

Hydrostatická měření

Úvod:

K měření malých tlaků a tlakových diferencí se často používají trubice tvaru U, dále nazývané U-manometry. Měření těmito trubicemi je založeno na praktickém využití Pascalova zákona k výpočtům hodnot

- 1) aktuálního atmosférického tlaku
- 2) hustoty jedné z vzájemně nemísitelných kapalin
- 3) tlakové difference na armaturním prvku
- 4) malého tlaku na sacím potrubí čerpadel
- 5) malé tlakové difference z údaje měřítka šikmého manometru
- 6) velmi malých tlaků – vakuí.

Pro měření větších přetlaků (nad 130 kPa) se používají deformační manometry, na měření podtlaků též deformační vakuometry nebo rtuťový vakuometr podle Anschütze.

Úkol:

Z výsledku měření na U-manometru

- 1) naplněném rtuťí vypočtete hodnotu aktuálního atmosférického tlaku v laboratoři,
- 2) naplněném dvěma nemísitelnými kapalinami vypočtete neznámou hustotu kapaliny, znáte-li hustotu srovnávací kapaliny (nejčastěji vody),
- 3a) naplněném vodou vypočtete tlakovou diferencí na armaturním prvku na potrubí, kterým proudí plyn,
- 3b) naplněném manometrickou kapalinou o větší hustotě než voda vypočtete tlakovou diferencí na armaturním prvku na potrubí, kterým proudí voda,
- 4) naplněném manometrickou kapalinou vypočtete malou hodnotu tlaku na sacím potrubí čerpadla při malé sací výšce,
- 5) z výsledku měření na šikmém manometru vypočtete podtlak (tah) v minimálně otevřeném pracovním otvoru digestoře, b) v různě otevřeném otvoru odsávacího potrubí, c) v odsávacím potrubí asi 0,5 m od otevřeného otvoru nebo v komínu,
- 6) z výsledku měření na uzavřeném rtuťovém manometru vypočtete hodnotu nízkého tlaku (vakua).

Teoretický úvod:

Principy měření a výpočtů v úkolech 1) až 3b) a 5) a 6) jsou podrobně vysvětleny v učebnici chemické techniky.

4) Tlak na sacím potrubí čerpadel a) s malou nebo dokonce b) zápornou geometrickou sací výškou vypočteme z rozdílu výšek manometrické kapaliny o větší hustotě ρ_m než má voda ρ_v a s vodou nemísitelné. Malou

geometrickou sací výšku má čerpadlo, které nasává kapalinu s hladinou v malé výšce pod osou čerpadla, zápornou sací výšku, je-li hladina čerpané kapaliny nad osou čerpadla. Výpočty tlaků v obou variantách vysvětlují schemata a) a b). V obou případech je manometrická kapalina v rameni manometru otevřeném do ovzduší převrstvena ochranným sloupečkem vody zabraňujícím vypařování. Sloupeček je ve vzdálenosti h_v od nuly stupnice,

Ve variantě a) je odčítání na stupnicích snadné, protože hladina manometrické kapaliny k nim přiléhá. Podle obrázku a) platí pro uvedené tlaky

$$\begin{aligned}
 p_{1a} &= p_A + (h_0 + h_l) \rho_v g \\
 p_A &= p_{at} + (h_p - h_v) \rho_v g - (h_l + h_p) \rho_m g \\
 p_{1a} &= p_{at} - (h_l + h_p) \rho_m g + (h_0 + h_l + h_p - h_v) \rho_v g
 \end{aligned}$$

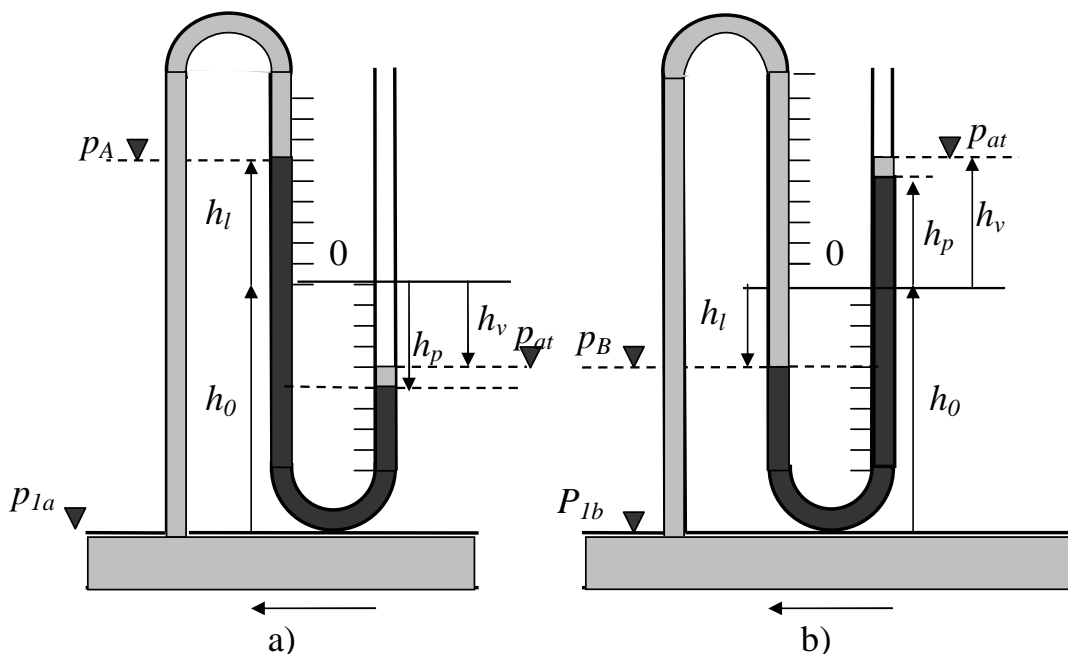
(1)

Ve variantě b) je odečítání na stupnicích horší. Hladiny manometrické kapaliny ke stupnicím nepřiléhají. Pro tlaky uvedené na obrázku b) platí:

$$\begin{aligned}
 p_{1b} &= p_B + (h_0 - h_l) \rho_v g \\
 p_B &= p_{at} + (h_v - h_p) \rho_v g + (h_l + h_p) \rho_m g \\
 p_{1b} &= p_{at} + (h_l + h_p) \rho_m g + (h_0 - h_l - h_p + h_v) \rho_v g
 \end{aligned}$$

(2)

Rovnice (1) a (2) se liší opačnými znaménky u členů h_l , h_p a h_v a také opačnými smysly odečítání jejich výšek jak je patrné z obrázků.



Budeme-li odečítat hodnoty na stupnicích měřítek přiléhajících k rozhraní kapalin v ramenech kladně a hodnoty v ramenech nepřiléhajících ke stupnicím záporně, obdržíme jednotný vzorec pro výpočet tlaku v sacím potrubí u obou variant, shodný s rov.(1):

$$p_1 = p_{at} + [(h_0 + h_l + h_p - h_v) \rho_v - (h_l + h_p) \rho_m] g \quad (3)$$

Protože výška ochranného sloupečku vody $h_p - h_v = \Delta h_v$ se při opakovaných měřeních nemění, můžeme si odečítání hodnoty h_v ušetřit zavedením Δh_v do předchozí rovnice

$$p_1 = p_{at} + [(h_0 + \Delta h_v + h_l) \rho_v - (h_l - h_p) \rho_m] g \quad (4)$$

Sestava aparatur:

Uvedené manometry se používají k přímým měřením, např. barometrického tlaku nebo se připojují k aparaturním dílům uvedeným v dalších úlohách.

Postup při měření:

1) *Aktuální atmosférický tlak* vypočteme jako hydrostatický tlak sloupce rtuti rovný atmosférickému tlaku, protože v rameni U-manometru s uzavřeným kohoutem je nad hladinou rtuti pod kohoutem zanedbatelný tlak sytých par rtuti (při 20 °C jen 0,17 Pa). U-manometr používaný barometr musí mít celkovou délku stupnice 1000 mm (500 mm pod nulou a 500 mm nad nulou stupnice). Před měřením jej musíme adjustovat (upravit pro správné měření), protože uzavírací kohout není absolutně těsný. O potřebě adjustace se přesvědčíme tak, že U-manometr sejmeme se stěny, postavíme jej na dno podložní mísy naplněné asi do ¼ výšky vodou a položené na podlahu, odzátujeme rameno bez kohoutu a manometr pomalu skláníme. Otvor otevřeného ramene musí být pochopitelně vždy nejvýše, aby nedošlo k vylití rtuti. Nezaplní-li rtuť rameno s kohoutem až po kohout nebo o tom pochybujeme (což bývá nejčastěji), je nutné barometr adjustovat.

Při manipulaci se rtutí musíme pracovat co nejopatrněji vzhledem k vysoké toxicitě jejích par a v žádném případě nedopustit její rozlití!!!

Při adjustaci dodržujeme stejná bezpečnostní opatření jako při její kontrole. Mísa s vodou a manometrem zůstává na podlaze. Odzátujeme také rameno s kohoutem a kohout pomalu otevřeme. Rtuť nad kohoutem steče do náplně manometru. Hladiny rtuti by měly být v obou ramenech nejméně 25 mm nad nulou stupnice, aby se předešlo riziku probublání

vzduchu do rtuti a zkomplikování adjustace, protože kohout, nad který musí rtuť při adjustaci vystoupit je asi 50 mm nad koncem stupnice dlouhé 500 mm. Náplň rtuti by ale neměla být v obou ramenech vyšší než 100 mm nad nulou stupnice, aby se daly bezpečně měřit i vyšší atmosférické tlaky (teoreticky až 106 kPa).

Po případné úpravě náplně manometru spojíme trubici s otevřeným kohoutem dostatečně dlouhou a těsnou hadicí s pojistnou a tlak vyrovnávající nádobou (odsávací baňkou) opatřenou uzavíracím a zároveň zavzdušňovacím kohoutem. Kohout na pojistné láhvi zavřeme a zapneme vývěvu. Po dosažení rozdílu výšek hladin rtuti aspoň 500 mm začneme manometr naklánět tak, aby rtuť v trubici s kohoutem pomalu stoupala. Jakmile rtuť vystoupí asi 1 mm nad kohout, uzavřeme jej a manometr postavíme do svislé polohy. Zavzdušňovacím kohoutem na pojistné láhvi pomalu zrušíme podtlak a manometr odpojíme. Tím je adjustace ukončena. Obě jeho ramena manometru zazátkujeme pryžovými zátkami a manometr zavěsíme na stěnu.

Před měřením odzátkujeme rameno bez kohoutu. Odečteme rozdíl výšek hladin rtuti v ramenech manometru a na vedle umístěném teploměru teplotu laboratoře potřebnou k nalezení hustoty rtuti v tabulkách. Protože stupnice manometru nepřiléhá k hladinám rtuti, usnadníme si odečítání vložením proužků papíru mezi trubice a stupnice tak, aby horní okraje proužků byly rovnoběžné s dělením stupnice.

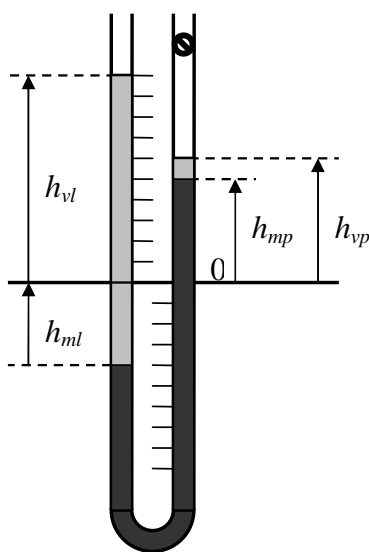
Podle vypočteného atmosférického tlaku nastavíme (adjustujeme) i laboratorní deformační barometr (barograf) otáčením seřizovacího (justačního) kolečka v podlaze skříňky tak, aby hrot zapisovací páčky ukazoval na stupnici hodnotu shodnou s hodnotou vypočtenou podle rozdílu výšek na rtuťovém barometru.

Pokud jsou údaje obou barometrů rozporné, je třeba oba barometry adjustovat.

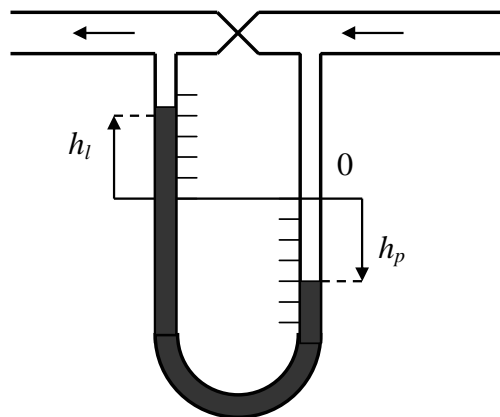
2) Při *stanovení hustoty manometrické kapaliny* použijeme U-manometr s celkovou délkou stupnice 1000 mm, umožňujícím maximální přesnost stanovení. Hustotu manometrické kapaliny potřebujeme stanovit např. pro výpočet tlaku na sání čerpadla, odporů armaturních prvků atd. Volba manometrických kapalin je v tomto případě omezena požadavkem malé sací výšky čerpadla, nemísitelnosti s vodou a podstatně větší hustoty než má voda. Rtuť má hustotu příliš velkou a měření by bylo zatíženo větší chybou než při použití trichlor- nebo tetrachlormethanu obarvených krystalky jodu, což jsou nejsnáze dostupné kapaliny s dostatečně velkou hustotou. Manipulace se rtutí je také podstatně náročnější a nebezpečnější

než chlorovanými uhlovodíky. Rizikovost práce s chlorovanými uhlovodíky snížíme po naplnění manometru jejich převrstvením sloupečkem vody.

Trubice U-manometru naplníme při otevřeném kohoutu manometrickou kapalinou přibližně na nulu stupnice. Usilovat o vyrovnání přesně na nulu nemá smysl, protože přiměřených ulpívají drobné kapky manometrické kapaliny na stěnách trubic. Manometrickou kapalinu převrstvíme v jednom z ramen (lépe pravém z hlediska použití U-manometru pro měření na sací části okruhu čerpadla) 5 až 10 mm vysokým sloupcem vody o výšce h_{vl} , do druhého (pravého) ramene nalijeme stříčkou maximální měřitelný sloupec vody o výšce h_{vp} a odečteme výšky hladin na rozhraních manometrické kapaliny h_{ml} v levém a h_{mp} v pravém rameni podle obrázku a hodnoty zapíšeme. Nevhodné výšky hladin vody upravíme odebráním vody vloženou tenkou skleněnou trubičkou.



3a) a 3b) Při výpočtech tlakových diferencí na armaturních prvcích připojíme U-manometr na jejich tlakové odběry podle schematu dostatečně dlouhými



hadicemi.

Při měření tlakové diference na potrubí s vodou musíme obě ramena U-manometru nad hladinou manometrické kapaliny naplnit vodou. Nejprve naplníme stříčkou rameno s kohoutem až po okraj a kohout zavřeme. Pak naplníme po okraj i druhé rameno.

Uvedeme do chodu čerpadlo a kohoutem před rotametrem nastavíme mírný průtok vody (1000 až 1500 l/hod). Přívodní hadici nasazenou na tlakový odběr před armaturním prvkem zvedneme tak, aby byla po celé délce výš než kohout tlakového odběru. Pak kohout tlakového odběru

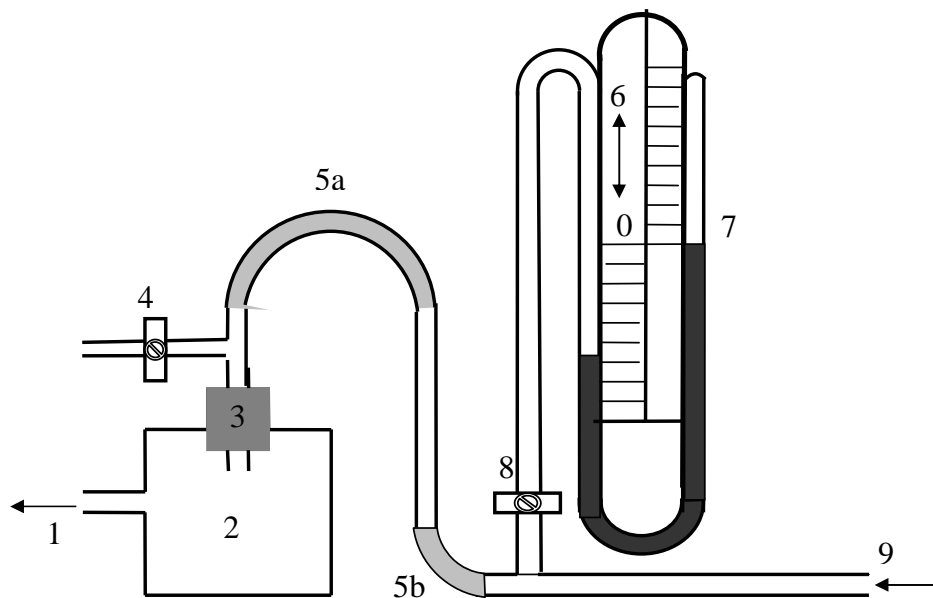
pootevřeme a jakmile začne z otvoru hadice vytékat voda, uzavřeme je, Konec hadice přehneme palcem přes ukazovák a nasadíme na pravé rameno U-manometru. Stejně odvzdušníme i druhou hadici a navlékneme ji na druhé rameno manometru,

Otevřeme oba kohouty, ventilem na potrubí před rotametrem volíme průtoky, po každém nastavení průtoku odečítáme hodnoty h_l a h_p na manometru a zapíšeme je. Při měření na tlakové diference na ventilu nesmíme nastavit průtok, při kterém by hodnota odečítaná na stupnici manometru (čtení) překročila 450 mm. Při možných výkyvech hladin hrozí nebezpečí vytlačení manometrické kapaliny z manometru.

4) *Malé tlakové diference na sacím potrubí čerpadla* vypočteme z měření na U-manometru podle obrázků uvedených v teoretickém úvodu. U-manometr připravíme pro měření a přívodní hadici od tlakového odběru odvzdušníme způsobem popsáným v předchozím odstavci 3). V pravém rameni s kohoutem otevřeným do okolního ovzduší ponecháme jen sloupeček vody 5 až 10 mm vysoký. Po uvedení čerpadla do chodu měníme průtoky a odečítáme a zapisujeme hodnoty na stupnicích manometru.

5) *Šikmý manometr pro měření velmi nízkých tlakových diferencí* podle obr.12 na str.28 učebnice chemické techniky naplníme ve vodorovné poloze (podle libely na horní straně manometru) po nulu stupnice obarvenou vodou. Na šikmou trubici navlékneme dostatečně dlouhou hadici a její volný konec umístíme podle požadavku uvedeného v odst.5) *Úkol*. Pokles hladiny vody v zásobní nádobce manometru je vzhledem k objemu vody v měřicí trubici zanedbatelný.

6) *Uzavřený rtuťový manometr pro měření nízkých tlaků* podle obr.13 na str, 28 učebnice chemické techniky připojíme na evakuovanou aparaturu podle schématu. Otevřeme kohouty 4 a 8 , připojení 9 uzavřeme zátkou a uvedeme do chodu vývěvu.



1 - připojení vývěvy, 2 - pojistná láhev, 3 - provrtná zátka, 4 - tvarovka T s uzavíracím a zavzdušňovacím kohoutem, 5a,b - pryžové hadice, 6 – posuvné měřítko, 7 – vakuometr, 8 – kohout vakuometru, 9 – připojení evakuované aparatury nebo uzávěr zátkou.

Počkáme až se hladiny rtuti ustálí, zavřeme kohout vakuometru 8, nulu posuvného měřítka 6 nastavíme do roviny s hladinou rtuti v uzavřeném rameni, na stupnici odečteme výšku sloupce rtuti a zapíšeme ji. Hydrostatický tlak sloupce rtuti vyrovnává tlak v aparatuře nebo na sání vývěvy. Posouváním měřítka můžeme měřit tlaky ekvivalentní hydrostatickému tlaku až 100 mm vysokého sloupce rtuti, tj. až asi 13,3 kPa. Měřítkem měřitelné tlaky mohou dosáhnout hodnoty až 26,6 kPa ekvivalentní maximální délce měřítka 200 mm při laboratorní teplotě 22 °C. Po ukončení odečítání pomalu otevíráme kohout vakuometru 8 a po zaplnění uzavřené trubice jej uzavřeme. Měříme-li jen tlak dosažitelný vývěvou, můžeme ji ihned po zavření kohoutu 8 vypnout vývěvu, a pomalým otevíráním kohoutu 4 aparaturu zavzdušnit (tlak v ní vyrovnat s okolním).

Vyhodnocení výsledků měření:

1) Při stanovení aktuálního tlaku vzduchu v laboratoři byly na U-manometru v Sedlákově barometrické úpravě odečteny při teplotě 22 °C výšky rtuťových sloupců: v levém rameni 302 mm pod nulou, v pravém (s uzavíracím kohoutem) 431 mm nad nulou stupnice.

Aktuální tlak vzduchu v laboratoři je

$$p_{at} = \Delta h \rho g = (0302 + 0,431) \text{ m} \cdot 13\,541 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,807 \text{ m s}^{-2} = 97,3 \text{ kPa}.$$

2) Při stanovení hustoty ρ_m manometrické kapaliny byly na U-manometru podle obr. V odst 2) postupu při měření změřeny v pravém rameni: výška hladiny sloupečku vody o hustotě ρ_v $h_{vp} = 257$ mm, výška manometrické kapaliny $h_{mp} = 242$ mm nad nulou stupnice, v levém rameni: výška hladiny vody $h_{vl} = 493$ mm nad nulou stupnice a výška manometrické kapaliny $h_{ml} = 238$ mm pod nulou stupnice při teplotě 22 °C.

Podle uvedeného obrázku platí pro hydrostatické tlaky ve výšce rozhraní manometrické kapaliny a vody v levém rameni manometru

$$(h_{vl} + h_{ml}) \rho_v g = [(h_{ml} + h_{mp}) \rho_m + (h_{vp} - h_{mp}) \rho_v] g,$$

a po úpravě

$$\rho_m = \frac{(h_{vl} + h_{ml} + h_{mp} - h_{vp}) \rho_v}{h_{ml} + h_{mp}} = \frac{(493 + 238 + 242 - 257) \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 998 \text{ kg m}^{-3}}{(238 + 242) \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1490 \text{ kg m}^{-3}$$

3a) Tlaková diference na armaturním prvku, kterým protékala voda o teplotě 10 °C se projevila tak, že v U-manometru naplněném tetrachlormethanem připojeném na tlakové odběry armaturního prvku vystoupila v jednom rameni hladina tetrachlormethanu 36 mm nad nulu, v druhém poklesla 42 mm pod nulu stupnice. Tlaková diference měla hodnotu

$$\Delta p = (h_l + h_p) (\rho_m - \rho_v) g = (36 + 42) \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot (1595 - 1000) \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,807 \text{ m s}^{-2} = 455 \text{ Pa}.$$

3b) Tlaková diference na armaturním prvku, kterým protékal dusík se projevila v U-manometru stejným rozdílem výšek hladin vody o teplotě 20 °C jako při měření v odst. 3a). Tlaková diference pak měla hodnotu

$$\Delta p = 78 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 998 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,807 \text{ m s}^{-2} = 763 \text{ Pa}.$$

4) Při měření tlaku p_l v sacím potrubí čerpadla čerpajícího vodu byly při teplotě 22 °C a atmosférickém tlaku 99,5 kPa naměřeny na U-manometru s náplní CCl_4 podle shora uvedených obrázků výšky: a) $h_0 = 722$ mm, $h_l = 312$ mm, $h_p = 315$ mm, $h_v = 305$ mm, b) $h_0 = 722$ mm, $h_l = -312$ mm, $h_p = -315$ mm a $h_v = -325$ mm.

Tlaky v potrubí měly hodnoty:

$$p_{1a} = 99,5 \text{ kPa} + [(0.722 + 0.312 + 0.315 - 0.305) \text{ m} \cdot 998 \text{ kg m}^{-3} - (0.312 + 0.315) \text{ m} \cdot 1590 \text{ kg m}^{-3}] \cdot 9.807 \text{ m s}^{-2} - 99.1 \text{ kPa},$$

$$p_{1b} = 99,5 \text{ kPa} + [(0.722 - 0.312 - 0.315 + 0.325) \text{ m} \cdot 998 \text{ kg m}^{-3} - (-0.312 - 0.315) \text{ m} \cdot 1590] \cdot 9.807 \text{ Pa} = 120.5 \text{ kPa}.$$

5) Při měření tlaku digestoře při 22 °C dosahovala hladina vody k 12. dílku stupnice. Stupnice měla 35 dílků, 35. byl ve výšce 40 mm nad nultým. Digestoř měla tah

$$\Delta p = \frac{40 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{35} \cdot 12 \cdot 998 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} = 134 \text{ Pa}.$$

6) Na uzavřeném rtuťovém manometru (podle Anchütze) připojeném na vývěvu byl při 22 °C změřen rozdíl výšek hladin rtuti 45 mm při atmosférickém tlaku 98,0 kPa. Vývěva vyvozovala tlak

$$p = 43 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 13,5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} = 5,7 \text{ kPa}$$

a podtlak (vakuum)

$$\Delta p = (98,0 - 5,7) \text{ kPa} .$$

Kontrolní otázky:

Nakreslete schéma měření, odvoďte vzorec pro výpočet a uveďte příklad výpočtu se zvolenými výškami hladin:

- 1) aktuálního atmosférického tlaku měřením na U-manometru v barometrické úpravě,
- 2) hustoty manometrické kapaliny měřením na U-manometru,
- 3) tlakové diference na armaturním prvku umístěném na potrubí, kterým protéká a) kapalina, b) plyn měřením na U-manometru,
- 4) při výpočtu malého tlaku na sacím potrubí čerpadla měřením na U-manometru,
- 5) tahu digestoře nebo komínu měřením na šikmém manometru,
- 6) nízkého tlaku (vakua) při měření uzavřeným rtuťovým manometrem.