vývěvy). Jsou užívány zejména tam, kde nejsou velké nároky na mezní tlak. Jsou spolehlivé, s dlouhou životností a levné v provozu. Poněkud modernější verzí je tzv. suchá pístová vývěva (membránová). Pohybující se píst je těsněn pružnou kovovou membránou, a tudíž se nevnáší do čerpaného prostoru olejové páry. Díky tomu mají tyto vývěvy ve vícestupňovém uspořádání o řád menší mezní tlak (přibližně 10 Pa ($\sim 0,1$ torr)). Schéma membránové vývěvy je znázorněno na obrázku 8. Existují také pístové vývěvy kapalinové, kde úlohu pístu zastává sloupec kapaliny. Tyto vývěvy se však používají pouze ke speciálním účelům a nebudeme je více rozebírat. [3]



Obrázek 8: Schéma membránové vývěvy. Převzato z [1].

2.1.2 Vývěvy rotační

Střídavý pohyb pístu u pístových vývěv je mechanicky nevýhodný. Počet cyklů za sekundu nelze příliš zvyšovat, neboť zároveň také roste namáhání pístu. Z tohoto důvodu jsou pístové vývěvy vytlačovány účinnějšími vývěvami využívající rotačního pohybu. Hlavním zástupcem je olejová rotační vývěva⁴. Tyto vývěvy jsou užívány nejhojněji. Skládají se z válcové komory, v níž se otáčí válcový rotor, jehož osa otáčení je mimo osu válcové komory. Součástí rotoru jsou dvě lopatky, které jsou pružinami neustále přitlačovány k vnitřní stěně komory. Tímto je prostor komory rozdělen na dvě části, jejichž objem se periodicky zvětšuje a zmenšuje. Princip je tedy podobný jako u pístových vývěv. Olej má zde funkci těsnění a samozřejmě slouží zároveň jako mazivo. Stejně jako pístové vývěvy, tak i rotační bývají nejčastěji dvoustupňové (viz obrázek 9). Mohou dosáhnout mezního tlaku řádově až 10^{-1} Pa ($\sim 10^{-3}$ torr). Čerpací rychlosti jsou v rozmezí jednotek až stovek litrů za sekundu (podle velikosti vývěvy). [3]



Obrázek 9: Schéma dvoustupňové olejové rotační vývěvy. Převzato z [1].

Dokonalejším druhem olejových rotačních vývěv jsou vývěvy s kolujícím rotorem. Ve válcové komoře se otáčí excentricky uložený válec (rotor) kolem osy válcové komory. Rotor se tak při otáčení neustále dotýká vnitřní stěny komory. Tyto vývěvy jsou poněkud složitější a náročnější na výrobu, mají však vyšší účinnost. Ve dvoustupňovém provedení dosahují mezního tlaku až 10^{-2} Pa ($\sim 10^{-4}$ torr). Zajímavým druhem vývěv, které spadají do stejné kategorie rotačních, jsou tzv. vývěvy vodokružní. Prostor mezi rotorem a stěnami válcové komory je těsněn prstencem vody, jenž se utvoří při rychlém otáčení působením odstředivé síly. Otáčky rotoru zde mohou být značně vyšší, neboť jeho lopatky se nedotýkají stěn válcové komory. Tyto vývěvy tedy mají velkou čerpací rychlost (řádově tisíce litrů za sekundu) a používají se zejména k čerpání velkých objemů. [3]

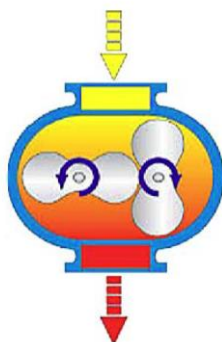
⁴ Tento druh vývěvy je používán v naší laboratorní sestavě jako předstupeň pro difúzní vývěvu.

2.2 Vývěvy pracující na základě přenosu impulzu

Vývěvy pracující na základě přenosu impulzu jsou takové, v nichž je molekulám čerpaného plynu předáván impulz ve směru čerpání. Tím vzniká rozdíl tlaků v prostoru vstupního a výstupního otvoru. Většina vývěv z této skupiny pracuje pouze tehdy, jestliže je tlak na výstupu vývěvy menší než atmosférický. Vývěvy je tedy nutné předčerpávat, a proto jsou označovány jako sekundární nebo vysokovakuové. Nejběžnější druhy vývěv pro tuto skupinu jsou vývěvy Rootsovy, molekulární a difúzní. [3]

2.2.1 Vývěvy Rootsovy

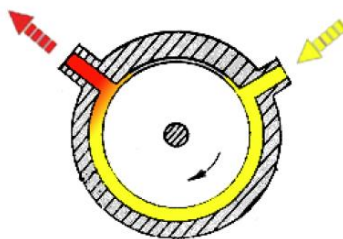
Konstrukce tohoto druhu vývěv spočívá ve dvou rychle otáčejících se rotorů, které jsou v komoře usazeny tak, aby vstupní a výstupní prostory byly od sebe odděleny při jakékoliv poloze rotorů. Mezi oběma rotory a komorou jsou však malé mezery, přes které je plyn přenášen, aniž by docházelo ke stlačování plynu. Rotory těchto vývěv jsou precizně opracovány a usazeny, aby mezery mezi nimi a komorou byly co nejmenší, přitom se však nesmí dotýkat. Nedochozí tedy ke tření, a proto není potřeba užívat mazací látky. Z tohoto důvodu mohou Rootsovy vývěvy pracovat v poměrně vysokých otáčkách (řádově tisíc otáček za minutu). Mezní výstupní tlak (předvakuum) pro tyto vývěvy je přibližně 10^2 Pa (~ 1 torr). Při práci v oboru vyšších tlaků se vývěva silně zahřívá a mohlo by tak dojít k zadření rotorů. Rootsovy vývěvy lze také zapojit do série, a to ze stejných důvodů jako tomu bylo u vývěv mechanických. Ve dvoustupňovém provedení dosahují mezního tlaku až 10^{-3} Pa ($\sim 10^{-5}$ torr). Čerpací rychlost mohou mít řádově až tisíc litrů za sekundu (průmyslové vývěvy velkých rozměrů). Schéma Rootsovy vývěvy je zobrazeno na obrázku 10. Existují i jiná konstrukční provedení, jako například vývěva s rotory ve tvaru šroubovic a podobně. Princip fungování však zůstává stejný. [1, 3, 4]



Obrázek 10: Schéma Rootsovy vývěvy. Převzato z [1].

2.2.2 Vývěvy molekulární

Dalším druhem vývěv pracujících na základě přenosu impulzu jsou vývěvy molekulární. Svoji konstrukcí jsou podobné rotačním olejovým vývěvám, avšak excentricky uložený rotor nemá žádné lopatky a molekuly strhává pouze svými povrchovými nerovnostmi. Mezera mezi rotorem a válcovou komorou je velmi malá (až 0,03 mm) a otáčky rotoru jsou extrémně vysoké (řádově deset tisíc otáček za minutu). Tyto vývěvy tedy potřebují velmi pečlivou výrobu, a jelikož jsou náchylné na nečistoty, jejich použití je omezené. Na rozdíl od Rootsových vývěv však dosahují nižšího mezního tlaku (až 10^{-4} Pa ($\sim 10^{-6}$ torr)), ale vyžadují také vyšší předvakuum. Bez předčerpávání by u tak vysokých otáček mohlo dojít k přehřátí a nevratnému poškození vývěvy. Čerpací rychlost je v řádu jednotek litrů za sekundu, což při stejných rozměrech odpovídá čerpacím rychlostem běžných rotačních olejových vývěv. Schéma molekulární vývěvy je znázorněno na obrázku 11. [3, 4]

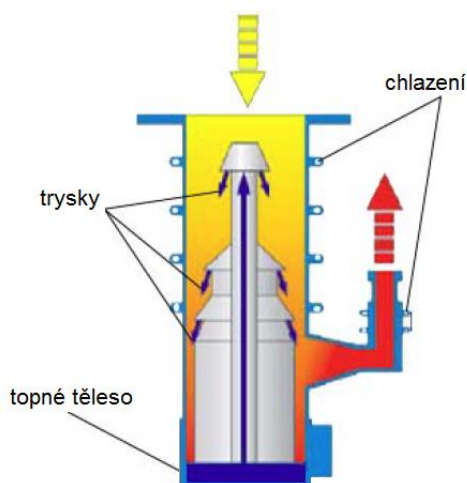


Obrázek 11: Schéma molekulární vývěvy. Převzato z [1].

Poněkud modernější verze molekulárních vývěv jsou tzv. vývěvy turbomolekulární. Mají mnohem složitější konstrukci. Rotor je složen ze soustavy kotoučů, na jejichž obvodě jsou lopatky. Mezi jednotlivými kotouči rotoru jsou statorové vložky, tvořené systémem nepohyblivých lopatek. Lopatky rotoru a statoru jsou uspořádány proti sobě. Princip fungování je stejný jako u vývěv molekulárních, s tím rozdílem, že molekuly plynu jsou strhávány právě pomocí lopatek. Tento typ vývěv je velmi náročný na výrobu, dokáže však čerpat do mezního tlaku až 10^{-8} Pa ($\sim 10^{-10}$ torr). Čerpací rychlost je přibližně sto litrů za sekundu. [3, 4]

2.2.3 Vývěvy difúzní

Předávání impulsu molekulám ve směru čerpaného plynu lze uskutečnit i jinými způsoby, například přiváděním molekul plynu do styku s rychle proudící kapalinou (vodní vývěvy) nebo parou (ejektorové a difúzní vývěvy). Tyto vývěvy tedy nemají žádné pohyblivé části. Nejrozšířenějším typem jsou vývěvy difúzní, které však ke své činnosti vyžadují předvakuum v řádech jednotek až desítek pascalů. Předčerpávání je zajištěno většinou rotační olejovou vývěvou. Pracují na podobném principu jako vývěvy ejektorové, jsou však složitější. Jako pracovní tekutiny využívají olejových nebo rtuťových par, podle čehož je také dělíme na difúzní vývěvy olejové a rtuťové. Vzhledem k převažujícím nevýhodám rtuti jsou dnes používány výhradně olejové náplně. Difúzní vývěva se tedy skládá z varné části, kde se pomocí topného tělesa zahřívá olej, jehož páry jsou vedeny tryskami (dvěma až čtyřmi) do komory vývěvy. Směr proudění olejových par je shodný se směrem proudění čerpaného plynu, který difunduje právě do těchto olejových par. Tato směs je dále unášena do prostoru komory, kde pomocí chlazení (většinou vodního) zkondenzují pouze olejové páry a tím se směs rozdělí. Čerpaný plyn je již nadále odváděn primární vývěvou a zkondenzovaný olej stéká zpět do varné části. Schéma difúzní vývěvy je znázorněno na obrázku 12. S olejovou difúzní vývěvou můžeme dosáhnout mezního tlaku až 10^{-7} Pa ($\sim 10^{-9}$ torr) a s omezováním zpětného proudu par až 10^{-10} Pa ($\sim 10^{-12}$ torr). Čerpací rychlosti mohou být v širokém rozsahu (od jednotek až desítek tisíc litrů za sekundu) podle typu vývěvy, velikosti a účelu použití. [1, 3, 4]



Obrázek 12: Schéma difúzní vývěvy. Převzato a upraveno z [1].

2.3 Vývěvy adsorpční

Metody získávání nízkých tlaků na principu vazby molekul čerpaného plynu se liší od transportních metod tím, že molekuly zůstávají v systému (ve vývěvě). Jde o princip, pomocí kterého lze dosahovat extrémně vysokého vakua. Tyto vývěvy mají však své omezení v počtu vázaných molekul, a tedy v množství čerpaného plynu. Ke své činnosti tak vyžadují předvakuum, jehož hodnota má značný vliv na výsledný mezní tlak. Vývěvy založené na tomto principu je možné shrnout do tří hlavních skupin, kterými jsou vývěvy kondenzační, sorpční a iontové. [3]

Kondenzační metoda je taková, v níž se využívá kondenzace plynů na stěně vývěvy, čímž tlak ve vývěvě klesá. Ke kondenzaci dochází při velmi nízkých teplotách, a proto se této metodě říká těž kryogenní. Účinnost je možné zvýšit tím, že se plyn při nízkých teplotách navíc váže na různých sorbentech (zeolit, aktivní uhlí a podobně) fyzikální adsorpcí. V tomto případě hovoříme o vývěvách kryosorpčních. Tyto vývěvy jsou obvykle tvořeny dvěma izolovanými nádobami obsahující kapalný dusík a kapalné hélium. Vnější nádoba je plněna levnějším kapalným dusíkem, aby tepelně izolovala vnitřní nádobu plněnou dražším kapalným héliem, která je již spojena s kondenzační plochou. Vývěvy tohoto typu jsou obecně jednoduché konstrukce, poskytují velkou čerpací rychlost, čisté vakuum a lze s nimi dosáhnout mezních tlaků nižších než 10^{-10} Pa ($\sim 10^{-12}$ torr). Nevýhodou je však vysoká cena chladiv a jejich spotřeba během provozu. [1, 3]

Dalším druhem jsou tzv. vývěvy sorpční. Jedná se o metodu využívající chemisorpce molekul čerpaného plynu na povrchu kovu, který má velkou chemickou afinitu k složkám zbytkových plynů. Vazby mezi plynem a povrchem kovu se utvářejí i při normálních teplotách a není tedy nutno používat nákladných chladiv. Nejpoužívanějšími kovy jsou například vysoce čistý titan, molybden, wolfram a podobně. Tyto vývěvy mají o něco složitější konstrukci, neboť vrstva aktivního kovu se nanáší (například rozprašováním) až během jejího provozu. Parametry (mezní tlak, čerpací rychlost, atd.) jsou podobné jako u vývěv kondenzačních. [3]

Posledním druhem jsou tzv. vývěvy iontové. Pracují na principu ionizace molekul čerpaného plynu a následné vazbě vzniklých iontů na záporně nabitým povrchem. Urychlené ionty dopadající na záporně nabitý povrch vnikají do určité hloubky, kde jsou buď vázány na poruchách krystalické mříže, nebo v látce rekombinují a chovají se v ní jako

absorbované atomy nebo molekuly. Samostatné iontové čerpání nemá příliš uplatnění, významné je však v kombinaci s metodou sorpční. Urychlené ionty jsou pak pomocí chemisorpce vázány s větší energií a lze tak dosáhnout ještě nižšího mezního tlaku a větší čerpací rychlosti. Obecně všechny tři popsané adsorpční metody lze mezi sebou kombinovat pro dosažení větší účinnosti. [3]

3. Měření vakua (typy vakuometrů)

Metody měření nízkých tlaků jsou založeny na nejrůznějších principech. Všechny metody lze však shrnout do dvou skupin, jako absolutní měřicí metody a měřicí metody nepřímé⁵. Absolutní měřicí metody jsou takové, při nichž je možno zjistit hodnotu tlaku buď přímo z údaje měřicího přístroje, nebo výpočtem podle vztahu vyplývajícího z měřicího principu přístroje a nikoliv charakteristiky měřeného plynu. U nepřímých měřících metod se tlak určuje pomocí jiné veličiny, která je závislá na tlaku. Všechny známé nepřímé metody užívají k měření tlaku veličin, které nejsou funkcí jenom tlaku, ale funkcí i jiných veličin charakterizujících plyn. Hodnota tlaku je tedy závislá na druhu měřeného plynu. [3]

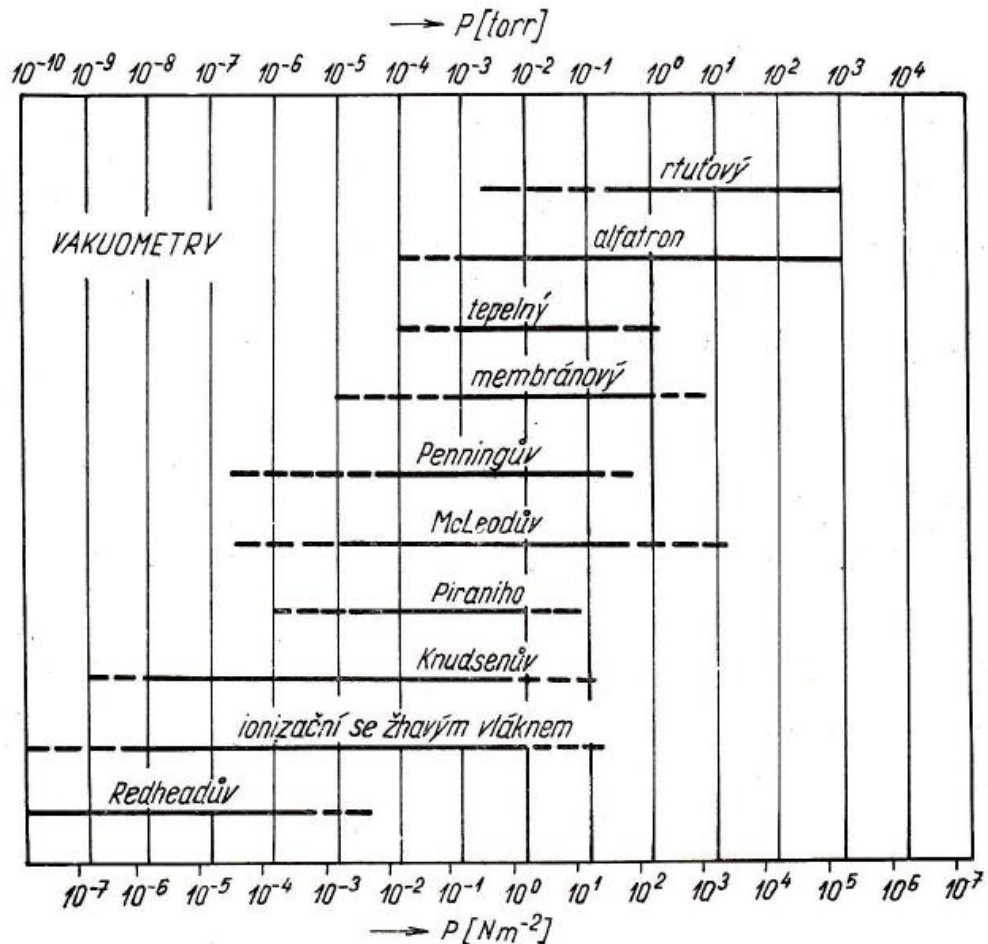
Měřicí metodu posuzujeme podle několika hlavních požadavků, kterými jsou měřicí obor (rozsah tlaků, v němž je možno metodu použít), citlivost metody, přesnost metody, doba odezvy a vliv měřicího přístroje na hodnotu tlaku a složení plynu v měřeném systému. Nejvýhodnější měřicí metoda je tedy taková, která má největší měřicí obor, velkou citlivost, přesnost, krátkou dobu odezvy a která nijak neovlivňuje měřený objekt. [3, 4]

Vakuometry	Založené na absolutních měřících metodách	Kapalinové	U-manometr (rtuťový), atd.
		Membránové	Kapacitní, atd.
		Kompresní (McLeodův)	
		Molekulární (Knudsenův)	
	Založené na nepřímých měřících metodách	Založené na přenosu impulzu (Langmuirův-Dushmanův)	
		Tepelné	Pirani, termočlánekový
		Ionizační	Se žhavenou katodou, se studenou katodou (Peeningův, Redheadův), s radioaktivním zářičem (alfatron), atd.
		Sorpční	

Tabulka 3: Rozdělení vakuometrů podle měřících principů. Převzato a upraveno z [3].

⁵ Dělení vakuometrů se opět liší dle použité literatury.

Rozsah tlaků používaných ve vakuové technice je v rozmezí šestnácti řádů. Z hlediska fyzikálních principů je nemožné sestavit vakuometr, který by pracoval v celém tomto rozmezí, a proto existuje mnoho vakuometrů založených na různých principech. Každý takový vakuometr pracuje pouze v určitém omezeném rozsahu tlaků (viz obrázek 13). [4]

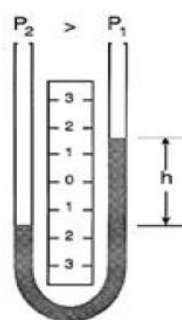


Obrázek 13: Rozsah použití různých vakuometrů. Převzato z [4].

3.1 Vakuometry kapalinové

Mezi nejnámější patří rtuťový U-manometr. Jedná se o nejjednodušší měřicí metodu. Trubice ve tvaru „U“ je naplněna rtutí (používají se i jiné kapaliny), kde jedno rameno trubice je připojeno k systému, v němž měříme tlak, a druhé rameno je spojeno se systémem, v němž hodnotu tlaku známe. Rozdíl tlaků je určen rozdílem výšek hladin kapaliny (viz obrázek 14). Na tomto principu existuje celá řada manometrů, například U-manometry otevřené nebo uzavřené (jedno rameno je zaslepeno), různé tvary a způsoby odečtu rozdílu hladin (např. optické metody) a podobně. Hlavní předností těchto

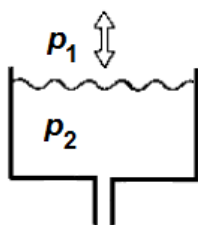
manometrů je poměrně jednoduchá konstrukce a pohotovost k měření. K měření vakua se používají až do hodnot 10^{-1} Pa ($\sim 10^{-3}$ torr). [3]



Obrázek 14: Schéma U-manometru. Převzato z [1].

3.2 Vakuometry membránové

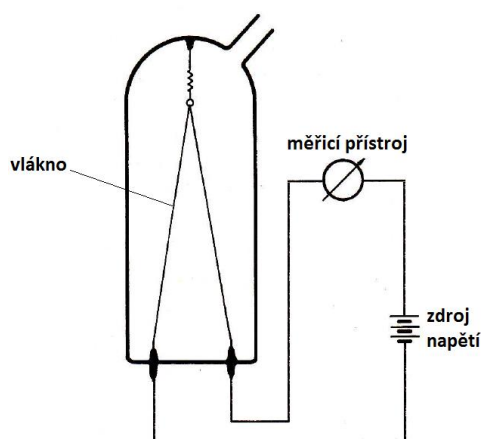
Další skupinou jsou vakuometry membránové, které fungují na principu měření výchylky pružné stěny (membrány) při působení tlakového rozdílu na oba její povrchy (viz obrázek 15). Membrána může mít různé podoby, například tvar trubice s vlnitým povrchem (tzv. vlnovec), jejíž délka se mění v závislosti na rozdílu tlaků uvnitř a vně trubice. Jejich velkou výhodou je, že neovlivňují měřený systém. Hlavním konstrukčním problémem je však způsob stanovení výchylky pružné membrány z rovnovážné polohy. Toto lze řešit například optickou cestou (zrcátková metoda) nebo jednoduššími elektrickými metodami, z nichž nejvhodnější je metoda kapacitní, využívající změn kapacity mezi membránou a referenční elektrodou. Je popsána celá řada konstrukcí membránových manometrů s měřením kapacity. S některými druhy je možné měřit vakuum až do hodnoty 10^{-3} Pa ($\sim 10^{-5}$ torr). Jiné elektrické metody ke stanovení výchylky membrány jsou piezoelektrické popřípadě odporové. [1, 3]



Obrázek 15: Schéma membránového vakuometru. Převzato z [1].

3.3 Vakuometry tepelné

Tyto vakuometry jsou založeny na principu odvodu tepla z vodiče (tenké vlákno) zahříváného elektrickým proudem. Teplo je tedy přenášeno molekulami zbytkového plynu. Přenos tepla závisí na hustotě plynu a tudíž i na jeho tlaku. Schéma tepelného vakuometru, též nazývaného jako Pirani, je znázorněno na obrázku 16. Čím vyšší tlak měříme (větší množství molekul plynu), vlákno má menší teplotu (menší odpor) a tedy zaznamenáváme větší elektrický proud. Citlivost manometru závisí na teplotní závislosti odporu vlákna, a proto se někdy místo kovového vlákna užívá termistorů (polovodiče) se strmou teplotní závislostí. Jiným typem tepelného vakuometru je například termočlánek, který je založený na stejném principu, změnu teploty však měříme termočlánekem. Tepelnými vakuometry obvykle měříme tlaky do 10^{-1} Pa ($\sim 10^{-3}$ torr), některé speciální druhy mohou měřit až do tlaku 10^{-3} Pa ($\sim 10^{-5}$ torr). Výhodou těchto měrek je jejich jednoduchost a tedy nižší cena. Nevýhodou je, že nejsou absolutní a pro různé druhy plynů se musí kalibrovat. [1, 3, 4]



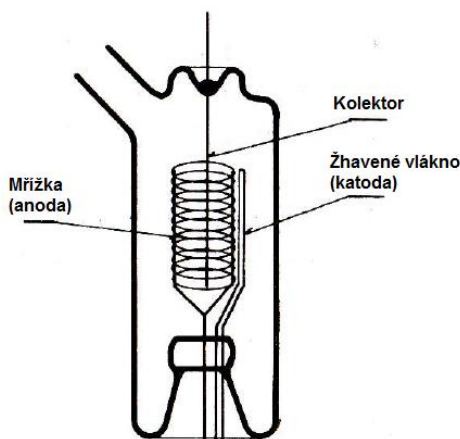
Obrázek 16: Schéma tepelného vakuometru (Pirani). Převzato a upraveno z [3].

3.4 Vakuometry ionizační

Jedná se o metodu měření vakua, v současné době asi nejrozšířenější, založenou na principu ionizace molekul plynu. Měříme tedy elektrický proud mezi elektrodami realizovaný pohybem vzniklých elektricky nabitých částic (iontů). Molekuly čerpaného plynu jsou ionizovány v prostoru vakuometru různými způsoby, například při srážce elektronu s molekulou nebo kladného iontu s molekulou (ionizace nárazem), při dopadu záření na molekulou (fotoionizace) nebo působením velmi silného elektrického pole. Podle

způsobu ionizace pak tyto vakuometry také dělíme. Mezi nejznámější patří ionizační vakuometr se žhavenou katodou, se studenou katodou (Penningův) a s radioaktivním zářičem (alfatron). [1, 3, 4]

Ionizační vakuometr se žhavenou katodou (viz obrázek 17) se obvykle skládá z vlákna žhaveného elektrickým proudem (katoda), mřížky (anoda) a kolektoru. Žhavená katoda je zdrojem elektronů, které jsou přitahovány (a zároveň tak urychlovány) k anodě. Jelikož je anoda mřížková, část elektronů jí bude procházet s určitou energií, postačující k ionizaci molekul plynu (ionizace nárazem). Vznikající kladné ionty jsou pak přitahovány kolektorem nabitým záporně vzhledem ke katodě. Měříme tedy elektrický proud procházející obvodem kolektoru a katody. Tento typ vakuometrů se běžně používá k měření tlaků od 10^{-1} Pa ($\sim 10^{-3}$ torr) až 10^{-6} Pa ($\sim 10^{-8}$ torr), po speciálních úpravách dokáží měřit tlak až 10^{-9} Pa ($\sim 10^{-11}$ torr). Výhody jsou velký rozsah měření, okamžité a spojité údaje a malý objem měřky. Nevýhodou je riziko spálení katody při náhlém vniknutí vzduchu do systému. [3, 4]



Obrázek 17: Schéma ionizačního vakuometru se žhavenou katodou. Převzato a upraveno z [3].

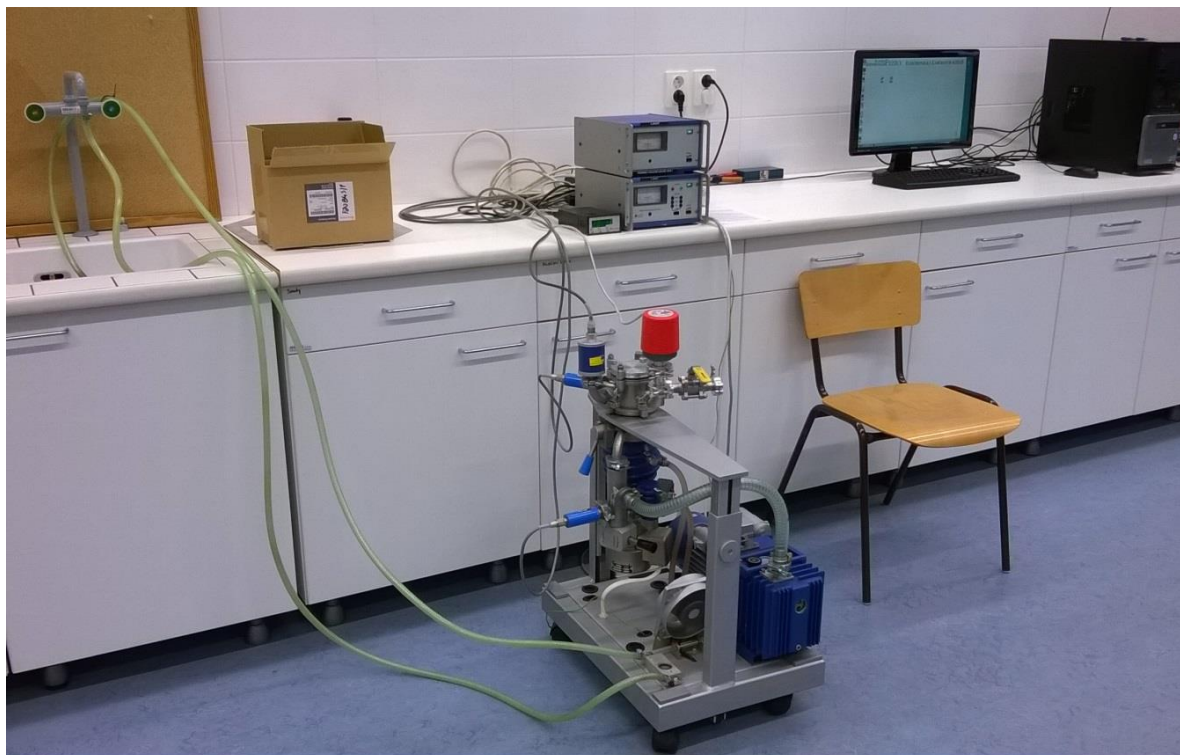
Dalším typem je ionizační vakuometr se studenou katodou (Penningův). Jako zdroj elektronů využívá výboj v elektrickém poli, který lze udržet i při velmi nízkých tlacích pomocí silného magnetického pole, jenž nutí elektrony kroužit po šroubovitéch drahách a tím zvýší pravděpodobnost srážek elektronů s molekulami velmi zředěného plynu (ionizace nárazem). Tento větší počet srážek se projeví jako znatelné zvětšení proudu, tekoucího měrkou, který měříme. Díky silnému magnetickému poli činí dráha elektronů i několik desítek metrů. Konstrukčních řešení (vzájemné uspořádání elektrod, atd.) tohoto

typu měrek je mnoho. Měřicí rozsah je přibližně stejný jako u ionizačních vakuometrů se žhavenou katodou. Se speciální konstrukční úpravou, kterou navrhl Redhead, lze měřit i velmi nízké tlaky řádově až 10^{-12} Pa ($\sim 10^{-14}$ torr). Výhody těchto vakuometrů jsou stejné jako u předchozího typu, navíc však nehrozí poškození měrky při náhlém vniknutí vzduchu do systému. Funkčnost měrky se tak s časem prakticky nemění. [1, 3, 4]

Posledním typem, který si popíšeme, je ionizační vakuometr s radioaktivním zářičem (alfatron). Princip fungování je obdobný jako u předchozích typů, k ionizaci molekul však dochází pomocí malého množství radioaktivního materiálu (s dlouhým poločasem rozpadu) uvnitř měrky, který je zdrojem α -částic. Iontový proud opět měříme pomocí elektrod v závislosti na tlaku plynu. Měřicí rozsah tohoto typu vakuometrů je obvykle od 10^{-2} Pa ($\sim 10^{-4}$ torr) až do atmosférického tlaku (některé speciální typy mohou měřit i tlaky nižší). Výhodou je velký měřicí rozsah a odolnost. Nevýhodou je poměrně vysoká cena a značná závislost údaje na druhu měřeného plynu. [1, 3, 4]

4. Laboratorní sestava

Celá laboratorní sestava (viz obrázek 18) je složena z difúzní vývěvy, rotační olejové vývěvy, vakuometru Pirani s dvěma měrkami a dvou vakuometrů Penning.



Obrázek 18: Fotografie laboratorní sestavy.

Na obrázku 18 lze vidět uložení sestavy na pojízdném stojanu, jehož součástí je také ventilátor jako přídavné chlazení k difúzní vývěvě. Dále si můžeme všimnout jednoduchého připojení vodního chlazení pomocí přítokové a odtokové hadice. Difúzní vývěva je s vývěvou rotační spojena skrz třicestný ventil s ručním ovládním, jenž umožňuje použití rotační vývěvy k samostatnému čerpání obtokovým potrubím difúzní vývěvy. Třicestný ventil má tedy celkem tři připojovací příruby a čtvrtou přírubu určenou k připojení měrky vakuometru Pirani, která měří tlak na předvakuovém hrdle difúzní vývěvy. Druhá měrka již měří tlak čerpaného prostoru, stejně jako další dva vakuometry Penning. Základní čerpaný prostor je dutý válec z nerezavějící oceli s pěti bočními přírubami, připevněný na vysokovakuovém vstupu difúzní vývěvy. K přírubám jsou připojeny kromě měrek také kulový kohout a jehlový ventil. Kulový kohout slouží jako

uzavírací ventil ve vakuových rozvodech. Jehlový ventil slouží k připouštění vzduchu (popřípadě jiného plynu) do čerpaného prostoru s velmi jemnou regulací průtoku.

4.1 Použitelnost a zacházení s laboratorní sestavou

Difúzní vývěva má v sérii zapojenou mechanickou rotační olejovou vývěvu, která zde slouží jako předstupeň, popřípadě k samostatnému čerpání obtokovým potrubím. Důležité je, aby pro správnou funkci difúzní vývěvy dokázala vytvořit vakuum o hodnotě 50 Pa (~ 0,5 torr) a menší [6]. Čím lepšího předvakua na výstupu difúzní vývěvy dosáhneme, tím vyšší bude její čerpací rychlost a částečně i nižší mezní tlak.

Laboratorní sestava zahrnuje nejběžnější provozní vakuometry pro nižší a pro vyšší vakuum. Pro nižší vakuum to jsou měrky Pirani a pro vyšší vakuum měrky Penning. Měrky Pirani se v laboratorní sestavě používají zejména pro měření (kontrolu) tlaku předvakua (výstupní tlak) a předčerpaného prostoru (vstupní tlak) rotační vývěvou. Měrky Penning jsou zde jako hlavní vakuometry pro zjišťování aktuálně dosaženého tlaku difúzní vývěvou.

Při provozu laboratorní sestavy musíme dbát určitých pravidel a opatrně s ní zacházet, neboť jak difúzní vývěva, tak vakuové měrky mohou být náchylné na poškození. Proto musíme dodržovat určitý stanovený postup, který nazýváme čerpací harmonogram. Je to v podstatě časová posloupnost jednotlivých úkonů, jako jsou spouštění jednotlivých vývěv, nastavování pozic ventilů mezi vývěvami, popřípadě spouštění jednotlivých měrek. Nedodržením čerpacího harmonogramu může dojít k nevratnému poškození zařízení. Například napuštěním atmosférického vzduchu na horký olej difúzní vývěvy můžeme způsobit jeho znehodnocení a podobně.

4.1.1 Čerpací harmonogram^[5]

Základní stav, při kterém bychom měli čerpací soustavu před započítím práce nalézt, je totožný se stavem, kterým bychom měli sami končit. Tedy obě vývěvy jsou vypnuty a třífázový ventil je v pozici, kdy difúzní vývěva je oddělena od rotační a přitom je rotační vývěva spojena s atmosférickým tlakem (na vstupu i výstupu). Z toho plyne, že difúzní vývěva by měla zůstat po ukončení činnosti pod vakuem, protože olej v ní by měl chladnout pod vakuem z důvodu minimální oxidace. Rotační vývěva musí být od difúzní

oddělena a spojena s atmosférickým tlakem, jinak by došlo při jejím vypnutí k pozvolnému nasávání oleje z rotační vývěvy do difúzní, což by způsobilo havarijní stav.

Pro zahájení provozu laboratorní sestavy nejprve zapneme rotační vývěvu a ventil nastavíme do polohy, kdy jsou obě vývěvy zapojené v sérii. Poté zapneme měрку Pirani a měříme tlak. Pokud je vakuum pro použítou měрку stále malé (mimo měřicí rozsah), vypneme ji, aby nedošlo k jejímu poškození. Počkáme přiměřenou dobu a poté opakujeme.

Jestliže dosáhneme dostatečného předvakua, jakožto mezního tlaku použité rotační vývěvy (přibližně 5 Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ torr)), můžeme zapnout topné těleso difúzní vývěvy. Předtím však spustíme chlazení, a to jak pomocí průtoku vody, tak pomocí přídavného ventilátoru. Průtok nastavíme tak, aby voda na odtoku byla vlažná na dotek (kontrolujeme průběžně). Nedostatečné nebo naopak nadměrné chlazení může snížit účinnost vývěvy⁶.

Doba náběhu difúzní vývěvy je poměrně dlouhá (přibližně 15 minut). Čím déle je vývěva v provozu, tím lépe čerpá, jinak řečeno rychleji dosáhne mezního tlaku. Dále bylo pozorováno, že doba náběhu závisí také na tom, jak často je vývěva používána. Při dlouhé době nečinnosti může difúzní vývěva dočasně nebo i trvale ztratit svoje čerpací schopnosti.

Během čerpání difúzní vývěvou průběžně sledujeme vakuometr Pirani a podle potřeby přejdeme k vakuometru Penning. Dále pak měříme, zda se vakuum postupně blíží k mezní hodnotě $5 \cdot 10^{-4}$ Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$ torr) [6]. Pokud se vakuum dlouhodobě nezlepšuje, nejspíš se bude jednat o závadu v netěsnosti, a proto difúzní vývěvu vypneme (podle následujícího odstavce), neboť bychom olej vývěvy zbytečně zahřívali a vystavovali tak oxidaci.

Chceme-li provoz laboratorní sestavy ukončit, postupujeme tak, že nejdříve vypneme topení difúzní vývěvy, poté nastavíme třicestný ventil do polohy, aby uzavřel spojení mezi vývěvami a otevřel rotační vývěvu atmosférickému tlaku (na vstupu i výstupu). Následně vypneme rotační vývěvu. Difúzní vývěva tedy zůstane pod vakuem a pomalu chladnoucí olej tak není vystaven zbytečné oxidaci. Oddělením rotační vývěvy od difúzní zabráníme postupnému nasávání oleje z rotační vývěvy do difúzní. Jako poslední krok uzavřeme průtokové chlazení a vypneme ventilátor. S tímto krokem však nespěcháme. Čím rychleji vychladíme olej difúzní vývěvy, tím účinněji zabráníme jeho oxidaci.

⁶ Při experimentu s regulací průtoku vody nebyly zaznamenány žádné výrazné změny.

4.2 Difúzní vývěva D 130 (LAVAT)^[6]

Vývěva difúzní D 130 je vysokovakuový čerpací systém s ručním ovládním ventilu. Je určena pro čerpání neagresivních plynů a par z uzavřených prostorů na tlak vysokého vakuu. Čerpané plyny ani páry nesmí ve vývěvě chemicky reagovat. Vývěva má třídlný tryskový systém s vodou chlazeným lapačem olejových par (jednoduchého kloboučkového tvaru), který obklopuje horní trysku difúzní vývěvy. Na vysokovakuovém vstupu je ventil typu „motýlek“ s ručním ovládním. Nad ventilem je zavařena trubka obtokového potrubí, která je zakončena přírubou pro rychlopoj. Plášť vývěvy je vyroben z nerezavějících ocelí a je chlazený vodou, protékající měděným potrubím svinutým kolem pláště. Měď je zde používána z důvodu velké teplené vodivosti. Chladicí potrubí je též svinuto kolem předvakuového hrdla (expanzní nádobka), které má na boku opět výstupní přírubu pro rychlopoj. Teplota odpadní vody by měla mít přibližně 25 °C. Vývěva pracuje pouze ve svislé poloze (jako každá difúzní vývěva) a při provozu s ní nesmí být manipulováno. Vývěva může být plněna pouze olejem DC 704 a je určena pro nepřetržitý provoz. Parametry vývěvy jsou shrnuty v tabulce 4.

Min. čerpací rychlost v rozsahu tlaků 10^{-1} Pa až 10^{-3} Pa (pro vzduch)	$110 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$
Mezní tlak	$5\cdot 10^{-4}$ Pa ($3,75\cdot 10^{-6}$ torr)
Mezní tlak nekondenzujících plynů a par	$5\cdot 10^{-5}$ Pa ($3,75\cdot 10^{-7}$ torr)
Max. tlak na předvakuovém hrdle	$5\cdot 10^1$ Pa ($3,75\cdot 10^{-1}$ torr)
Těsnost ventilu „motýlek“	$1\cdot 10^{-4}$ Pa \cdot l \cdot s $^{-1}$ ($7,5\cdot 10^{-7}$ torr \cdot l \cdot s $^{-1}$)
Náplň oleje DC 704	55 ml
Spotřeba chladicí vody (20 °C)	1 litr za minutu
Napájecí napětí	230 V / 50 Hz
Výkon / příkon topné desky	520 W / 550 W

Tabulka 4: Parametry difúzní vývěvy D 130 (LAVAT). Převzato a upraveno z [6].

Ztráty čerpací kapaliny vstupním a předvakuovým hrdlem jsou minimální. S provozní dobou však kapalina ubývá, úbytek se projeví zhoršením (popřípadě kolísáním) mezního tlaku. V tomto případě se doplní 10 ml čerpací kapaliny.



Obrázek 19: Difúzní vývěva D 130 (LAVAT).

4.3 Rotační vývěva VRO 05/21 (LAVAT)^[7]

Jedná se o dvoustupňovou rotační olejovou vývěvu s podtlakovým mazáním, proto je vhodná pouze pro sání z uzavřeného prostoru. Nesmí se s ní tedy dlouhodobě čerpat vzduch pod atmosférickým tlakem. Provozní teplota je v rozmezí 15 °C až 60 °C (maximální dovolená teplota oleje). Maximální rychlost čerpání je 80 litrů za minutu (při atmosférickém tlaku). Mezní tlak je 0,2 Pa (platí pro novou a neopotřebovanou vývěvu). Napájení je z elektrické sítě 230 V. Jako mazivo se používá běžný transformátorový olej (pro dosažení větší účinnosti lze použít i dražších a kvalitnějších olejů). Hladinu oleje lze kontrolovat pomocí okénka na přední straně vývěvy.



Obrázek 20: Olejová rotační vývěva VRO 05/21 (LAVAT).

4.4 Vakuometr Pirani VPR 1 (LAVAT)^[8]

Tento vakuometr slouží k měření totálních tlaků neagresivních plynů a par v rozsahu 10^5 Pa ($\sim 10^3$ torr) až 10^{-1} Pa ($\sim 10^{-3}$ torr). Měřený tlak je odečítán na ručičkovém měřidle s dvojitou stupnicí (viz obrázek 21). Součástí laboratorní sestavy jsou dvě měrky tohoto typu s jedním zdrojem (skříň s napájecími, ovládacími a vyhodnocovacími obvody), kde jsou souběžně zpracovávány a z konektorů mohou být nezávisle odebírány výstupy signálů z obou měrek bez ohledu na to, kterou měrku vyhodnocuje měřidlo. Napětí výstupního signálu má rozsah 0 V až 10 V. Napájení je z elektrické sítě 230 V. Vakuometr je vhodný pro použití v laboratorním i výrobním provozu.

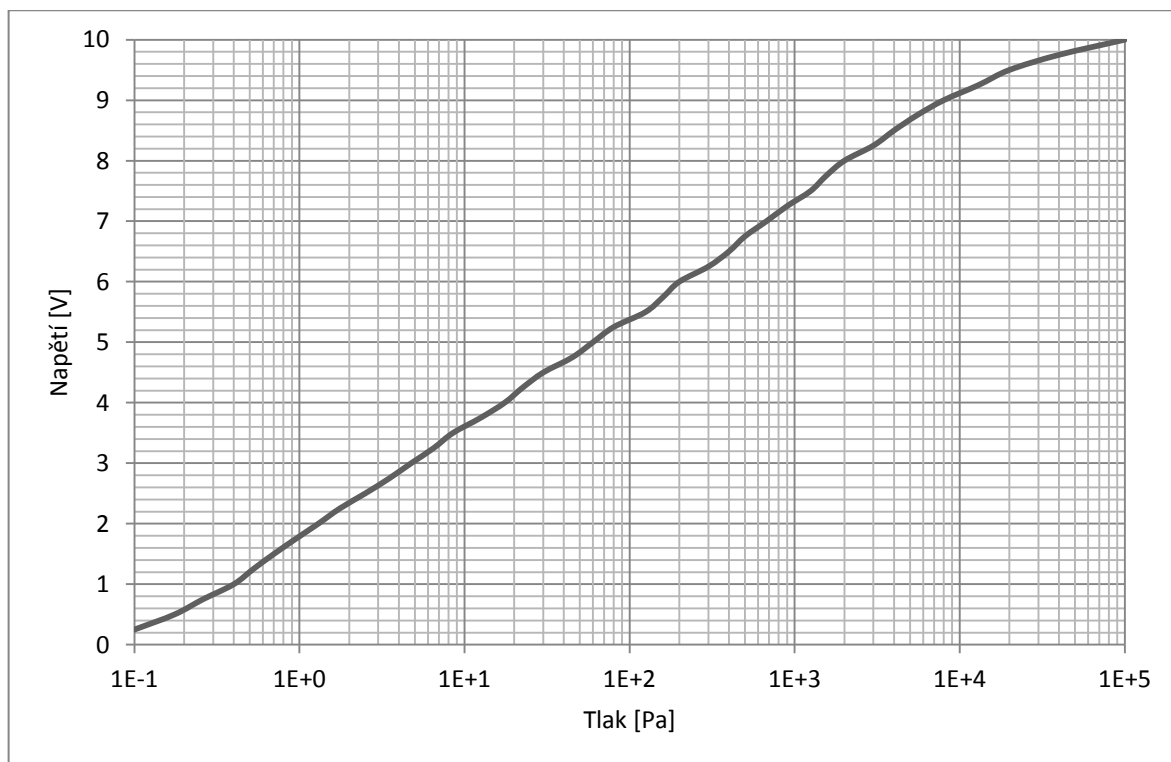


Obrázek 21: Zdroj pro vakuometr Pirani VPR 1 (LAVAT).

Těleso měrky je nerozebíratelný svařenec (trubka) z nerezavějící oceli, který je na jednom konci opatřen přírubou pro rychlospoj. Na druhém konci je vakuová průchodka pro připojení konektoru. Kolem tělesa měrky je připevněný vnější plášť. Měrka je zobrazena na obrázku 22. Poloha montáže je libovolná.



Obrázek 22: Měrka vakuometru Pirani VPR 1 (LAVAT).



Graf 1: Závislost výstupního napětí na tlaku pro vakuometr Pirani VPR 1 (LAVAT).
Převzato a upraveno z [8].

4.5 Vakuometr Penning VPG 1 (LAVAT)^[9]

Přístroj slouží k měření totálních tlaků neagresivních plynů a par v rozsahu $5 \cdot 10^{-1}$ Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ torr) až $5 \cdot 10^{-6}$ Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-8}$ torr). Přístroj je vybaven jednou měrkou a zdrojem (skříň s napájecími, ovládacími a vyhodnocovacími obvody). Měřený tlak lze odečítat na ručičkovém měřidle, které je součástí zdroje (viz obrázek 23). Pomocí konektoru zdroje můžeme odebírat výstupní signál z měrky. Napětí výstupního signálu má rozsah 0 V až 10 V. Napájení je z elektrické sítě 230 V. Přístroj je vhodný pro použití v laboratorním nebo výrobním provozu.

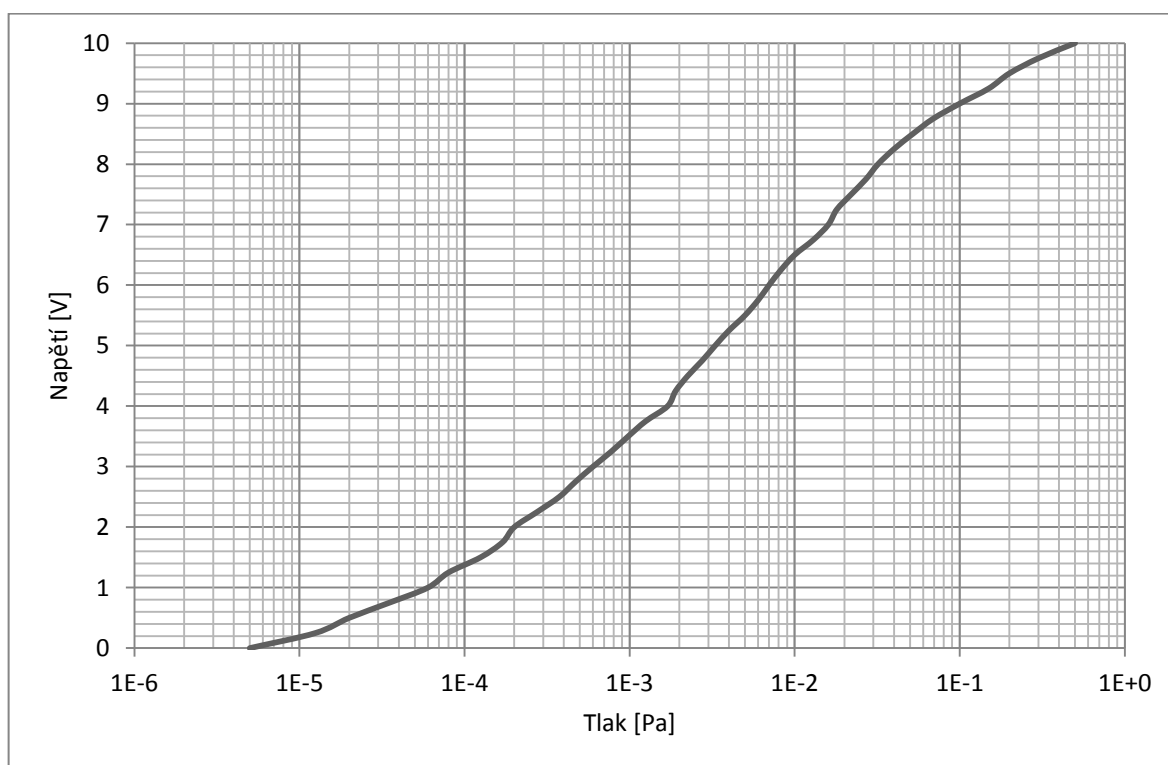


Obrázek 23: Zdroj pro vakuometr Penning VPG 1 (LAVAT).

Těleso měrky je vakuotěsný svařenec z nerezavějící oceli, na jednom konci opatřený přírubou pro rychlospoj. Kromě vnějšího pláště a průchodky pro připojení konektoru je zde navíc permanentní magnet ve tvaru silnostěnné trubky. Měrka je zobrazena na obrázku 24. Poloha montáže je libovolná.



Obrázek 24: Měrka vakuometru Penning VPG 1 (LAVAT).



Graf 2: Závislost výstupního napětí na tlaku pro vakuometr Penning VPG 1 (LAVAT).

Převzato a upraveno z [9].

4.6 Vakuometr Penning AIM-S-NW25 (Edwards)^[10]

Tento vakuometr umožňuje měření totálních tlaků neagresivních plynů a par v rozsahu 1 Pa ($\sim 10^{-2}$ torr) až 10^{-6} Pa ($\sim 10^{-8}$ torr). Součástí laboratorní sestavy je jedna měrka tohoto typu a zdroj, jehož součástí je digitální měřidlo pro odečítání hodnot tlaků (viz obrázek 25). Zdroj umožňuje zapojení dvou měrek a pomocí konektoru zdroje lze odebírat výstupní signály z obou měrek současně. Napětí výstupního signálu z měrky má rozsah 2 V až 10 V. Napájení je z elektrické sítě 230 V. Vakuometr je vhodný pro použití v laboratorním i výrobním provozu.

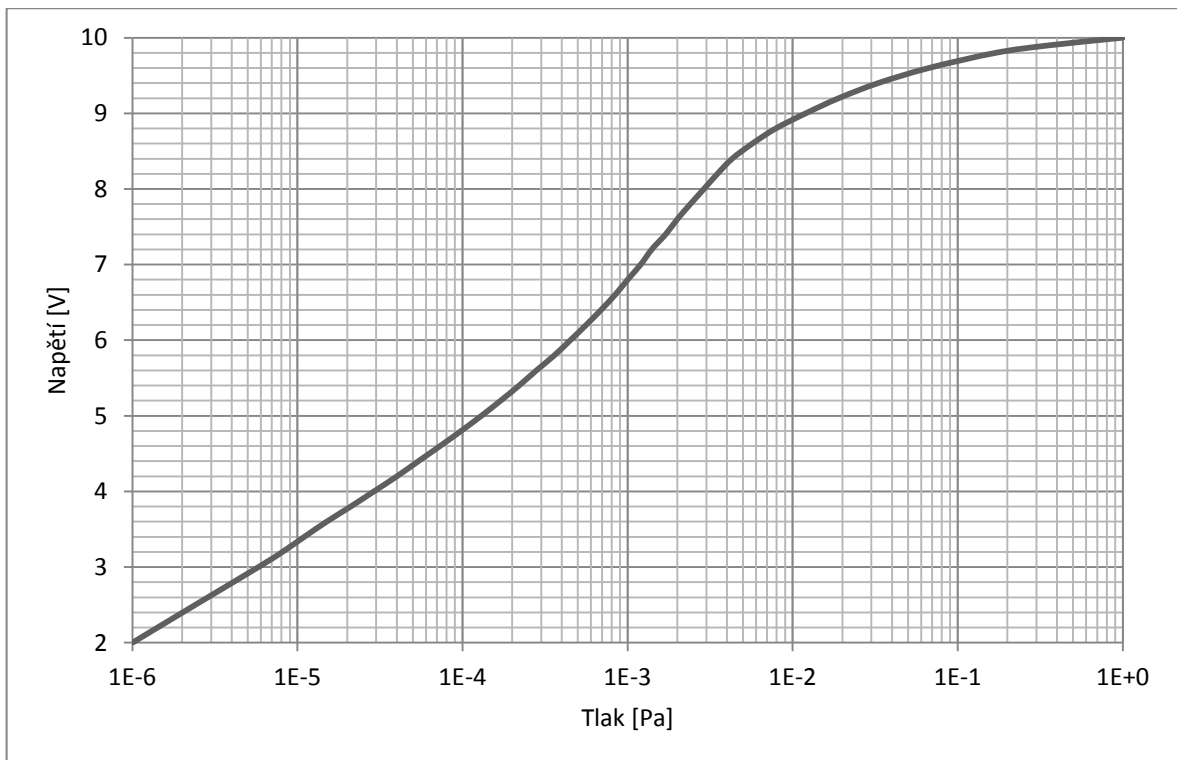


Obrázek 25: Zdroj pro vakuometr Penning AIM-S-NW25 (Edwards).

Těleso měrky je opět trubka z nerezavějící oceli, na jednom konci opatřena přírubou pro rychlospoj, zasazená do permanentního magnetu s pláštěm. Těleso měrky nemá klasickou průchodku pro připojení konektoru, jako u předchozího modelu. Poloha montáže je libovolná. Měrka je zobrazena na obrázku 26.



Obrázek 26: Měrka vakuometru Penning AIM-S-NW25 (Edwards).



Graf 3: Závislost výstupního napětí na tlaku pro vakuometr Penning AIM-S-NW25 (Edwards). Převzato a upraveno z [10].

4.7 Vakuová komora SVC-6050 (MTI Corporation)^[13]

Tato vakuová komora je určena především pro uchovávání vzorků, například různorodých materiálů nebo mikroelektroniky, které jsou citlivé na atmosférický vzduch. Vnitřní stěny komory jsou vyrobeny z leštěné nerezavějící oceli. Uvnitř komory jsou dvě odnímatelné police ze stejného materiálu pro odkládání vzorků. Objem komory činí 53 litrů. Pro jednoduché pozorování celého vnitřního prostoru slouží poměrně velké okno, které je součástí dvířek komory. Na předním panelu je zabudovaný mechanický manometr pro hrubé měření tlaku v komoře. Součástí komory jsou celkem dvě příruby pro rychlospoj. Jedna slouží k připojení vývěvy a druhá pro měřicí zařízení (například vakuometr). Kromě těchto dvou přírub má komora ještě další speciální port k připouštění inertních plynů. Komora obsahuje také vakuovou průchodku s čtyř-pinovým konektorem, který umožňuje připojení elektrického zařízení uvnitř vakuové komory. Odsávání a připouštění plynu je regulováno dvěma kohoutky na předním panelu komory. Vakuová komora je zobrazena na obrázku 27.



Obrázek 27: Vakuová komora SVC-6050 (MTI Corporation).

5. Experimentální část

Experimentální část práce jsme rozdělili na dvě části. V první části jsme testovali samotnou laboratorní sestavu, její fungování, chování při provozu a podobně. V druhé části jsme pak prováděli experiment se šířením zvuku ve vakuu, kdy jsme měřili intenzitu zvuku při různých hodnotách vakua v intervalu frekvencí 10 Hz až 10000 Hz pomocí přenosové soustavy reproduktor a mikrofon.

Při měřeních jsme veškeré signály z vakuových měrek zaznamenávali multifunkční kartou USB-6221 (National Instrument) a zpracovávali v počítači pomocí aplikace v prostředí LabVIEW. Při experimentu se šířením zvuku jsme signál z mikrofonu zpracovávali pomocí zvukové karty v PC a opět prostřednictvím aplikace v LabVIEW.

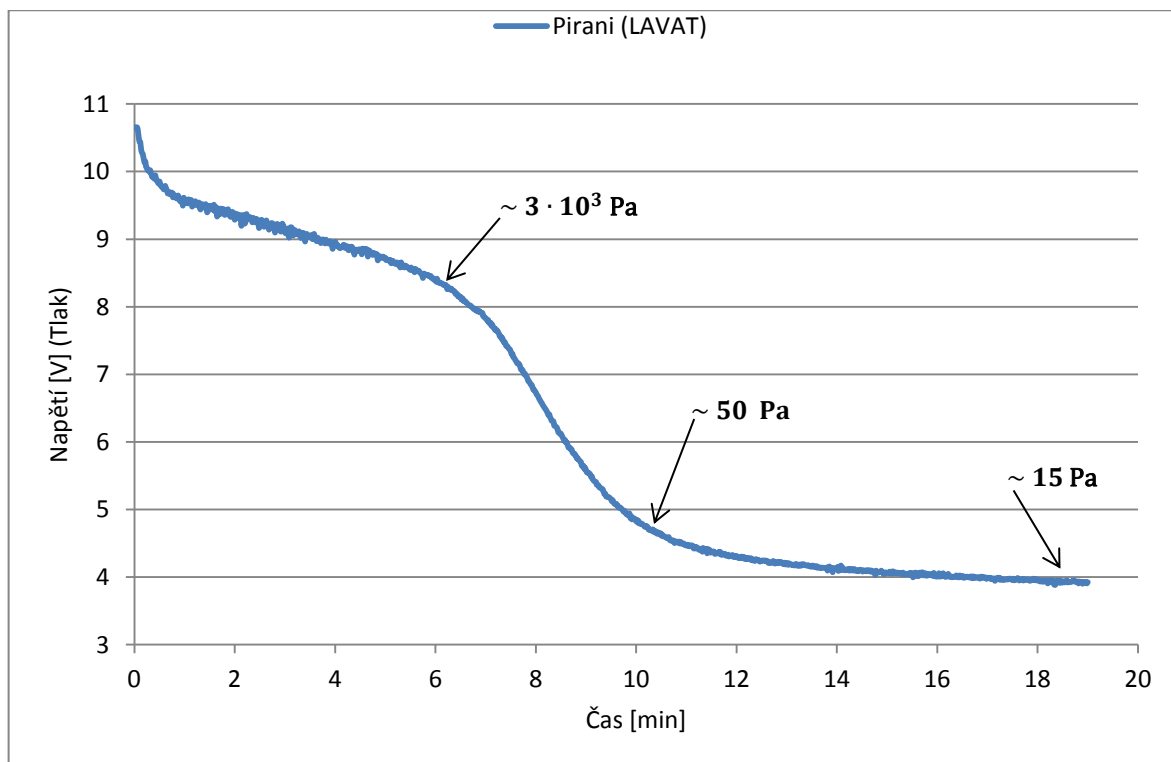
Z vakuových měrek jsme získávali napěťový signál, který jsme na hodnoty tlaků dále nepřepočítávali, neboť závislost tlaku na napětí u všech vakuometrů je určena křivkou v grafu (manuály k vakuometrům), která nemá charakteristiku žádné základní elementární funkce. Nejblíže se však podobá funkci exponenciální. Tedy ve všech grafech je tlak vyjádřen ve voltech, s tím, že si napěťovou stupnici představíme přibližně jako tlakovou v logaritmickém měřítku. Určení přesných hodnot tlaků ani nebylo potřeba, neboť u zvolených experimentů nás zajímaly spíše změny v hodnotách tlaků (čerpací charakteristiky a podobně).

5.1 Testování laboratorní sestavy

Cílem experimentu bylo otestovat laboratorní sestavu, konkrétně její fungování a chování při provozu. Ověřovali jsme funkčnost vývěv a vakuometrů, dále pak čerpací vodivost a v neposlední řadě také vliv velikosti a tvaru čerpaného prostoru na kvalitu čerpání. Pomocí vakuových měrek jsme tedy měřili různé čerpací charakteristiky za různých podmínek.

5.1.1 Ověření funkčnosti rotační vývěvy

Ověření funkčnosti rotační vývěvy VRO 05/21 (LAVAT) spočívalo v dosažení mezního tlaku o hodnotě alespoň 50 Pa (~ 0,5 torr), potřebného pro chod difúzní vývěvy. Typický průběh čerpání rotační vývěvy lze vidět v grafu 4.



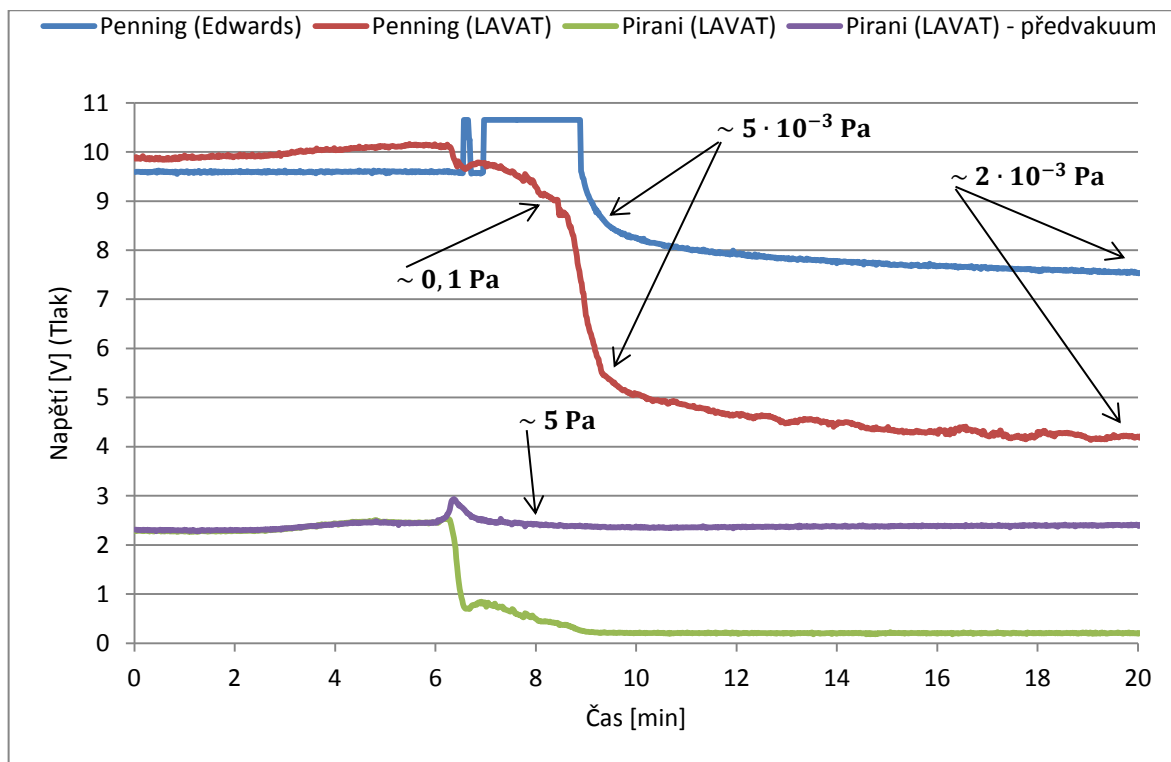
Graf 4: Čerpací charakteristika rotační vývěvy VRO 05/21 (LAVAT).

V grafu 4 vidíme typickou čerpací charakteristiku. Měření jsme provedli pouze s vakuometrem Pirani (LAVAT), jelikož oblast tlaků, v níž rotační vývěva pracuje, je mimo měřicí rozsah ionizačních vakuometrů Penning.

Mezní tlak rotační vývěvy závisel na vlastnostech čerpaného prostoru (velikost, geometrie, těsnost a podobně), nicméně tlaku o hodnotě alespoň 50 Pa ($\sim 0,5$ torr) bylo dosaženo u každého měření i při zvětšování objemu čerpaného prostoru. Při čerpání základního prostoru (nejmenší možný) mezní tlak dosahoval hodnoty přibližně 5 Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ torr). Tato hodnota tlaku je jako předvakuum pro difúzní vývěvu plně postačující. Nižší hodnota tlaku na předvakuovém hrdle však není na škodu, neboť pozitivně ovlivňuje celkový mezní tlak difúzní vývěvy.

5.1.2 Ověření funkčnosti difúzní vývěvy

U difúzní vývěvy D 130 (LAVAT) jsme taktéž ověřovali mezní tlak. Typický průběh čerpání difúzní vývěvy je znázorněn v grafu 5.



Graf 5: Čerpací charakteristika difúzní vývěvy D 130 (LAVAT).

Čerpací charakteristiku jsme měřili na všech měrkách. V grafu 5 si tedy můžeme všimnout celkem čtyř křivek, z nichž každá patří jedné z měrek. Průběh čerpání pro difúzní vývěvu je v grafu znázorněn od počátku zapnutí topného tělesa, tedy již s předčerpaným prostorem rotační vývěvou. Z grafu lze tedy vyčíst průběh náběhu difúzní vývěvy. Vakuometr Pennig (Edwards), označen modrou křivkou, nedokázal měřit tlaky blízké hranici svého měřicího rozsahu a k jeho zapnutí došlo až při výrazném poklesu tlaku v čerpaném prostoru (přibližně po devíti minutách). U ostatních vakuometrů lze vidět náběh již od začátku měření. Můžeme si všimnout, že po zapnutí topného tělesa jistou dobu trvá, než se olej zahřeje a difúzní vývěva začne čerpat. Vidíme dokonce, že na určitou dobu tlak v čerpaném prostoru nepatrně vzroste, což je způsobeno uvolňováním výparů oleje do čerpaného prostoru při jeho postupném zahřívání. Tohoto jevu si lze v grafu všimnout u všech křivek (s výjimkou modré), dokonce i u měření na předvakuovém hrdle měrkou Pirani (fialová křivka). Později, po zahřátí oleje na potřebnou teplotu (přibližně po šesti minutách), tlak v čerpaném prostoru začne rychle klesat, což způsobí malý, ale prudký nárůst tlaku na předvakuovém hrdle (fialová křivka). Na předvakuovém hrdle poté dojde k ustálení tlaku, který se již nadále nemění (mezní tlak rotační vývěvy). Tlak v čerpaném prostoru dál pomalu klesá (modrá, červená a zelená křivka) a signál z vakuové měrky

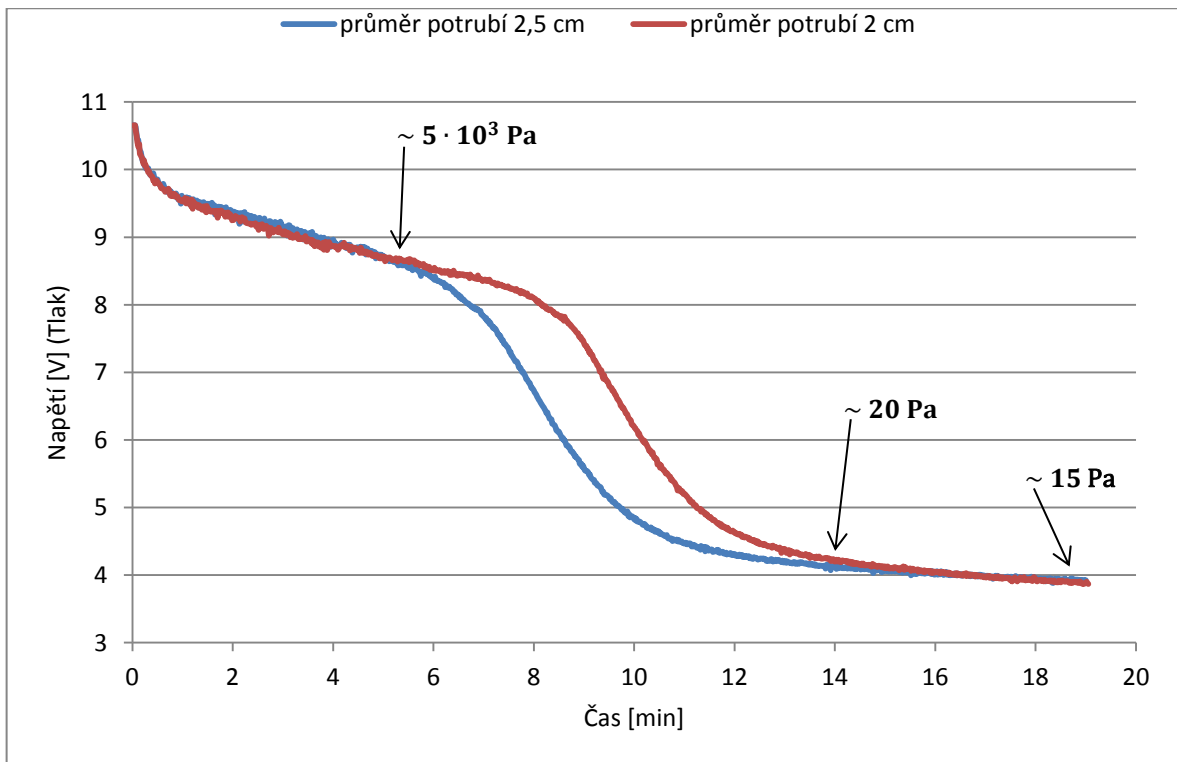
Pirani (zelená křivka) tak postupně spadne na nulu, neboť se dostane mimo svůj měřicí rozsah.

Dosažený mezní tlak, stejně jako u rotační vývěvy, značně závisel na vlastnostech čerpaného prostoru. Při čerpání základního prostoru (nejmenší možný) dosahoval přibližně $5 \cdot 10^{-4}$ Pa ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$ torr). Mezní tlak však závisí také na mnoha dalších faktorech, jako například stáří oleje, četnost používání vývěvy, správné chlazení a podobně. Při práci s difúzní vývěvou jsme zaznamenali různé postřehy. Například čím déle a častěji je vývěva v provozu, tím lépe čerpá. Toto je způsobeno zejména olejovou náplní, která se při chodu vývěvy neustále pročišťuje a udržuje si tak svoje vlastnosti. Při dlouhodobé nečinnosti olej stárne (oxiduje) a vývěva ztrácí na účinnosti. Difúzní vývěvy jsou tedy určené spíše pro nepřetržitý provoz. Při občasném používání, jako v našem případě, je vhodné nechat difúzní vývěvu před měřením alespoň tři hodiny v provozu.

5.1.3 Ověřování čerpací vodivosti

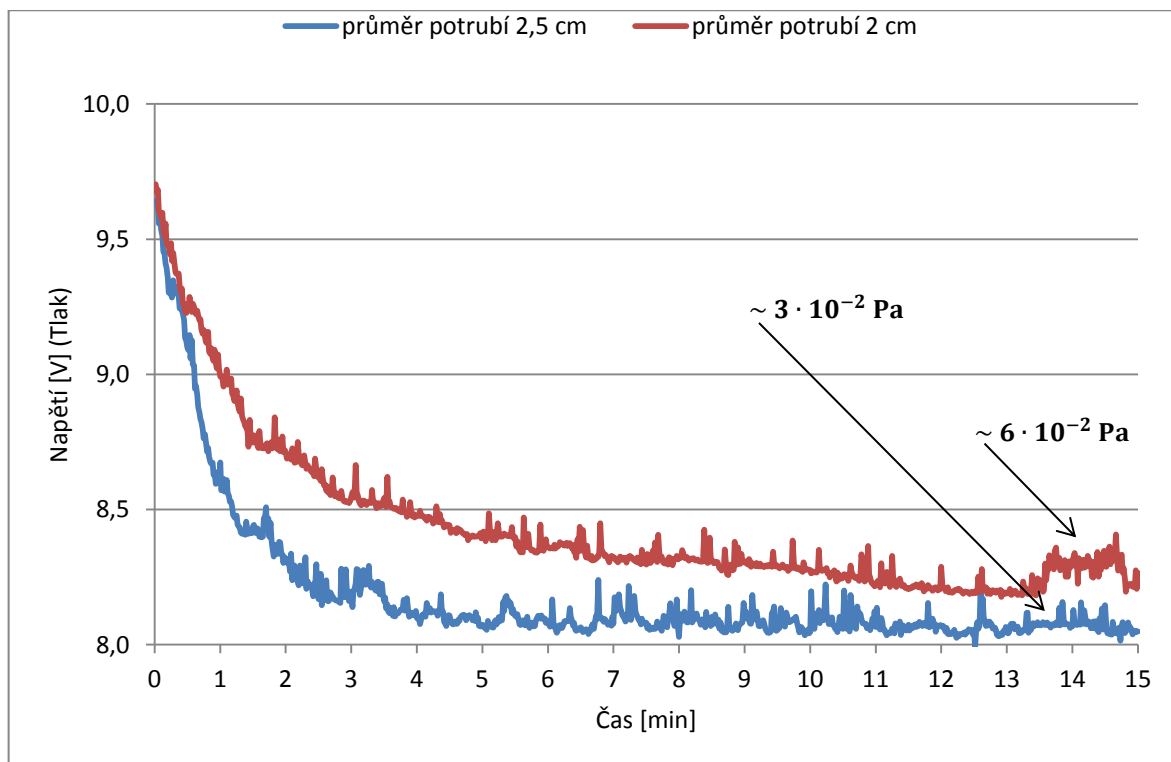
Cílem tohoto měření bylo ověření čerpací vodivosti (kapitola 1.4) pro dvě potrubí (odlišného průměru), kterými jsme propojily laboratorní sestavu s vakuovou komorou SVC-6050. Potrubí byly kruhového průřezu, délky jednoho metru a lišili se pouze svým průměrem (2 cm a 2,5 cm). Jednalo se tedy o jednoduchý experiment čerpání vakuové komory pomocí připojeného potrubí, kdy jsme opět měřili čerpací charakteristiky a to pro obě vývěvy.

Podle teorie by vodivost, jak pro molekulární tak i viskózní proudění, měla být větší u potrubí většího průměru (dle vztahů 12 a 20). Tedy pomocí širšího potrubí bychom komoru měli vyčerpat rychleji. Měření jsme provedli dvakrát, samostatně pro rotační a pro difúzní vývěvu. U měření s rotační vývěvou nám postačil vakuometr Pirani a u měření s vývěvou difúzní jsme použili vakuometr Penning (LAVAT). Výsledné čerpací charakteristiky jsou znázorněny v grafech 6 a 7.



Graf 6: Čerpací charakteristika rotační vývěvy pro dva průměry potrubí. Měřeno vakuometrem Pirani (LAVAT).

Z grafu 6 lze potvrdit skutečnost, že s potrubím většího průměru rychleji vyčerpáme komoru. Vidíme, že z počátku průměr nehraje velkou roli, neboť v případě čerpání rotační vývěvou se jedná o viskózní proudění, kde příliš nezáleží na geometrických parametrech, ale spíše na rozdílu tlaků mezi začátkem a koncem potrubí, který je na počátku čerpání velký a pomalu klesá. Snižováním tlaku v komoře se postupně přibližujeme k hranici molekulárního proudění (přechodová oblast) a čím dál víc začíná na geometrii vakuového systému záležet. Tedy šířka potrubí již začne hrát svoji roli a můžeme tak pozorovat určité rozdíly v čerpací rychlosti (viz graf 6). Poté dojde k ustálení na mezním tlaku a na průměru potrubí dále nezáleží. Čerpací vodivost potrubí pro čerpání rotační vývěvou je tedy v souladu s teorií.

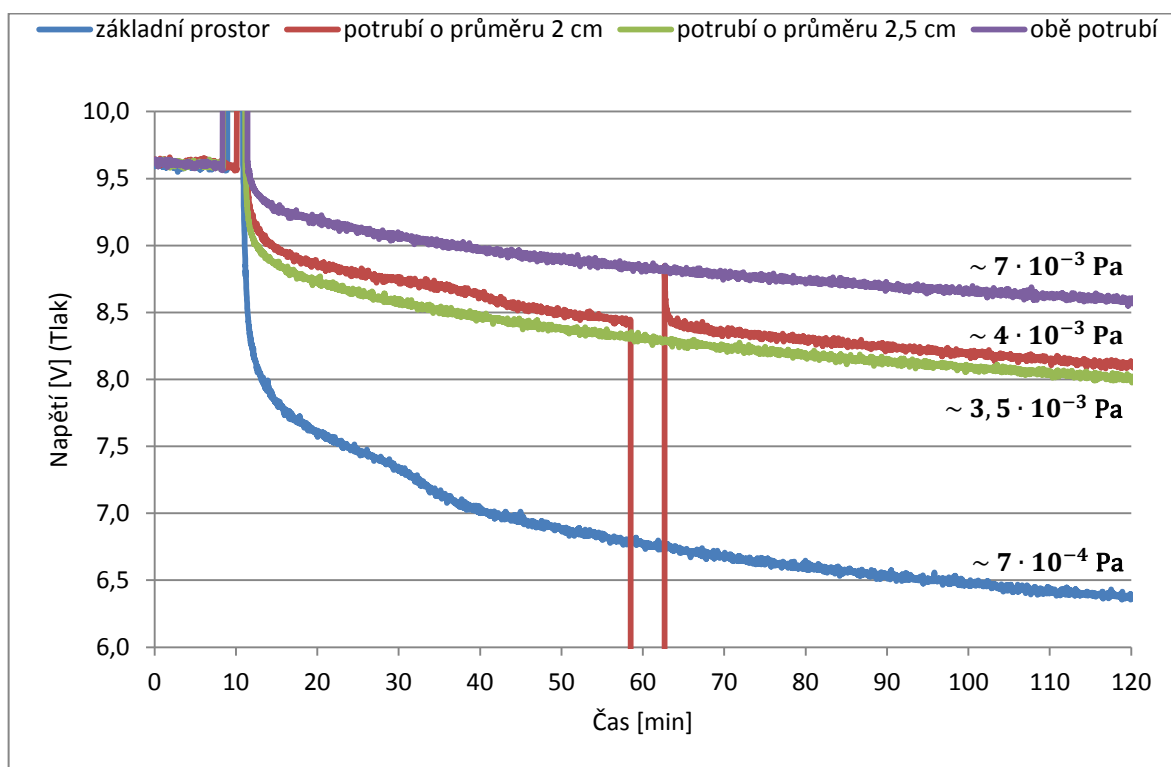


Graf 7: Čerpací charakteristika difúzní vývěvy pro dva průměry potrubí. Měřeno vakuometrem Penning (LAVAT).

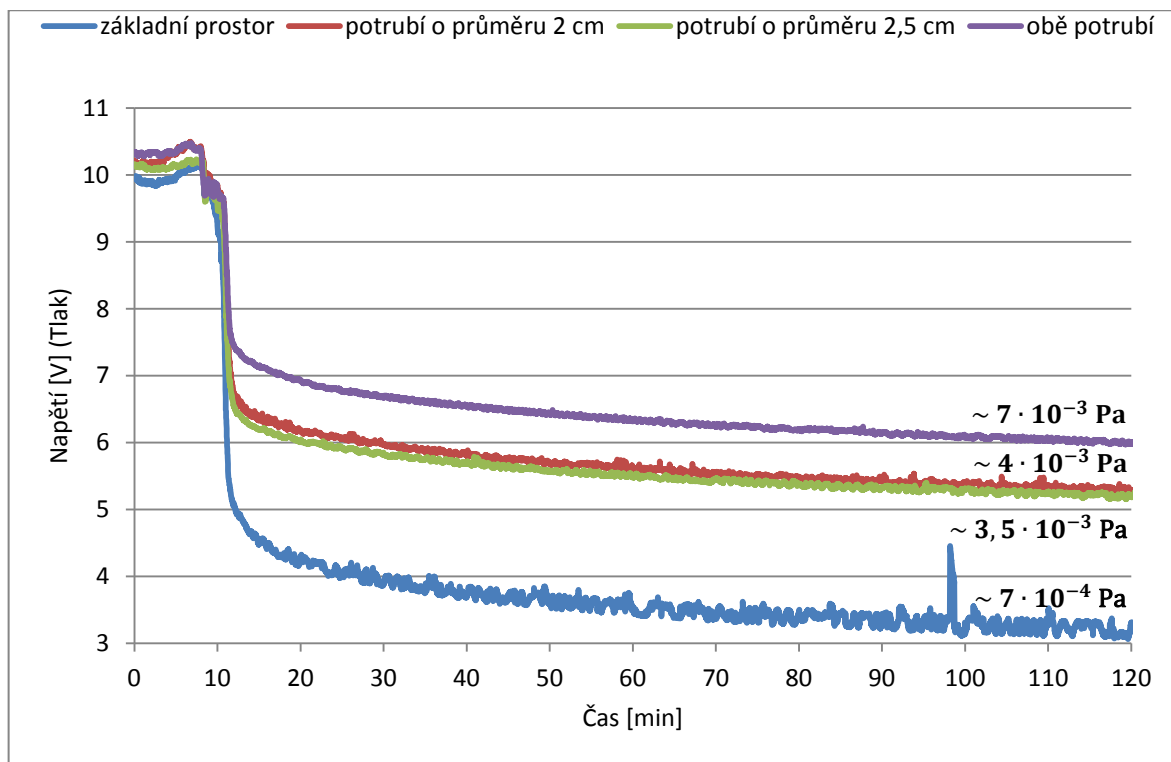
V grafu 7 vidíme poněkud odlišný průběh. Jelikož jsme čerpali difúzní vývěvou, komora byla již předčerpaná, a tedy už od počátku čerpání se jednalo převážně o molekulární proudění, u kterého záleží pouze na geometrii vakuového systému. Proto má také průměr potrubí na čerpací charakteristiku velký vliv již od začátku měření. V grafu si můžeme též všimnout rozdílu v mezním tlaku, který jsme u čerpání rotační vývěvou nezaznamenali. Toto je způsobeno netěsnostmi komory, jež v oblasti nižších tlaků hrají velkou roli, neboť rychlost přisávání vzduchu skrz netěsnosti se vyrovnává rychlosti čerpání. A je-li rychlost čerpání ovlivněna vodivostí potrubí, pak i průměr potrubí má vliv na celkovou hodnotu mezního tlaku v komoře, jako je tomu i v našem případě. Čerpací vodivost potrubí pro čerpání difúzní vývěvou je tedy v souladu s teorií.

5.1.4 Ověřování vlivu tvaru a velikosti čerpaného prostoru na kvalitu čerpání

Obecně platí, čím větší prostor čerpáme, tím hůře se čerpá. Cílem tohoto měření bylo ověřit, že při čerpání určitého prostoru nezáleží pouze na jeho velikosti, ale také na jeho tvaru a to zejména u molekulárního proudění. Experiment spočíval v měření čerpacích charakteristik difúzní vývěvy, pomocí vakuometrů Penning, při zvětšování objemu čerpaného prostoru. K tomuto účelu jsme použili opět již zmiňovaná potrubí, tentokrát na jednom konci zaslepená a na druhém konci připojená k základnímu čerpanému prostoru. Provedli jsme celkem čtyři měření, konkrétně pro základní čerpaný prostor (nejmenší možný), základní prostor rozšířený o užší potrubí, základní prostor rozšířený o širší potrubí a základní prostor rozšířený o obě potrubí. Difúzní vývěva by měla (dle teorie) tím lépe čerpat, čím menší je objem prostoru. Toto však ne vždy platí, což si následně dokážeme (grafy 8 a 9).



Graf 8: Čerpací charakteristiky difúzní vývěvy pro čtyři objemy čerpaného prostoru. Měřeno vakuometrem Penning (Edwards).



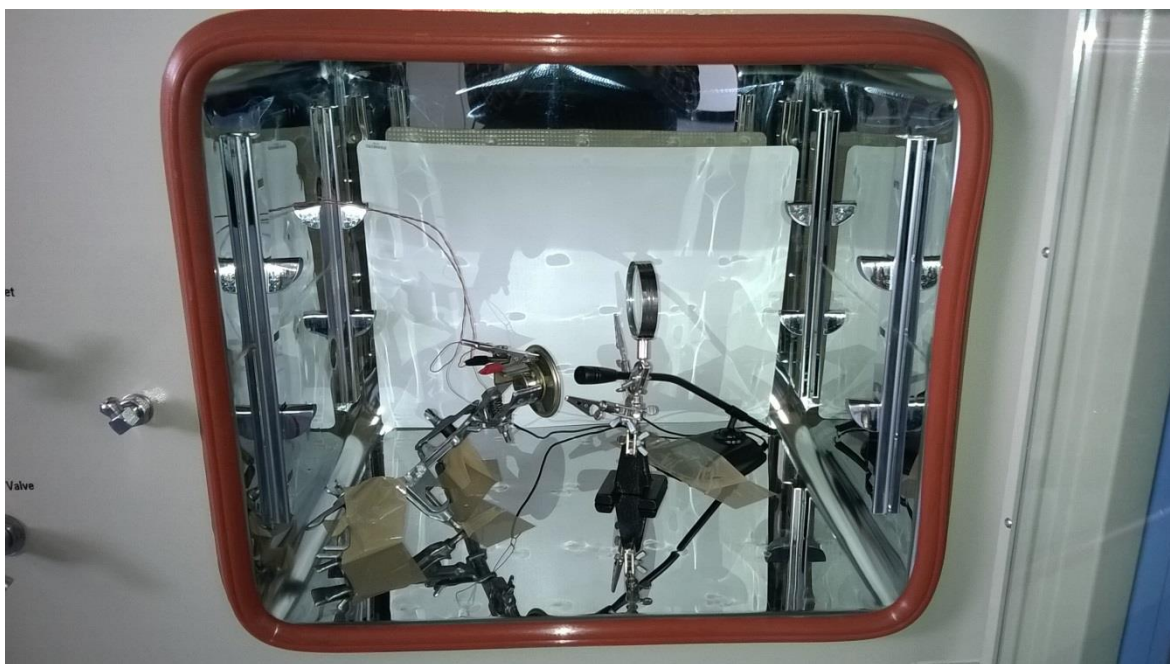
Graf 9: Čerpací charakteristiky difúzní vývěvy pro čtyři objemy čerpaného prostoru. Měřeno vakuometrem Penning (LAVAT).

V grafech 8 a 9 si lze všimnout, že difúzní vývěva hůře čerpá prostor rozšířený o užší potrubí (červená křivka) než prostor rozšířený o širší potrubí (zelená křivka). Na tuto skutečnost, jež opět souvisí s čerpací vodivostí, jsme právě chtěli poukázat. Je to způsobené tím, že užší potrubí má menší čerpací vodivost a tedy vysávat vzduch z takového prostoru je náročnější, jak z prostoru širšího potrubí. Měření je velmi podobné předchozímu, avšak nejedná se o stejný princip. V grafech dále vidíme, podle očekávání, že prostor rozšířený o obě potrubí se čerpá nejhůře a naopak základní prostor (nejmenší možný) nejlépe. Tedy u molekulárního proudění ovlivňuje kvalitu čerpání nejen velikost, ale i tvar čerpaného prostoru.

V grafu 8 lze také zaznamenat technický výpadek měrky přibližně hodinu po začátku měření. U vakuometru Penning (Edwards) jsme tyto technické výpadky zaznamenávali poměrně často a jsou způsobené náhlými výkyvy tlaků v čerpaném prostoru. Měrku je nutné po výpadku opět manuálně zapnout.

5.2 Šíření zvuku ve vakuu

V našem případě jde o velice zjednodušený experiment měření šíření zvuku ve vakuu, kde jsme pomocí malého reproduktoru (zdroj zvuku) a mikrofonu (přijímač zvuku), vložených do vakuové komory (viz obrázek 28), měřili přenos signálu při různých hodnotách vakua a frekvence zvukových vln. Mikrofonem lze měřit frekvenci (neboli výšku zvuku) a amplitudu (neboli intenzitu zvuku). Experiment tedy spočíval v měření amplitudy elektrického signálu (intenzity) s různou frekvencí v závislosti na tlaku prostředí.



Obrázek 28: Fotografie realizace experimentu se šířením zvuku ve vakuu.

5.2.1 Teorie^[15]

Intenzita zvuku je definována jako:

$$I = \frac{P}{S}, \quad (24)$$

kde P je akustický výkon v jednotce W (watt) a S je plocha [15]. Jednotka intenzity je tedy $W \cdot m^{-2}$ a nemá žádný speciální název. Složitou úpravou tohoto vztahu lze získat rovnici:

$$I = 2\pi^2 \rho f^2 v A^2, \quad (25)$$

kde ρ je hustota prostředí, f je frekvence zvuku, v je rychlost šíření zvuku a A je amplituda vlnění (amplituda kmitajících částic prostředí) [15]. Vidíme tedy, že intenzita zvuku je závislá na frekvenci a rychlosti zvuku, amplitudě vlnění a v neposlední řadě také na hustotě okolního prostředí, kterým se zvuková vlna šíří.

Okolním prostředím je v našem případě suchý vzduch. Je-li intenzita zvuku závislá na hustotě suchého vzduchu, je tedy závislá také na jeho tlaku, neboť hustota suchého vzduchu je přímo úměrná jeho tlaku podle vztahu:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma t} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (26)$$

kde ρ_0 a p_0 označují nějakou základní známou hustotu a tlak, t je teplota ve stupních celsia a $\gamma = 0,00366 \text{ K}^{-1}$ (teplotní součinitel rozpínivosti). Pro suchý vzduch je $\rho_0 = 1,276 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (hustota suchého vzduchu při tlaku 10^5 Pa a teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$) a $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ ($\sim 10^3 \text{ torr}$). [14]

5.2.2 Provedení

K měření intenzity jsme použili malý reproduktor neznámých parametrů a mikrofon jako PC doplněk. Reproduktor i mikrofon jsme vložili do vakuové komory, nasměrovali na sebe při vzdálenosti přibližně 4 cm (konstantní pro všechna měření) a upevnili ve svorkách. Reproduktor i mikrofon mají pouze dva vývody (tedy celkem čtyři přípojovací svorky), což přišlo vhod, neboť jsme mohli využít čtyř-pinovou vakuovou průchodku, která je součástí komory. Signál z mikrofonu se zpracovával přes zvukovou kartu v PC a pomocí aplikace v prostředí LabVIEW.

Při experimentu měření intenzity jsme měnili pouze tlak okolního prostředí a frekvenci zvukové vlny. Rychlost šíření zvuku v suchém vzduchu je při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ přibližně $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a je konstantní, tedy nezávisí na tlaku, frekvenci ani amplitudě vlnění [14]. Amplituda vlnění byla též konstantní, neboť zdroj zvuku (reproduktor) byl pro všechna měření nastaven na stejnou hodnotu amplitudy a vzdálenosti od mikrofonu. Můžeme si tedy vztah 25 upravit na rovnici:

$$I = K \cdot \rho f^2, \quad (27)$$

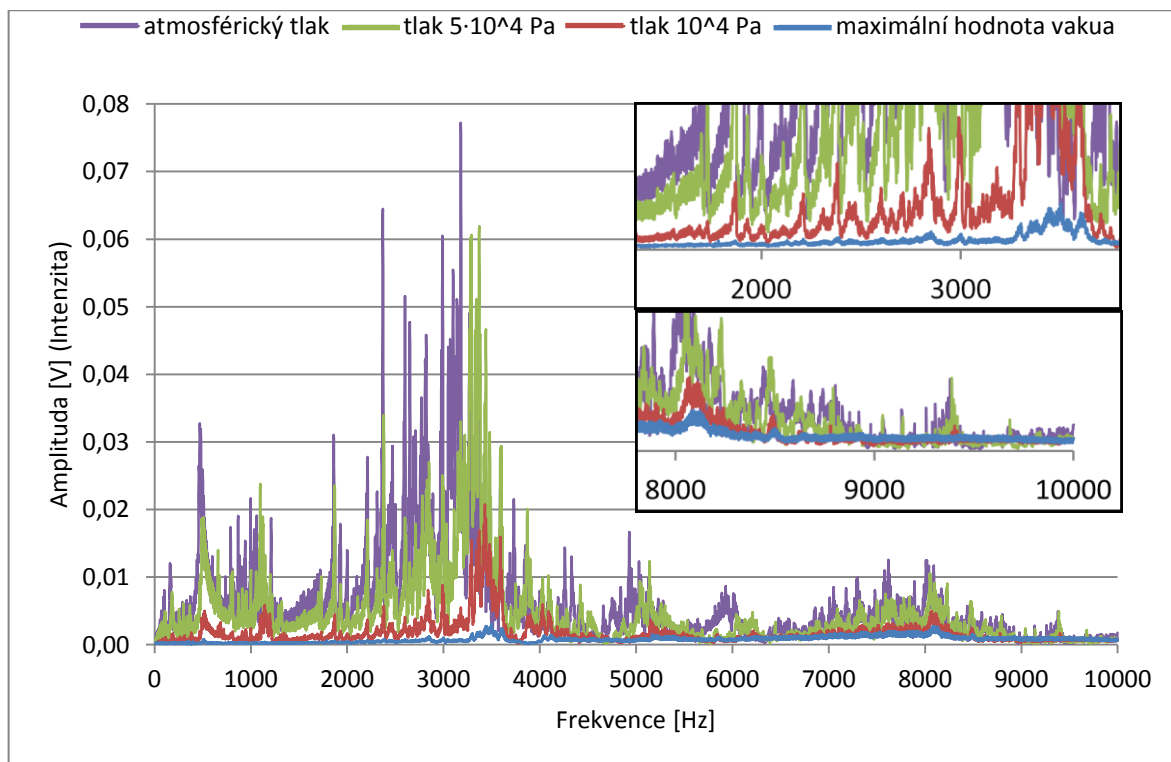
kde K je konstanta. Měřená intenzita by tak měla být přímo úměrná hustotě prostředí, tedy přímo úměrná tlaku (podle vztahu 26) a úměrná druhé mocnině frekvence zvuku.

Experiment jsme rozdělili na dvě části. V první části se měřila intenzita zvuku v závislosti na frekvenci pro čtyři hodnoty tlaků okolního prostředí, které byly pouze částečně konstantní, neboť vakuová komora nebyla schopna udržet vakuum po delší dobu a tlak v komoře tak postupně narůstal. Frekvence zvuku se měnila po 1 Hz od 10 Hz do 10000 Hz. Vše bylo automatizované prostřednictvím aplikace v LabVIEW, neboť takové měření trvalo několik hodin (přibližně patnáct hodin). V druhé části se měřila intenzita zvuku v závislosti na tlaku v komoře pro čtyři hodnoty frekvencí. Tlak v komoře se měnil manuálně pomocí zavzdušňovacího ventilu. Měřilo se od nejnižší hodnoty vakua, kterého byla komora schopna dosáhnout až po atmosférický tlak. Zavzdušňování komory nemohlo probíhat spojitě, neboť bylo nezbytné, aby se tlak v komoře před měřením ustálil, tedy aby hustota vzduchu byla v každé části komory stejná. Navíc připouštěním vzduchu během měření by mikrofon zaznamenával šum (ověřeno). Dalším důvodem byla také nutnost zavzdušňovat komoru v logaritmickém měřítku, aby vakuová měřka byla schopná změnu tlaku zaznamenat.

Při experimentech jsme vakuovou komoru čerpali pouze rotační vývěvou, neboť hodnoty dosaženého vakua byly pro měření postačující a také z důvodu neudržitelnosti vakua v komoře. Nejnižší tlak pro měření intenzity zvuku dosahoval přibližně 10^2 Pa (~ 1 torr), přičemž změny v přenosu zvuku jsme pozorovali až při hodnotě tlaku kolem 10^3 Pa (~ 10 torr). K měření tlaku nám tedy plně stačil vakuometr Pirani.

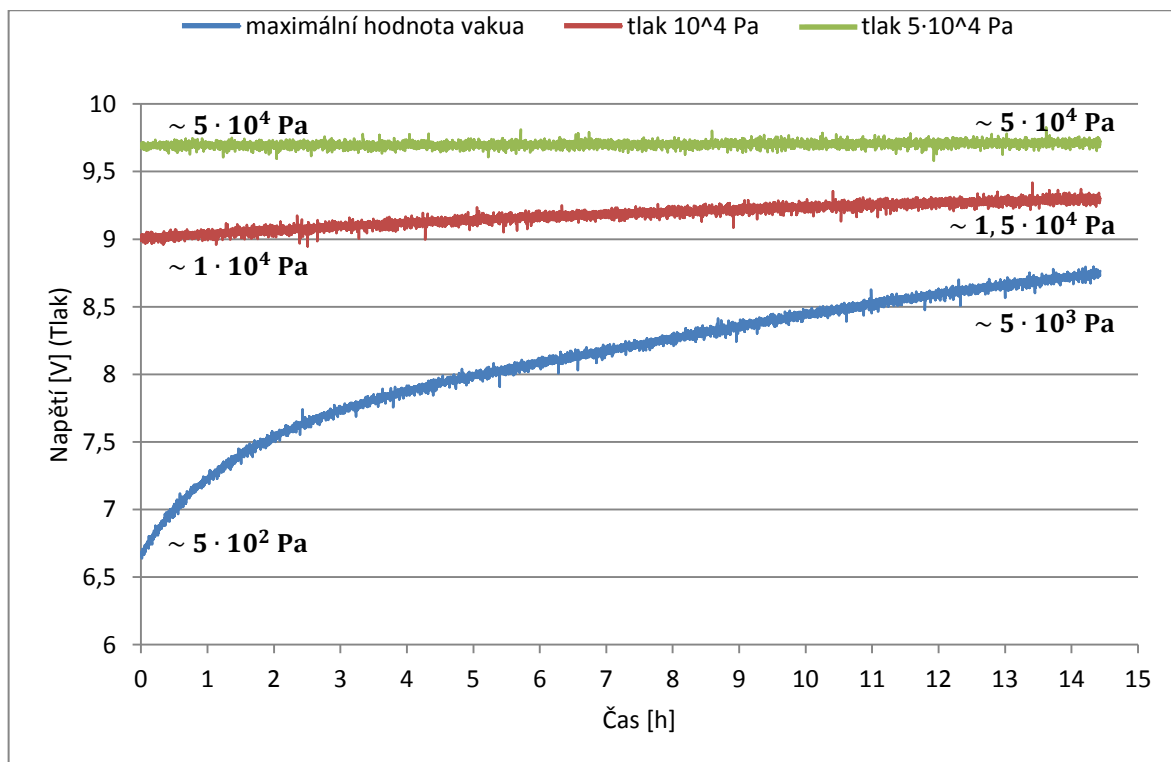
5.2.3 Výsledky a diskuze

Měření intenzity zvuku v závislosti na frekvenci jsme provedli celkem pro čtyři hodnoty tlaků. Konkrétně pro minimální dosažitelný tlak v komoře (maximální hodnota vakua), pro atmosférický tlak a pro dvě hodnoty tlaků mezi minimem a atmosférou. Výsledné křivky jsme pro porovnání vložili do jednoho grafu. Z důvodu časové náročnosti měření (přibližně patnáct hodin) nebyla vakuová komora schopná udržet nižší tlaky konstantní (viz graf 11), avšak na výsledná spektra tato skutečnost výrazný vliv neměla.



Graf 10: Závislost intenzity zvuku na frekvenci pro čtyři hodnoty tlaků.

V grafu 10 si můžeme všimnout poměrně neočekávaného průběhu závislosti, neboť podle rovnice 27 by intenzita zvuku měla být úměrná druhé mocnině frekvence. Vidíme, že intenzita zvuku u měření při maximální hodnotě vakua (modrá křivka) má tendenci nepatrně stoupat při zvyšování frekvence, avšak toto je způsobeno spíše postupným narůstáním tlaku v komoře z důvodu netěsností (viz graf 11). Co se týče závislosti na tlaku, při vyšších hodnotách zaznamenáváme přibližně větší intenzitu zvuku, což je v souladu s teorií.

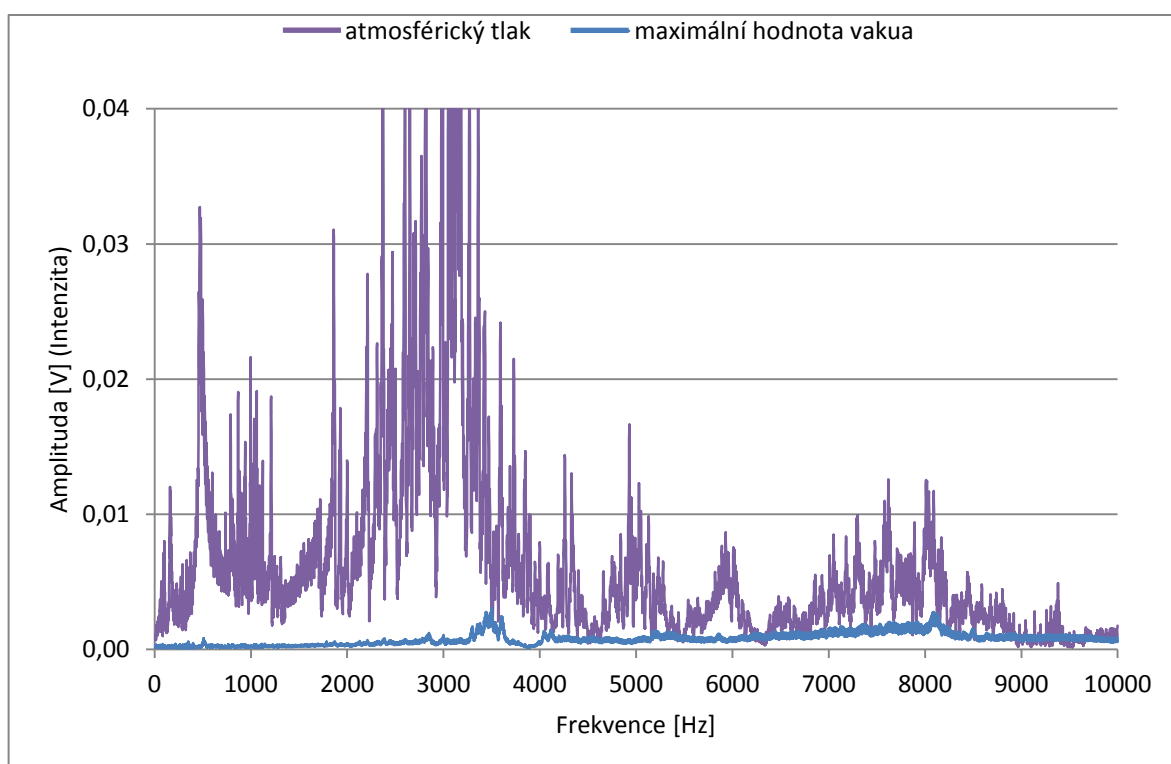


Graf 11: Vývoj tlaku v komoře během měření závislosti intenzity zvuku na frekvenci (závislost tlaku v komoře na čase).

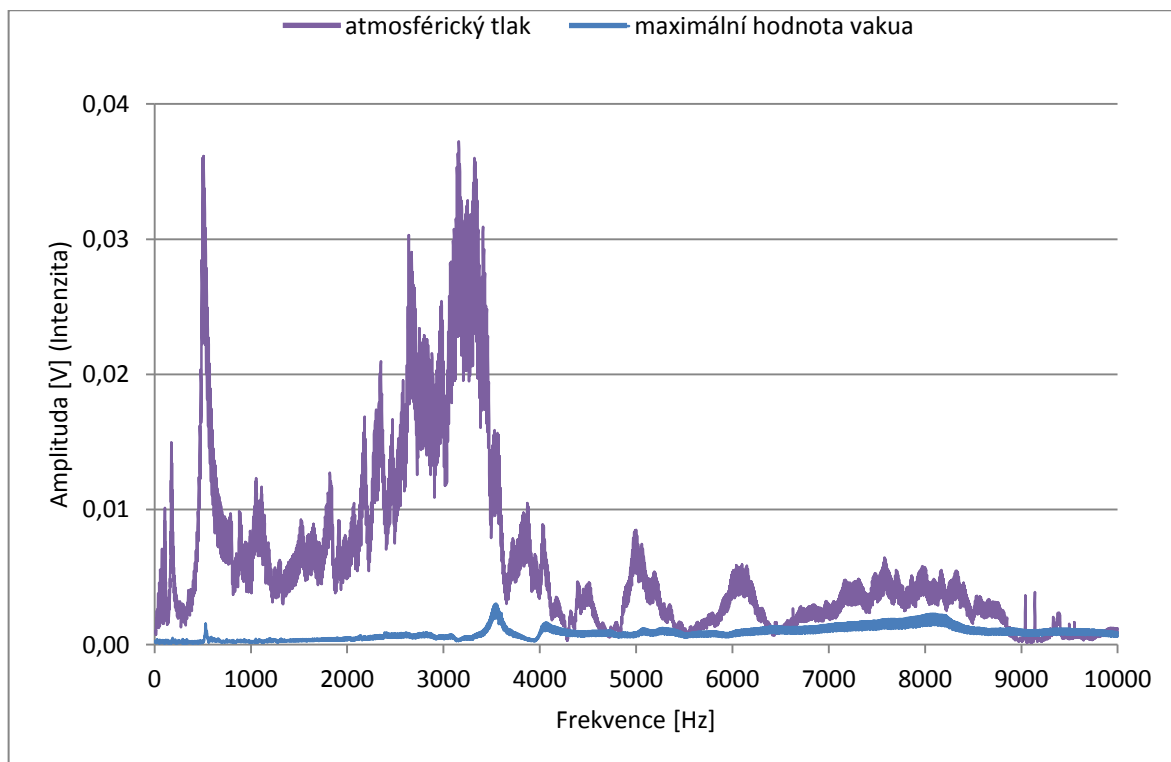
Z grafu 11 lze vyčíst závislost tlaku v komoře na čase při různých počátečních hodnotách. Vidíme, že čím nižší tlak v komoře je, při začátku měření, tím hůře jej komora udrží, což jsme také očekávali. U měření při maximální hodnotě vakua (modrá křivka) se nám tlak na konci měření zvýšil přibližně o jeden řád. Jak již bylo zmíněno, v grafu 10 lze toto zaznamenat jako nepatrný nárůst intenzity od hodnoty frekvence 1500 Hz (modrá křivka), při které byl tlak v komoře přibližně 10^3 Pa (~ 10 torr). Tuto úvahu můžeme potvrdit také druhou částí experimentu, kde jsme stanovili tlak 10^3 Pa jako hranici, kdy intenzita začala růst s rostoucím tlakem (viz graf 14). U měření při vyšších tlacích rozdíly nebyly tak patrné.

Z frekvenčních spekter (viz graf 10) nelze vyčíst v podstatě žádnou závislost intenzity zvukové vlny na její frekvenci. A už vůbec ne dle vztahu 27, kdy je intenzita zvuku úměrná druhé mocnině frekvence. Naopak si lze v grafu všimnout spíše klesajícího charakteru, neboť větší intenzity zaznamenáváme zejména při nižších frekvencích. Velké rozdíly v intenzitách i při malých změnách frekvencí (píky) mohou být způsobeny mnoha faktory. Jedním z faktorů může být například rezonanční efekt (rezonance komory,

popřípadě předmětů v komoře). V našem případě, při měření frekvenčních závislostí, jde o velice nežádoucí vliv. Abychom tento rezonanční jev potvrdili, provedli jsme opakované měření, s tím rozdílem, že jsme reproduktor a mikrofon v komoře částečně zakryli textilní látkou. Látku jsme vložili do komory takovým způsobem, aby nezasahovala do prostoru mezi reproduktorem a mikrofonem. Měření jsme provedli tentokrát pouze pro dvě hodnoty tlaků, konkrétně pro maximální hodnotu vakua a atmosférický tlak. Rozdíly si můžeme porovnat v grafech 12 a 13.



Graf 12: Závislost intenzity zvuku na frekvenci pro dvě hodnoty tlaků bez použití látky (předchozí měření znázorněné v grafu 10).



Graf 13: Závislost intenzity zvuku na frekvenci pro dvě hodnoty tlaků s použitím látky.

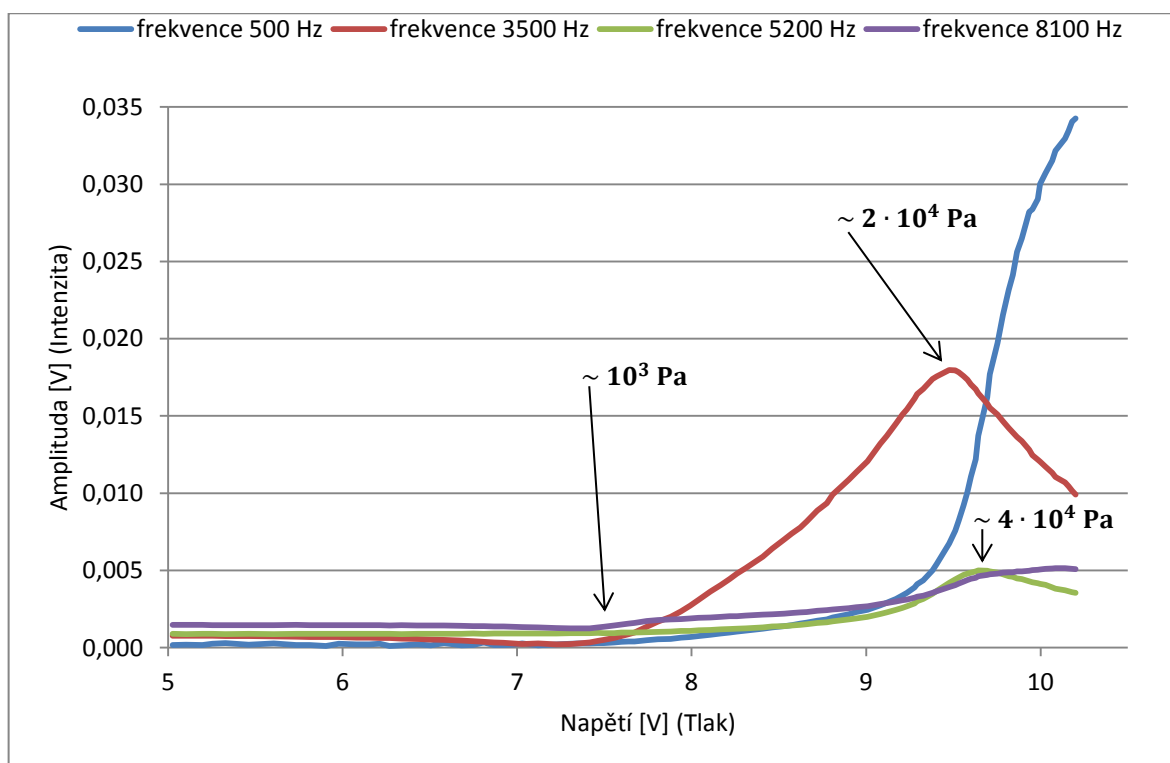
Z grafů 12 a 13 lze vyčíst, že rezonance má velký vliv na měření. Při použití textilní látky je spektrum hladší a píky nedosahují takových intenzit jako u předchozího měření. Je tedy nutné tuto skutečnost brát v úvahu při vyhodnocování výsledků. I přestože s použitím látky frekvenční spektrum vypadá lépe, jeho charakteristika se příliš nezměnila. Výrazné změny jsme však ani neočekávali, neboť experiment s látkou měl být pouze názornou ukázkou (důkaz) vlivu rezonančního efektu a rozhodně jej nelze považovat za řešení problému. Vlivu rezonance tedy nezabráníme, ale je zřejmé, že není jediným důvodem, proč frekvenční závislost neodpovídá teorii (rovnice 27).

Jedním z hlavních důvodů je samotná jednoduchost měření. Přenosový systém reproduktor (ze stavebnice) a mikrofon (PC doplněk) není pro takový experiment uzpůsoben a navíc, jak v případě reproduktoru tak mikrofonu, se nejedná o speciální kalibrovaná zařízení, určená k tomuto druhu měření. Běžný reproduktor nedokáže vysílat libovolně zvolenou frekvenci se stejnými parametry. Toto známe například u audio soustav, kde součástí každé soustavy je mnoho reproduktorů různých velikostí, z nichž každý slouží jako zdroj zvuku pouze pro určitý rozsah frekvencí. Pro vyšší frekvence jsou reproduktory menší a pro nižší frekvence naopak větší. Je tedy pravděpodobné, že reproduktor v naší soustavě je na tom

obdobně. Stejně tak mikrofon nemusí reagovat na všechny frekvence se stejnou citlivostí, zejména pak mikrofon jako PC doplněk může mít největší citlivost například v rozsahu frekvencí lidského hlasu, neboť právě k tomuto účelu je používán. Tyto skutečnosti je tedy nutné brát v úvahu při vyhodnocování výsledků. Podíváme-li se opět na frekvenční spektra (obrázky 10, 12 a 13), můžeme si všimnout, že větší intenzity zaznamenáváme zejména při nižších frekvencích, tedy spíše v první polovině frekvenčního rozsahu. Tento fakt může být způsoben například právě zmiňovanými frekvenčními parametry reproduktoru, popřípadě mikrofonu, poněvadž frekvenční spektrum lidského hlasu leží právě v první polovině frekvenčního rozsahu měření.

Kromě rezonančního jevu a nedokonalosti přenosového systému (reproduktor a mikrofon) mohlo charakteristiku frekvenčních spekter ovlivnit také mnoho dalších faktorů. Takové měření tedy není jednoduché a výsledky tak nelze považovat za příliš věrohodné.

Měření intenzity zvuku v závislosti na tlaku okolního prostředí jsme provedli pro čtyři frekvence, které jsme vybrali na základě předchozího experimentu. Konkrétně pro frekvence 500 Hz, 3500 Hz, 5200 Hz a 8100 Hz. Výsledné křivky jsme opět vložili do jednoho grafu pro lepší srovnání. Zvolené frekvence byly po celou dobu měření konstantní, a tedy intenzita zvuku byla závislá pouze na hodnotě tlaku okolního prostředí (rovnice 27).



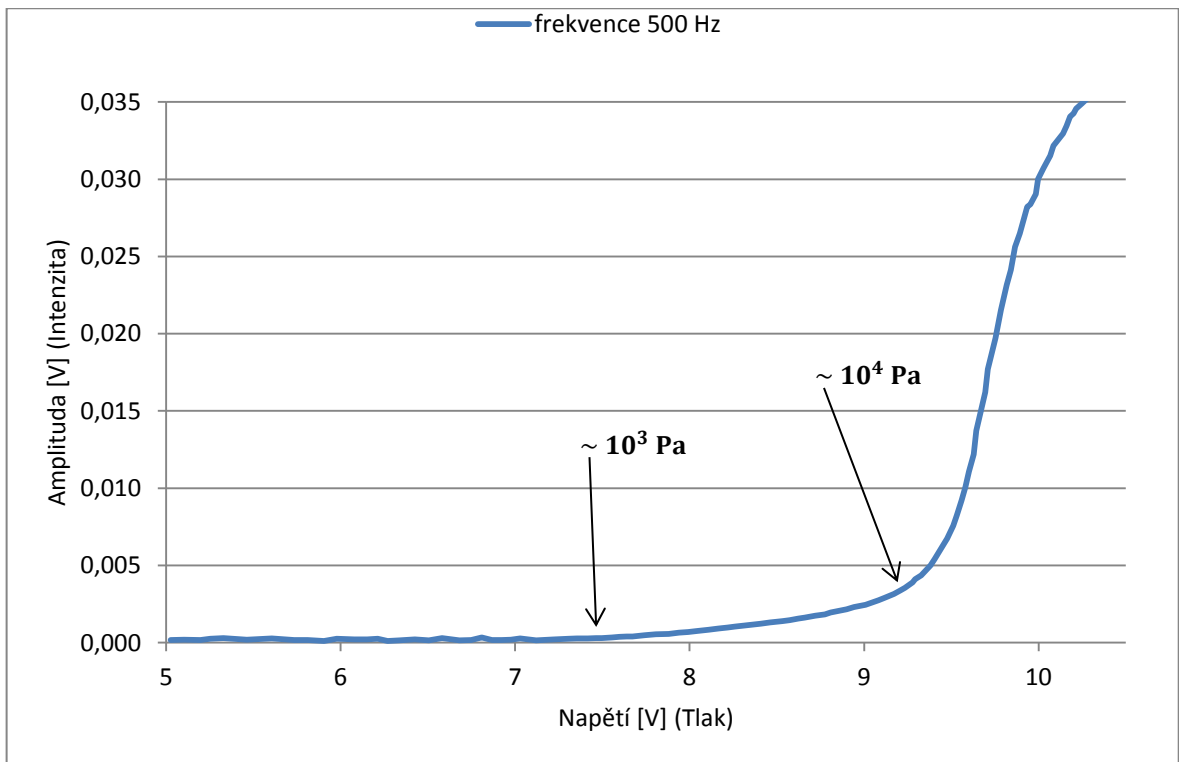
Graf 14: Závislost intenzity zvuku na tlaku okolního prostředí pro čtyři hodnoty frekvencí.

V grafu 14 můžeme pozorovat čtyři průběhy rostoucí intenzity s rostoucím tlakem. Vidíme, že změny v hodnotách intenzity začínají až od hodnoty napětí 7,5 V, což je tlak přibližně 10^3 Pa (~ 10 torr). Tento tlak je tedy pro naše experimenty hranicí pro šíření zvuku ve vakuu. Obecně je však tato přibližná hodnota hranice závislá na mnoha faktorech, jako například citlivosti mikrofону, amplitudě zdroje zvuku (reproduktoru) a v neposlední řadě také na vzdálenosti mezi mikrofónem a reproduktorem. Nemůžeme tedy tvrdit, že při tlaku nižším jak 10^3 Pa se zvuk již „nešíří“.

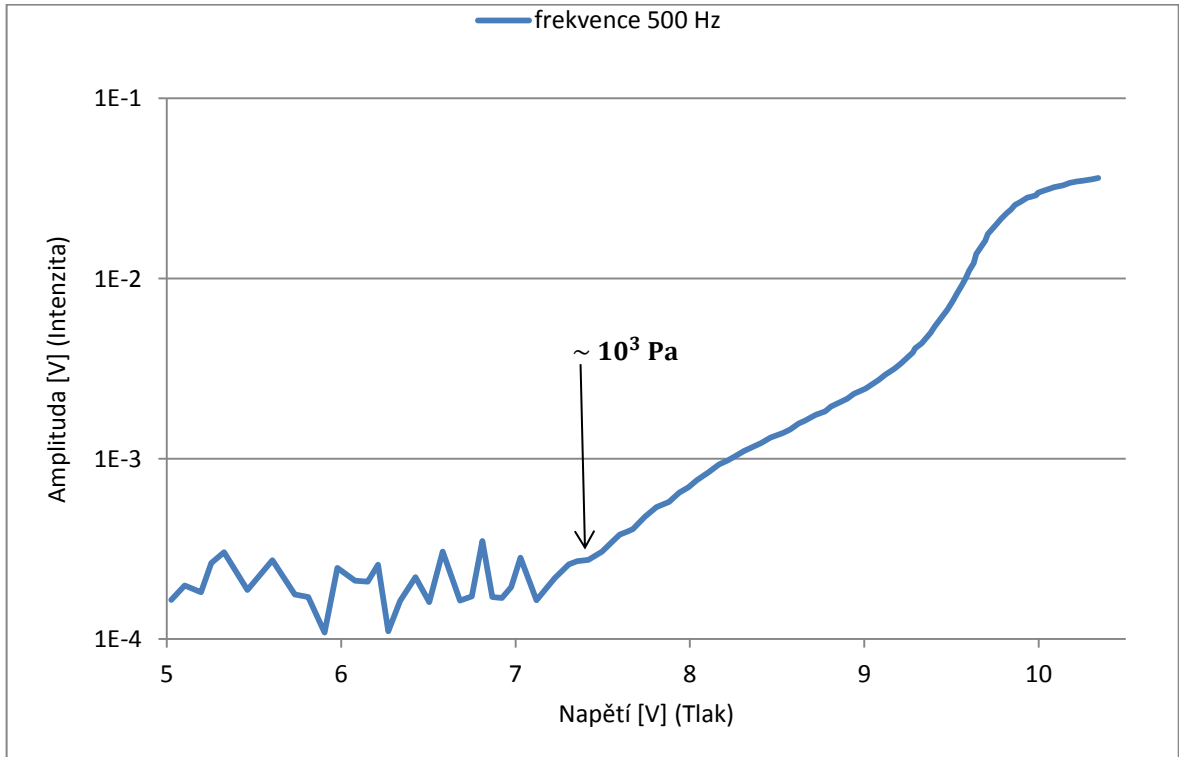
Podle teorie by intenzita měla růst s rostoucím tlakem prostředí (rovnice 27). To lze také pozorovat, zejména u frekvence 500 Hz, popřípadě u frekvence 8100 Hz. U zbylých dvou frekvencí toto pozorujeme pouze částečně, neboť od určitého tlaku intenzita opět klesá. Tento fakt je nejspíše způsoben opět možnostmi přenosové soustavy, která není přizpůsobená pro měření v takových podmínkách, jako je například změna tlaku. Je tedy možné, že při určitých frekvencích dokázal systém reproduktor a mikrofón u nižších tlaků přenášet zvuk s vyšší intenzitou než při atmosférickém tlaku. Toto lze pozorovat také u předchozího experimentu, kde se frekvenční spektra pro různé hodnoty tlaků prolínají, například v grafu 12 a 13 při frekvencích vyšších než 9000 Hz.

Dále si můžeme v grafu 14 všimnout vlivu frekvence na intenzitu zvuku, kterou jsme nepozorovali u předchozího experimentu. Při tlaku nižším jak 10^3 Pa (7,5 V) v podstatě nezaznamenáváme žádné změny v intenzitě zvuku, ale přesto měříme určitou konstantní intenzitu, která je na tlaku prostředí již nezávislá. Vidíme však, že hodnota intenzity je různá pro různé frekvence, a to tak, že vyšší frekvence mají větší intenzitu. To je v souladu s teorií (rovnice 27), kterou jsme nebyli schopni u předchozího experimentu potvrdit. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena šířením zvuku v pevné látce, konkrétně od reproduktoru přes svorku, stojan a dno komory přímo k mikrofonu. Tedy hustota vzduchu byla natolik nízká, že jsme zaznamenávali přenos zvuku pouze pevnou látkou. Takový přenos by však při běžných podmínkách (atmosférický tlak) nebyl znát.

Z rovnice 27 víme, že intenzita zvukové vlny by měla být přímo úměrná hustotě okolního prostředí a tedy přímo úměrná tlaku (rovnice 26). Z grafu 14 je patrné, že křivky intenzity zvuku v závislosti na tlaku mají spíše exponenciální charakter, nepočítáme-li náhlý pokles intenzity u frekvencí 3500 Hz a 5200 Hz. Vzhledem k tomu, že stupnice tlaku vyjádřená ve voltech je ve skutečnosti logaritmického měřítka (přibližně), naměřené křivky by mohly být v souladu s teorií, což si pokusíme potvrdit v následujících grafech pro křivku s frekvencí zvuku 500 Hz, jenž je nejzdařilejší.

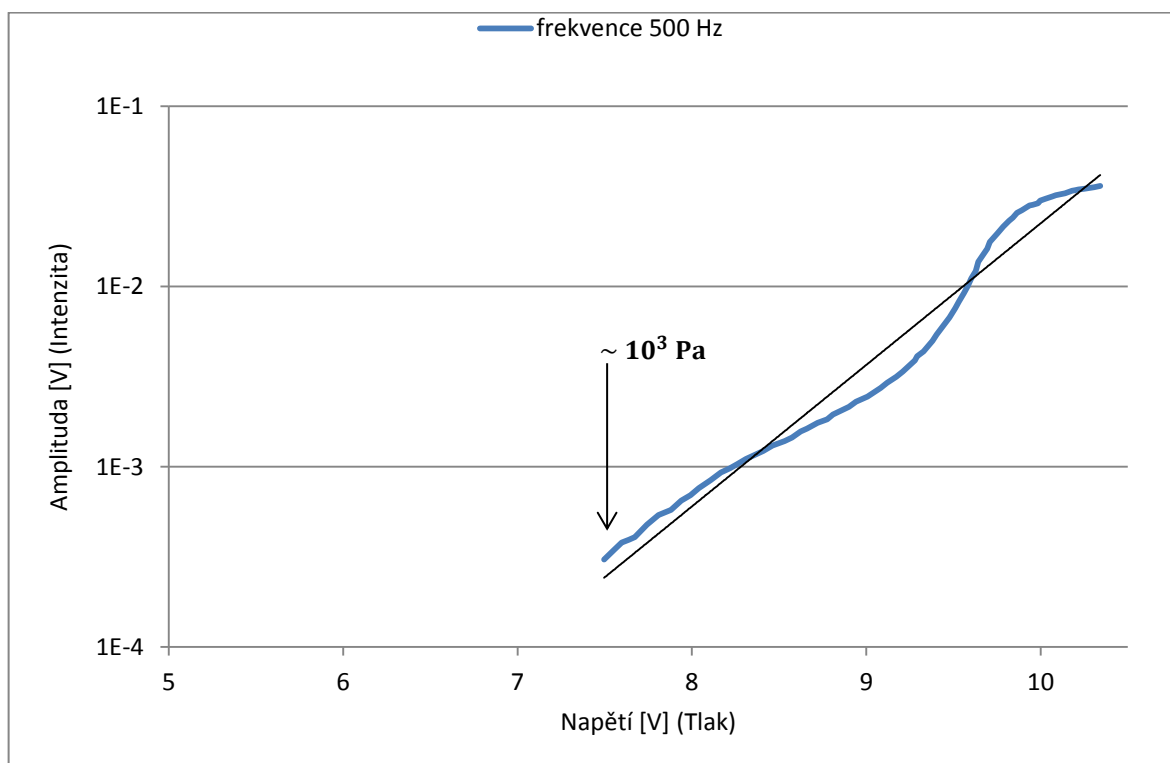


Graf 15: Závislost intenzity zvuku na tlaku okolního prostředí pro frekvenci zvuku 500 Hz.
Pouze tlak (vyjádřený ve voltech) je v logaritmickém měřítku.



Graf 16: Závislost intenzity zvuku na tlaku okolního prostředí pro frekvenci zvuku 500 Hz.
Tlak (vyjádřený ve voltech) i intenzita jsou v logaritmickém měřítku.

V grafu 16 vidíme, že pokud vyjádříme stupnici intenzity také v logaritmickém měřítku, lépe tak vyplyne přímá úměra mezi intenzitou zvuku a tlakem prostředí (rovnice 27). Dále si lze všimnout již zmiňované hranice pro přenos zvuku, kdy závislost intenzity na tlaku zaznamenáváme až od hodnoty 10^3 Pa (7,5 V). Lineární závislost dle teorie můžeme pozorovat v grafu 17.



Graf 17: Lineární závislost intenzity zvuku na tlaku okolního prostředí podle rovnice 27.

Z grafu 17 lze vyčíst pouze přibližnou lineární závislost, neboť měření intenzity zvuku, jak již bylo diskutováno, je příliš zjednodušené (systém reproduktor a PC mikrofon) a navíc exponenciální charakter závislosti tlaku na napětí vakuometrů je taktéž pouze přibližný.

Závěr

Práce je zaměřena na vakuum, jeho získávání, měření a související aspekty. Cílem první části bylo seznámit se s fyzikálními principy vakuové techniky (základní vztahy, čerpací vodivost a podobně) a popis základních typů vývěv a měrek (jejich aplikace a funkčnost). Druhá část práce se pak zabývá konkrétní laboratorní sestavou s difúzní vývěvou (sestava vývěv a měrek), kterou jsme testovali a prováděli různá charakteristická měření. Ověřovali jsme funkčnost vývěv a měrek, čerpací vodivost (rychlost) a také vliv velikosti a tvaru čerpaného prostoru na kvalitu čerpání. Práce má tedy zároveň sloužit jako manuál k celé laboratorní sestavě pro budoucí uživatele. V poslední části práce jsme provedli experiment se šířením zvuku ve vakuu, kde jsme měřili intenzitu zvuku při různých hodnotách vakua a frekvencí pomocí přenosové soustavy reproduktor a mikrofon.

Během testování laboratorní sestavy jsme nasbírali určitá fakta a postřehy o jejím chování při provozu, díky kterým jsme lépe pochopili fyzikální principy vakuové techniky. Měřili jsme zejména čerpací charakteristiky vývěv za různých podmínek (například při změnách geometrie vakuového systému) a ověřovali tak správnost fungování celé laboratorní sestavy. Měření jsme prováděli pro všechny vakuometry v sestavě, neboť jsme tak zároveň testovali jejich funkčnost. Při ověřování vlivu velikosti a tvaru čerpaného prostoru na kvalitu čerpání jsme potvrdili, že u molekulárního proudění velice záleží na geometrických parametrech vakuového systému. Ověřili jsme, že za určitých geometrických podmínek lze i větší objemy čerpat kvalitněji (rychleji a na nižší mezní tlak), než objemy menší.

U experimentu se šířením zvuku ve vakuu jsme ověřovali teorii, která nám říká, že intenzita zvuku na tlaku okolního prostředí závisí a to přímou úměrou. Teorie se nám podařila potvrdit pouze částečně, neboť způsob, jakým jsme takto náročné měření prováděli, byl příliš zjednodušený a měření tak bylo zatíženo velkým množstvím chyb. Použitá přenosová soustava (reproduktor a mikrofon jako PC doplněk) tedy není pro takový experiment ideálním měřicím systémem, neboť použitý reproduktor i mikrofon nejsou určeny k práci za takových podmínek, jako je například změna tlaku okolního prostředí a podobně.

Seznam použitých pramenů

- [1] Milan Erben, *Vakuová technika*. Učební text, Univerzita Pardubice, 2008
- [2] James M. Laferty, *Vacuum Technology*. Elektronický text (PDF), zdroj nezjištěn
- [3] Libor Pátý, *Fyzika nízkých tlaků*. Academia Praha, 1968
- [4] Vladimír Sítko, *Vakuová technika*. SNTL Praha, 1966
- [5] Tomáš Rössler, *Měření vakua a kalibrace vakuometru* (Praktikum z experimentální techniky a měřicích metod I). Učební text, Univerzita Palackého v Olomouci, 2016
- [6] Technická dokumentace k difúzní vývěvě D 130 (LAVAT, Chotutice)
- [7] Technická dokumentace k rotační vývěvě VRO 05/21 (LAVAT, Chotutice)
- [8] Technická dokumentace k vakuometru Pirani VPR 1 (LAVAT, Chotutice)
- [9] Technická dokumentace k vakuometru Penning VPG 1 (LAVAT, Chotutice)
- [10] Technická dokumentace k vakuometru Penning AIM-S-NW25 (Edwards, Crawley)
- [11] Technická dokumentace k třicestnému ventilu V 3-16 (LAVAT, Chotutice)
- [12] Technická dokumentace ke kulovému ventilu KK 16 (LAVAT, Chotutice)
- [13] Technická dokumentace k vakuové komoře SVC-6050 (MTI Corp., Richmond)
- [14] Jiří Mikulčák a kolektiv, *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Prometheus Praha, 2008
- [15] Glenn Elert, *The Physics Hypertextbook*. Dostupné z WWW: physics.info/intensity/