MUNI SCI

Praktikum školních pokusů

Úloha č. 2: Mechanika kapalin

jarní semestr 2020

Obsah

1 Statika kapalin

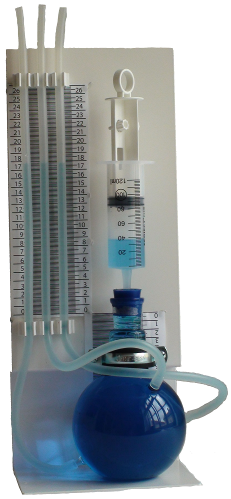
1.1 Pascalův zákon

E 1 – Nádoba na demonstraci šíření tlaku

V manometrických trubičkách udávajících tlak v kapalině vystoupí hladina kapaliny při působení vnější silou vždy do stejné výše, nezávisle na místě připojení.

Potřeby

- Nádoba na demonstraci šíření tlaku, 5.4



Provedení

V klidovém stavu bez vnějšího působení jsou polohy hladiny kapaliny v trubičkách stejné jako poloha hladiny v nádobě. Pokud stříkačkou stlačíme vzduch v nádobě nad hladinou o tlak Δp, dojde ke stejnému vzestupu hladin ve všech trubičkách, nezávisle na místě připojení.

Technické problémy

Pokud tlak v nádobě zvýšíme příliš, kapalina z trubiček vystříkne. Při vytvoření podtlaku se do trubiček dostanou vzduchové bubliny, které znemožní provést experiment korektně.

Fyzikální interpretace

Tlak v kapalině je ve všech místech stejný (Pascalův zákon), proto vzestup hladiny v trubičce nezávisí na místě připojení trubičky. Výška hladiny kapaliny v trubičce nad hladinou kapaliny v nádobě je mírou změny tlaku Δp v nádobě vyvolaného vnější silou.

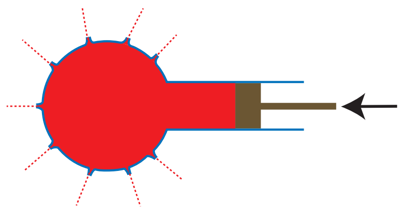
E 2 – Stříkací ježek

Kapalina pod tlakem stříká otvorem ve stěně nádoby vždy ve směru kolmém k této stěně.

Potřeby

- Stříkací ježek v provedení s pístem nebo stříkací válec připojitelný k vodovodu nebo mikrotenový sáček a špendlíky, 5.3
- plato na zachycování stříkající vody, 4.2
- hadr na utírání vody, 5.3

Stříkací ježek je kulová skleněná baňka s otvory, ze kterých při zvýšení tlaku v baňce tryská kapalina. Ve verzi s pístem na kulovou baňku navazuje skleněný válec s pístem, kterým lze zvýšit tlak v baňce. Vytažené skleněné trubičky mají směřovat ke stěně nádoby kolmo, výtokové otvory by měly být rotačně symetrické a mít ostrou odtrhovou hranu. Je-li toto splněno, pak počáteční směr výstřiku vody je kolmý na stěnu koule. Další vývoj směru proudu vody je různý podle jeho orientace vzhledem ke svislému směru.



Provedení (ježek s pístem)

Na stůl položíme plato na zachycování vody. Stříkacího ježka naplníme vodou a tlakem pístu vodu vytlačujeme z nádoby. Pozorujeme, jak se směr stříkající vody mění při různé síle působící na píst.

Technické problémy

Tenké skleněné trysky na baňce jsou velmi křehké a snadno se ulomí, je tedy zapotřebí vyvarovat se (zejména při plnění) jakéhokoliv kontaktu s jinou nádobou.

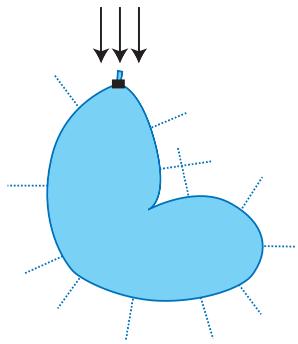
Provedení (stříkací válec)

Ve válci je 7 malých otvorů. Úhel otvorů vzhledem k vodorovnému směru je 0°, 15°, 30°, ... 90°.

Na stůl položíme plato na zachycování vody. Stříkací válec připojíme hadicí k vodovodu a položíme ho na plato. Krátce pustíme vodu z vodovodu; voda z válce stříká ve směru otvorů. Dráha každého výstřiku vody se pak zakřivuje působením tíhy do tvaru paraboly.

Provedení (děrovaný mikrotenový sáček)

To, že kapalina pod tlakem stříká otvorem ve stěně nádoby k této stěně vždy kolmo, můžeme ukázat i pomocí mikrotenového sáčku, ve kterém uděláme špendlíkem na různých místech drobné otvory. Sáček naplníme vodou, uzavřeme, propícháme a rukou na něj vyvíjíme mírný tlak. Voda stříká mnoha otvory ven. Výhodou tohoto pokusu vzhledem k pokusu se stříkacím ježkem je to, že prokazuje výše uvedené tvrzení nejen na kulové ploše, ale i pro obecně zakřivené povrchy. Navíc vybavení pro pokus je běžně dostupné.



E 3 – Hydraulický lis

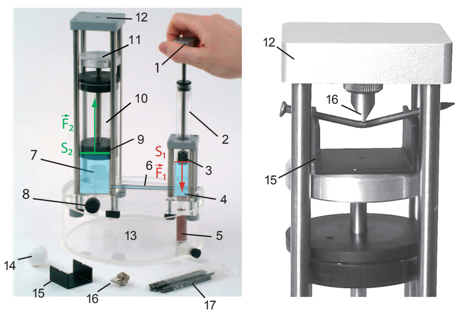
V důsledku nestlačitelnosti kapaliny lze působením malou silou na malý píst dosáhnout zdvihu velkého pístu, který pak působí na deformovaný předmět velkou silou.

Potřeby

- Hydraulický lis se stojanem, 5.4
- miska pod hydraulický lis, kádinka na nalévání vody do lisu,
- destilovaná voda, 5.3
- příslušenství k lisu a jiné předměty vhodné k deformaci (ořechy, hřebíky, polystyrénová koule,...), 5.3

Příprava

Písty zvedneme zhruba dva až tři centimetry nad úroveň spojovací trubičky, lis otočíme sací hadicí nahoru a naplníme ho skrz sací hadici vodou. Otevřeme výpusť a použijeme ji k vytlačení vzduchových bublin z lisu, poté ji uzavřeme. Sací hadici naplníme po okraj vodou,



1 - držadlo malého pístu
2 - malý válec, vnitřní průměr 16 mm
3 - malý píst, průměr 16 mm, pracovní zdvih 60 mm
4 - tlakový ventil (kulička)
5 - sací hadice
6 - spojovací trubice mezi válci
7 - tlakový ventilový píst a výpusť

10 - velký válec, vnitřní průměr 56 mm
11 - pracovní plošina lisu
12 - přítlačná deska
13 - zásobní nádoba na kapalinu pro lis
14 - polystyrenová kulička
15 - držák tyčinek (hřebíků)
16 - břit
17 - železné tyčinky k ohýbání

ucpeme prstem, lis umístíme do pracovní polohy nad misku s vodou a prst odejmeme. V lisu by se neměly nacházet vzduchové bubliny.

Provedení

Do prostoru mezi přítlačnou desku a pracovní plošinu lisu umístíme deformovaný předmět (polystyrénovou kouli, ořech, břit s držákem a hřebíky dle obrázku,...). Držadlo malého pístu stlačujeme směrem dolů a následně zdviháme, dokud nedojde k požadované deformaci předmětu. Poté pomocí šroubu otevřeme výpusť a stlačením pracovní plošiny směrem dolů odstraníme z lisu nadbytečnou vodu.

Po skončení experimentů vylijeme vodu co nejlépe z lisu a celou sestavu uložíme na místo.

Technické problémy

Se šroubem na otvírání výpusti manipulujte opatrně, závit ve stěně lisu nestrhněte!

Fyzikální interpretace

Vodu považujeme za nestlačitelnou kapalinu. Působíme-li v užším válci na kapalinu pomocí pístu, zvyšujeme v kapalině tlak. V důsledku toho vzniká tlaková síla, která zvedá směrem vzhůru širší píst. Protože tlak způsobený vnější silou je číselně roven podílu velikosti síly F a plochy S, na kterou síla působí, platí pro hydraulický lis podmínka $F_1 : S_1 = F_2 : S_2$, odkud vychází, že síly působící na jednotlivé písty jsou ve stejném poměru jako plochy těchto pístů:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Známe-li poměr velikosti ploch, můžeme spočítat, kolikrát je větší síla působící na větší píst než síla, kterou působíme na píst menší. V případě znalosti síly, kterou působíme na menší píst, můžeme určit i velikost větší síly číselně. Známe-li velikost pracovního zdvihu menšího pístu, můžeme určit práci, kterou při stlačování lisu konáme, a tedy i zdvih většího pístu (porovnejte velikost obou zdvihů, zdůvodněte).

1.2 Hydrostatický tlak

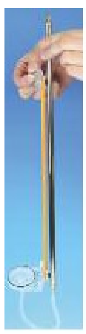
E 4 – Hartlova tlaková ponorná sonda

Hydrostatický tlak roste s hloubkou kapaliny a na orientaci tlakové sondy nezávisí.

Potřeby

- Hartlova tlaková sonda s možností změny orientace sondy, 5.5
- trojice tlakových sond s různými orientacemi, 5.5
- nádoba s vodou opatřená stupnicí, 4.3
- U-trubice nebo diferenční digitální tlakoměr,
- propojovací hadičky. 4.5

Hartlova tlaková sonda je nádobka překrytá pružnou blánou, jejíž otevřený konec je silikonovou hadičkou přiveden do trubice, která může být připojena k tlakoměru. Tlaková sonda se používá ke zjišťování tlaku v kapalině.



Provedení

Tlakovou sondu připojíme k U-trubici nebo diferenčnímu digitálnímu tlakoměru. Sondu ponoříme do nádoby s vodou a sledujeme, jak se tlak mění při změně hloubky nebo orientace tlakové sondy. Pomocí měřítka na stěně nádoby určíme hloubku ponoření sondy. Orientaci sondy můžeme měnit průběžně během ponoření sondy lankovým vedením.

Technické problémy

V nádobě je vhodné mít vodu o teplotě okolního prostředí. Pokud v nádobě máme chladnou vodu z vodovodu, díky ochlazení vzduchu uvnitř sondy v ní při ponoření klesne tlak.

Fyzikální interpretace

Fakt, že naměřený tlak nezávisí na orientaci tlakové sondy, je důkazem toho, že tlak se v kapalinách šíří všemi směry stejně (je všesměrový, izotropní). V hloubce h pod hladinou kapaliny je hydrostatický tlak

$$p = h\rho g,$$

kde ϱ je hustota, g tíhové zrychlení. Hydrostatický tlak působící z vnějšku na sondu se přenáší přes pružnou blánu do vzduchu uvnitř sondy. Sonda, spojovací hadice a tlakoměr tvoří uzavřený vzduchový prostor, ve kterém se tento tlak šíří dál. Naměřený tlak by měl proto odpovídat hydrostatickému tlaku v místě sondy, a měl by tedy být přímo úměrný hloubce ponoření.

Ve skutečnosti však naměříme tlak menší asi o $10-30\,\%$ měřené hodnoty. Tato systematická chyba měření má několik příčin. Největší roli hraje napětí, které v bláně sondy vzniká při průhybu. Toto napětí působí proti hydrostatickému tlaku a způsobuje, že naměřený tlak je menší než skutečný. Problém můžeme vyřešit tak, že zajistíme, aby v bláně napětí nebylo. Spojovací hadici nabodneme jehlou a stříkačkou připustíme do hadice malé množství vzduchu tak, aby blána nebyla při ponoření do určené hloubky prohnutá. Jinými systematickými vlivy, které mohou měřený tlak snížit, je zvětšení uzavřeného objemu plynu vlivem posunu hladiny v U-trubici nebo vlivem pružnosti přívodních hadiček.

E 5 – Trubice s příložným dnem na demonstraci hydrostatické tlakové síly

Dno přiložené ke vzduchem zaplněné skleněné trubici a následně ponořené do nádoby s vodou přitlačuje hydrostatická tlaková síla ke stěnám trubice. Dno odpadne až po zalití trubice vodou do stejné výše, jako je výška hladiny v nádobě.

Potřeby

- Válcová trubice a příložné dno na šňůrce, 5.4
- nádoba s vodou,
- obarvená voda.

Provedení

Do nádoby s vodou ponoříme válcovou trubici, na jejímž spodním okraji pomocí šňůrky zpočátku přidržujeme příložné dno. Pozorujeme, že když uvolníme tah šňůrky, dno v kapalině neodpadne. Do válce nyní začneme nalévat obarvenou vodu. Vidíme, že dno odpadne, až když hladina obarvené vody dosáhne výšky okolní hladiny v nádobě.

Místo válcové trubice můžeme použít Pascalovu vázu z přístroje pro demonstraci hydrostatického paradoxonu, případně do trubice můžeme též vložit výplň, kterou necháme plovat či přidržíme u stěny válce. Tím zmenšíme objem vody, kterou lze nalít do válce. Jak se výsledek experimentu změní? A v případě, že použijeme těžší dno?

Fyzikální interpretace

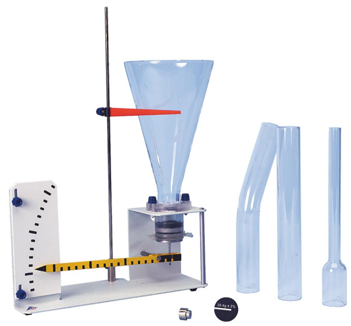
Dno válce je přitlačováno k okraji trubice hydrostatickým tlakem, který je závislý na výšce hladiny vody v nádobě. Naléváme-li do válce kapalinu o stejné hustotě, jakou má voda, vnější tlaková síla zespod na dno bude kompenzována hydrostatickou tlakovou silou uvnitř válce při stejné výšce hladiny, případně při nižší výšce, bude-li dno těžší. Hydrostatická tlaková síla působící zevně bude v tomto případě částečně kompenzována i vlastní tíhou dna.

E 6 – Pascalův přístroj pro demonstraci hydrostatického paradoxonu

Hydrostatický tlak závisí pouze na hloubce, nikoliv na tvaru nádoby či tíze kapaliny v nádobě.

Potřeby

- Základna Pascalova přístroje s měrkou tlakové síly a ukazatelem výšky hladiny, 5.4
- Pascalovy vázy (trubice různého průřezu a tvaru), 5.4

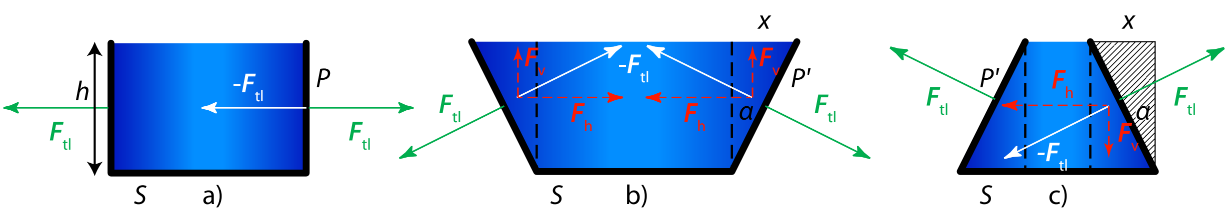


Provedení

Na základnu přístroje, opatřenou měrkou hydrostatické síly působící na dno nádoby, postupně nasazujeme jednotlivé Pascalovy vázy. Do trubice nalijeme vodu tak, aby vždy sahala do stejné výše dané ukazatelem. Pozorujeme, že síla působící na dno vázy je vždy stejná.

Fyzikální interpretace

Pascalovy vázy mají různý tvar, a tedy do váz musíme vždy nalít jiné množství vody, chceme-li, aby hladina sahala vždy do stejné výše. Tíha kapaliny je tedy v každém případě jiná. Přesto je měřená tlaková síla působící na dno vždy stejná. A protože trubice mají u dna stejný průřez, je u dna vždy stejný i hydrostatický tlak. Tento experiment tedy názorně ukazuje, že hydrostatická síla a tlak závisí jen na hloubce, nikoliv na tvaru nádoby či tíze kapaliny v nádobě.



Přes běžné odkazy na vztahy popisující hydrostatickou tlakovou sílu a tlak je na první pohled hydrostatické paradoxon skutečně paradoxonem. K pochopení, proč je hydrostatická tlaková síla působící na dno ve všech případech stejná, si prostudujme následující situace. V nich uvažujeme nádoby se stejnou plochou dna S a hloubkou kapaliny h.

V případě a) nádoby se svislými stěnami působí na stěny vodorovná hydrostatická tlaková síla o velikosti $F_{\mathrm{tl}} = P\rho g h/2$, kde P je plocha stěny a h hloubka kapaliny v nádobě. (Tato síla je kompenzována v obrázku neznázorněnou silou pružnosti/tuhosti nádoby.) Naproti tomu na kapalinu působí stěna podle třetího N.Z. opačnou silou $-F_{\mathrm{tl}}$, která je též vodorovná (a je kompenzována obdobnou silou od protilehlé stěny). Hydrostatická síla působící na dno je jednoduše rovna tíze kapaliny v nádobě, $F = S\rho gh$.

V případě b) a c) nádoby se šikmými stěnami má tlaková síla na stěnu velikost $F_{\mathrm{tl}} = P'\rho gh/2$, kde $P' = P/\cos\alpha$. Síla je větší a působí na větší plochu. Síla má ve statické situaci vždy směr normály stěny. Opačná síla, kterou naopak působí stěna na kapalinu, je tedy také šikmá a má složky o velikostech

$$F_{\mathrm{h}} = F_{\mathrm{tl}}\cos\alpha = P'\rho gh/2\cos\alpha = P\rho gh/2, \quad (1)$$
$$F_{\mathrm{v}} = F_{\mathrm{tl}}\sin\alpha = P'\rho gh/2\sin\alpha = P\rho gh/2\tan\alpha. \quad (2)$$

Horizontální složka F_{h} je tedy stejná jako v případě a). Protože $x = h\tan\alpha$, je vertikální složka F_{v} rovna

$$F_{\mathrm{v}} = P\rho gh\tan\alpha/2 = Px\rho g/2.$$

Protože $Px/2$ je objem klínové části nádoby, součet sil F_{v} od obou stěn má velikost tíhy kapaliny vyplňující klínové části, jež nádoba v b) má navíc vůči situaci a) a nádobě v c) chybí. Tato vertikální složka u nádoby b) směřuje vzhůru, tíha klínových částí je tedy u nádoby b) kompenzována stěnami a na dno opět působí pouze síla $F = Sh\rho g$. U nádoby c) vertikální složka síly, kterou na kapalinu působí stěny, směřuje dolů, kapalina je tedy naopak přitlačována dolů. Protože síla má opět velikost tíhy klínových (tentokrát chybějících) částí, výslednice sil na dno je stejná, jako by klíny kapaliny nechyběly (případ a)).

K obdobnému závěru lze dojít ještě jinou, názornější úvahou. Představme si, že v části c) je chybějící část kapaliny (vykreslena šrafovaně) vymezena nikoliv stěnou, ale myšleným tělesem, např. kýlem lodi. Na těleso působí směrem vzhůru vztlaková síla o velikosti tíhy vody o objemu ponořené části tělesa (tj. tíhy chybějící vody). Na kapalinu musí podle třetího N.Z. působit opačná síla stejné velikosti. „Chybějící voda“ se tedy u dna nepozná.

E 7 – Spojené nádoby různého tvaru a průměru

Ve spojených nádobách vystoupí hladiny kapaliny do stejné výše. Ale jen tehdy, když nehraje roli kapilarita.

Potřeby

- Přípravek spojené nádoby různých tvarů, 5.6
- přípravek spojené nádoby různého průměru, 5.6
- obarvená **destilovaná** voda, 5.3
- nálevka, 4.5

Provedení

Do přípravků nalijeme obarvenou destilovanou vodu. Pozorujeme, že kapalina v širokých trubicích vystoupí vždy do stejné výše nezávisle na tvaru trubice. V tenkých trubičkách (kapilárách) to ale neplatí, hladina vystoupí výše.

Technické problémy

Do přípravku naléváme pouze destilovanou vodu s dobře rozpuštěným barvivem. Zejména u kapilár hrozí ucpání trubic barvivem, navíc může dojít i k přerušení sloupce kapaliny vniknutím vzduchové bubliny při nalévání - tyto bubliny odstraníme nakloněním trubice anebo pomocí tenkého drátku, který ponoříme do trubic seshora. Po skončení experimentu trubice vypláchneme čistou destilovanou vodou.

Fyzikální interpretace

Tento experiment podobně jako experimenty E 5 a E 6 demonstrují závislost hydrostatického tlaku pouze na hloubce kapaliny. Po nalití kapaliny se tlak u dna vyrovná dosažením stejné výšky hladiny kapaliny. V kapilárách je však výška hladiny vody větší, neboť kapalina je navíc efektivně vytahována vzhůru kapilárním tlakem.

1.3 Archimédův zákon

E 8 – Dutý a plný válec

Potřeby

- Dutý a plný válec, kádinka s přepadem, kádinka k jímání vytlačené vody (jímací kádinka), 4.4
- siloměr,
- voda s kapkou jaru.

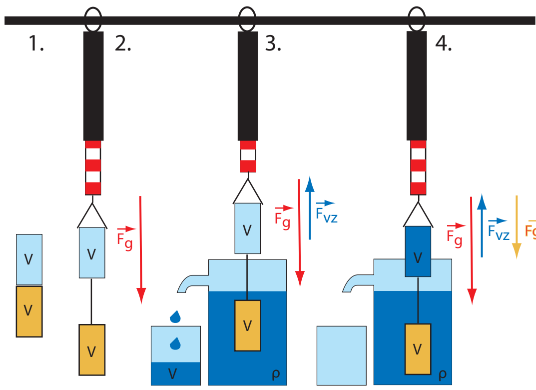
Příprava

Kádinku s přepadem naplníme vodou tak, až voda trošku přeteče přes přepad. Teprve potom pod přepad umístíme kádinku na jímání vytlačené vody.

Provedení

1. Nejprve ukážeme, že plný válec má stejný objem jako vnitřní prostor dutého válce.
2. Na siloměr zavěsíme dutý válec a pod něj plný válec – zjistíme údaj na siloměru.
3. Soustavu siloměr, dutý a plný válec přemístíme tak, že plný válec se zcela ponoří do vody v kádince s přepadem; siloměr vykazuje sílu menší než předtím. Voda přesahující přepad zvolna přetéká do jímací kádinky.
4. Plný válec ponecháváme ponořen do vody. Vodu z jímací kádinky přelijeme do dutého válce zavěšeného společně s plným válcem na siloměru; pak siloměr ukazuje hodnotu stejnou jako v bodě 2.

Tak přímo potvrzujeme, že síla nadlehčující těleso ponořené do kapaliny je právě rovna tíze kapaliny tělesem vytlačené.



Technické problémy

Pokus může být znepřesněn silami povrchového napětí.

Když do kádinky pomalu naléváme vodu, kádinka se naplní po úroveň přepadu. Nejen to, když pokračujeme v nalévání, hladina vody v kádince je mírně nad spodkem přepadového otvoru, držena silami povrchového napětí. Kdybychom do takto připravené kádinky ponořili těleso, přes přepad by protekla nejen voda o objemu stejném jako je objem ponořeného tělesa, ale navíc i část vody, která byla držena nad úrovní přepadu silami povrchového napětí. Počáteční naplnění kádinky je proto vhodné až do úrovně, v níž voda sama přeteče přes přepad.

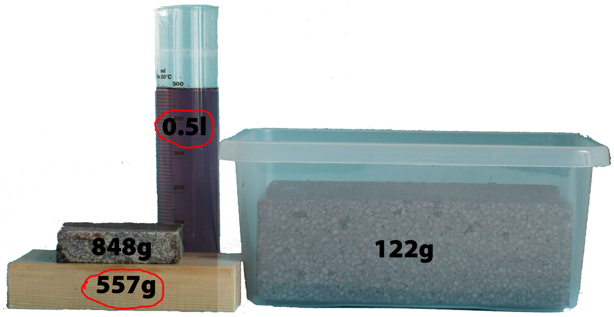
Fyzikální interpretace

Pokus přímo potvrzuje Archimédův zákon v jeho klasické formulaci: *„Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno silou, která se rovná tíze kapaliny tělesem vytlačené.“*

E 9 – Výtlak tenkou vrstvou kapaliny

Potřeby

- Nádoba větších rozměrů, 4.3
- polystyrenová loď,
- závaží,
- voda (mírně obarvená).



Příprava

Do nádoby nalijeme vodu o objemu 0,5 l. Na vodu položíme velmi lehkou loď z polystyrenu; používáme loď, jejíž půdorysné rozměry jsou jen o málo menší než vnitřní rozměry nádoby. Loď plove na hladině.

Provedení

Na loď položíme závaží o hmotnosti větší než 0,5 kg. Loď pod závažím poklesne, ale nadále plove ve vodě, nedotýká se dna. Hladina vody se zvedne a vytvoří tenkou slupku mezi nádobou a lodí.

Technické problémy

Aby poloha hladiny byla dobře viditelná, je vhodné mít vodu mírně obarvenou, například potravinářským barvivem. Volný pohyb lodě může být poněkud narušován silami povrchového napětí, které mírně vážou loď se stěnou nádoby, které se (téměř) dotýká.

Fyzikální interpretace

Nadlehčující síla je rovna tíze kapaliny o objemu stejném jako je objem ponořené části tělesa. Přitom tento objem je větší než skutečný objem kapaliny v nádobě. Klasická formulace Archimédova zákona obsahující pojem „kapalina vytlačená“ není v tomto případě vhodná – nemůžeme přece vytlačovat něco, co nemáme.

Korektnější je používat verzi Archimédova zákona ve tvaru: *„těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno silou, která se rovná tíze kapaliny o objemu rovném objemu ponořené části tělesa.“*

E 10 – Archimédův zákon na rovnoramenných vahách

Potřeby

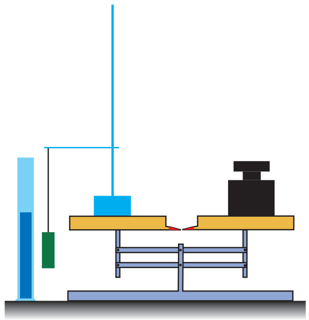
- Rovnoramenné kupecké váhy (laboratorní váhy jsou pro tento experiment příliš citlivé), 4.6
- dvě sady závaží – vhodné, abychom mohli vyvažovat nezávisle dvakrát, 4.6
- těžký stojánek s vodorovnou tyčinkou, 4.4

- hliníkový váleček opatřený zavěšovací nití, 4.4
- odměrný válec s vodou, 4.4

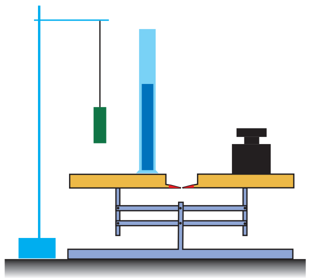
Příprava

Do odměrného válce nalijeme vodu tak, aby byl zaplněn asi ze dvou třetin. Kovové těleso zavěsíme na vodorovnou tyčinku těžkého stojánku.

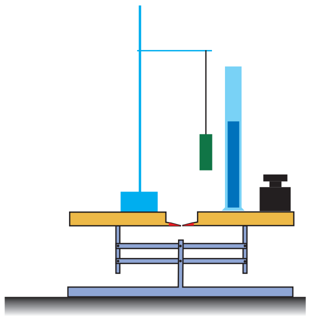
Provedení



verze 1



verze 2



verze 3

Dva základní předměty experimentu

- odměrný válec s vodou
- stojánek s visícím kovovým tělesem

podle svého umístění vytvářejí tři verze uspořádání experimentu (viz obrázek):

- **Verze 1:** Stojánek s visícím tělesem je uložen na misce vah, odměrný válec s vodou mimo váhy.
- **Verze 2:** Odměrný válec s vodou je uložen na misce vah, stojánek s visícím tělesem mimo váhy.
- **Verze 3:** Stojánek s visícím tělesem je uložen na misce vah, odměrný válec s vodou na druhé misce vah.

V každé verzi experimentu nastávají tyto etapy:

- Kovové těleso visí na stojánku tak, že je vně odměrného válce, není v něm ponořeno, ani se ho nedotýká zvenku. Váhy jsou v nerovnováze.
- Na vhodnou misku vah klademe vhodná závaží tak, až je dosaženo rovnováhy na vahách.
- Visící kovové těleso ponoříme do odměrného válce (vyzvednutí tělesa rukou, natočení stojánku, spuštění tělesa do nádoby). Těleso musí být zcela ponořeno a musí viset volně; nesmí se dotýkat stěn nádoby.

  Modifikace. Do odměrného válce s vodou ponoříme prst.
- Pokud ponořením tělesa do odměrného válce nastane nerovnováha na vahách, na vhodnou misku vah klademe vhodná závaží tak, až je dosaženo rovnováhy.

Technické problémy

Je potřeba dosáhnout výškového sladění mezi zavěšeným tělesem a odměrným válcem s vodou tak, aby těleso neleželo na dně ani nebylo vynořeno z vody.

Těleso je potřeba ponořovat opatrně tak, aby nedošlo k převržení a rozbití skleněného válce.

Když těleso vynoříme z vody (jako příprava na další verzi pokusu), je potřeba nakloněním tělesa z něho slít vodu, které zůstala na jeho horním povrchu.

Fyzikální interpretace

Verze 1 – Stojánek s visícím tělesem je uložen na misce vah, odměrný válec s vodou mimo váhy. Visící těleso je při ponoření nadlehčováno vztlakovou silou kapaliny, která je dána tíhou kapaliny o objemu rovném objemu ponořeného tělesa – miska vah, na které stojí stojánek, se nadzvedne. Aby se obnovila rovnováha na vahách, musíme na misku se stojánkem přidat závaží výše uvedené tíhy.

Verze 2 – Odměrný válec s vodou je uložen na misce vah, stojánek s visícím tělesem mimo váhy. Na kapalinu v nádobě (a tím i na nádobu) působí ponořené těleso silou reakce vzhledem ke vztlakové síle, která je stejně velká a opačně orientovaná – tato miska vah tedy poklesne. Aby se obnovila rovnováha na vahách, musíme na straně vah bez odměrného válce přidat závaží o tíze kapaliny stejného objemu, jaký má ponořené těleso.

Modifikace. Pokud do odměrného válce ponoříme prst, na prst působí vztlaková síla (která je tak malá, že ji subjektivně nepocítíme), na odměrný válec pak reakce k této síle, rovnováha je tedy narušena a miska vah s odměrným válcem poklesne.

Verze 3 – Stojánek s visícím tělesem je uložen na misce vah, odměrný válec s vodou na druhé misce vah. Tato verze v sobě kombinuje silové působení verze 1 a verze 2. Visící těleso je při ponoření nadlehčováno vztlakovou silou kapaliny, která je dána tíhou kapaliny o objemu rovném objemu ponořeného tělesa. Na kapalinu v nádobě (a tím i na nádobu) ponořené těleso působí silou reakce – silou stejně velkou a opačně orientovanou. Vzhledem k tomu, že uvedená vztlaková síla a opačně orientavaná síla reakce působí na různých miskách vah, aby se obnovila rovnováha na vahách, musíme na straně vah se stojánkem přidat závaží o dvojnásobné tíze než v předchozích případech.

E 11 – Vztlak nafukovaného balónku

Podobně jako v kapalinách hydrostatická působí v plynech vztlaková síla aerostatická. Její existence může výrazně ovlivnit přesnost vážení.

Potřeby

- Rovnoramenné váhy a sada závaží, 4.6 nebo digitální váhy
- Erlenmayerova baňka, 4.3
- soda bicarbona, kyselina citrónová,
- lžička, list papíru a násypná trubička,
- nafukovací balónek,
- voda.

Příprava

Na list papíru nasypeme lžičku sody bicarbony a lžičku kyseliny citrónové. Do hrdla balónku vsuneme násypnou trubičku a do nafukovacího balónku přesypeme z papíru sodu bicarbonu a kyselinu citrónovou. Vyjmeme násypnou trubičku z balónku. Do skleněné baňky nalijeme vodu tak, aby byla zaplněna asi z poloviny. Hrdlo balónku opatrně přetáhneme před hrdlo

baňky tak, aby se obsah balónku nevysypal do vody. Baňku uložíme na jednu misku vah. Pomocí závaží kladených na druhou misku vah vyladíme rovnováhu na vahách.

Provedení

Pozvedneme balónek tak, že prášek z balónku spadne do vody v nádobě. Chemickou reakcí vzniká oxid uhličitý, který nafoukne balónek. Rovnováha na vahách se naruší.

Technické problémy

Jedná se o subtilní jev, poloha jazýčku vah se změní jen o několik milimetrů. Počáteční vyvážení je proto potřeba provést přesně, aby změna pak byla patrná.

Pokud by mezi hrdlem balónku a baňkou byla netěsnost, experiment by tím byl znehodnocen; je potřeba volit balónek, který se těsně přimkne k baňce.

Fyzikální interpretace

Pokud je balónek těsně přimknut k baňce, je hmotnost soustavy před a po chemické reakci konstantní, tedy tíhová síla je konstantní. Naopak objem balónku před reakcí je výrazně menší než po reakci. S rostoucím objemem vzrůstá vztlaková síla působící na balónek ve vzduchovém prostředí, dojde k porušení rovnováhy na vahách.

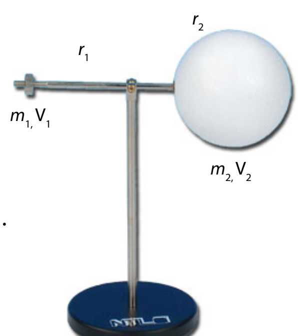
Kdyby se experiment prováděl ve vakuu, vztlaková síla by nebyla a nadlehčení by nenastalo.

E 12 – Vztlaková váha (dasymetr)

Rovnováha na dvojramenných vahách může být snadno porušena změnou okolního tlaku vzduchu.

Potřeby

- Dasymetr (dvojramenná vážka, na jedné straně koule o průměru 70 mm z extrudovaného polystyrenu, na druhé straně vyvažující matička posunovatelná otáčením),4.1
- recipient vývěvy, 4.1
- vývěva, 4.1
- měrka absolutního tlaku 4.1 **(Pozor, nepoužívat diferenční čidlo, mohlo by se poškodit!)**.



Provedení

Vývěvu připojíme k základně recipientu a připojíme čidlo absolutního tlaku. Na základnu recipientu umístíme dasymetr a vyvážíme ho. Přiložíme recipient a spustíme čerpání. Na měrce tlaku registrujeme pokles tlaku. Současně pozorujeme, že rameno s polystyrenovou koulí klesá dolů.

Fyzikální interpretace

Experiment je považován za důkaz existence aerostatické vztlakové síly. Pokud má jedno těleso výrazně jinou hustotu než druhé, rovnováha za atmosférického tlaku není rovnováhou mezi momenty tíhových sil, ale mezi výslednými momenty tíhových a vztlakových sil:

$$(m_1 g - \rho g V_1) r_1 = (m_2 g - \rho g V_2) r_2$$

Rovností momentů tíhových sil lze rovnováhy dosáhnout jen ve vakuu:

$$m_1 g r_1 = m_2 g r_2.$$

Čerpáním je proto rovnováha nastavená za atmosférického tlaku porušena, neboť snižováním hustoty plynu se snižuje i aerostatická vztlaková síla.

Dasymetr lze využít i k odhadu tlaku plynu pod recipientem. Vyjádříme-li z rovnice rovnováhy hustotu plynu

$$\rho = \frac{m_1 r_1 - m_2 r_2}{m_1 r_1/\rho_1 - m_2 r_2/\rho_2},$$

pak pro určité rameno r_1 je rovnováhy dosaženo při hustotě plynu ρ. Tlak plynu p určíme z rovnice ideálního plynu

$$p = \frac{\rho}{M} RT.$$

Technické problémy

I na digitálních vahách při měření hmotnosti m_1 a m_2 musíme započítat vztlakovou sílu (zejména u polystyrenové koule). Digitální váhy jsou kalibrovány kalibračními závažími, většinou nerezovými, a poskytující správnou hodnotu neovlivněnou vztlakovou silou pouze při vážení objektů ze stejného materiálu. Korekce na vztlak ζ

$$M = Z + \zeta,$$

přičítaná k ukazované hodnotě Z, je rovna

$$\zeta = \left(\frac{M}{\rho_M} - \frac{Z}{\rho_Z}\right)\rho,$$

nebo přibližně

$$\zeta = Z\left(\frac{1}{\rho_M} - \frac{1}{\rho_Z}\right)\rho.$$

Poznámky. 1) Experiment samozřejmě předpokládá, že se změnou okolního tlaku nezmění objem zavěšených objektů. Co když místo polystyrenu použijeme vzduchem plněný balónek? 2)Rovnováha se samozřejmě poruší i při zvýšení tlaku. Viz video s dasymetrem 19 m pod hladinou, `http://www.youtube.com/watch?v=vi7IDZARVA8`.

1.4 Plování těles

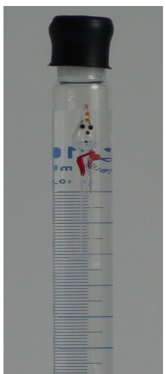
E 13 – Karteziánek

Průměrnou hustotu tělesa a jeho schopnost plovat lze regulovat vnějším tlakem na kapalinu.

Potřeby

- Karteziánek, 5.4

Příprava



Popis karteziánku. Skleněný válec je zaplněn z větší části vodou a shora uzavřen membránou. Ve vodě plove duté skleněné těleso (plovák) zaplněné zčásti vodou, zčásti vzduchem. Malý otvor v dolní části tělesa spojuje vnitřní prostor plováku s vodou v nádobě.

Nastavení hustoty plováku karteziánku. Je potřeba zajistit, aby hustota plováku byla přibližně rovna hustotě okolní vody. To se projeví třeba tak, že plovák sice plove na hladině, ale nad hladinu vyčnívá jen malý kousek plováku. *Nastavení hustoty plováku studenti obvykle neprovádějí.*

Do příliš lehkého plováku je potřeba přidat vodu, ale protože do malého otvoru nelze vodu nakapat ani nastříknout běžnou injekční stříkačkou, postupujme takto: Plovák ponoříme do vody, v prostoru nad hladinou vytvoříme tím, že táhneme membránu směrem nahoru, podtlak. Z plováku přitom unikají vzduchové bublinky a až nad hladinou obnovíme normální tlak, plovák nasaje vodu.

Pokud je plovák příliš těžký, je potřeba do plováku přidat vzduch (ubrat vodu).

Provedení

V klidovém stavu plovák plove na hladině v horní části válce. Stlačíme-li blánu, plovák klesá. Uvolníme-li blánu, plovák stoupá k hladině.

Technické problémy

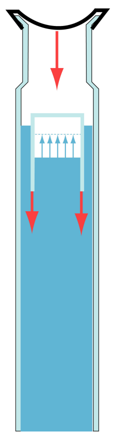
Hustota karteziánku vzhledem k okolní kapalině kolísá nahodile – podle tlaku okolního vzduchu, tedy podle počasí. Chystáme-li experiment na další den, nikdy nemůžeme přesně vědět, jak se bude karteziánek další den chovat. Hustota plováku se může snížit také nalepením drobných bublinek vzduchu na plovák.

Modifikace pokusu

Ideální stav. Plovák v základním stavu plove na hladině, ale vyčnívá z vody jen velmi málo a stačí malé stlačení blány, aby klesal. Existuje určitá kritická hloubka, v níž plovák setrvává v klidu při uvolněné membráně; pod touto hloubkou plovák klesá ke dnu a setrvává u dna neomezeně dlouho, nad touto hloubkou stoupá k hladině.

Tento ideální stav je značně nestabilní, stačí drobná změna hustoty plováku k jeho narušení.

Fyzikální interpretace



Fyzikální interpretace kvalitativní. Experiment využívá toho, že voda je téměř nestlačitelná, zatímco vzduch je snadno stlačitelný. Tlak vzduchu nad kapalinou v horní části válce ovlivňujeme stlačováním membrány. Takto vytvořený tlak se přenáší vodou přes otevřený spodek plováku až do horní zavzdušněné části plováku. Vyšší tlak vzduchu vede ke zmenšení objemu zavzdušněné části plováku, a tím ke zvětšení části zavodněné. Střední hustota plováku se zvýší a jakmile překročí hustotu okolní vody, plovák klesá ke dnu.

Kritická hloubka. Vhodně nastavený plovák v určité (kritické) hloubce se volně vznáší, neklesá ani nestoupá, střední hustota plováku je rovna hustotě okolní vody. Posune-li se plovák nad kritickou hloubku, sníží se hydrostatický tlak v okolí plováku, tím i tlak v zavzdušněné části plováku a jeho hustota klesne. Plovák má tendenci dál stoupat, až dosáhne hladiny. Posune-li se plovák pod kritickou hloubku, zvýší se hydrostatický tlak v okolí plováku, a tím i tlak v zavzdušněné části plováku, a jeho hustota vzroste. Plovák má tendenci dál klesat, až klesne na dno nádoby.

E 14 – Model ponorky

Ponorka si na rozdíl od karteziánku sama může regulovat svou průměrnou hustotu pomocí balastních nádrží. Jejich objem se plní vodou anebo profukuje stlačeným vzduchem.

Potřeby

- Model ponorky, 4.4
- injekční stříkačka s tenkou silikonovou hadičkou,
- akvárium, 4.3
- voda.

Provedení

Do akvária naplněného vodou ponoříme ponorku připojenou tenkou hadičkou k injekční stříkačce. Do transparentního vnitřního prostoru vedou dva otvory: v horní části, na který je připevněna hadička, a v dolní části, který je volně otevřen do vody. Okolní voda tak může pronikat do vnitřního prostoru, a naopak voda může být otvorem z prostoru vytlačena stlačeným vzduchem. Při stlačení stříkačky pozorujeme, že se prostor vyprazdňuje (a plní vzduchem) a ponorka stoupá k hladině. Po natažení vody pomocí stříkačky do vnitřního prostoru ponorka klesá ke dnu.

Fyzikální interpretace

Fyzikální vysvětlení je obdobné jako u karteziánku. Napuštěním vody do balastních nádrží se zvyšuje tíha celého objektu, zatímco vztlaková síla, daná celkovým objemem, zůstává stejná. Rovnováha je porušena, ponorka klesá ke dnu. K vynoření musí být naopak vztlaková síla větší než síla tíhová, je tedy zapotřebí nádrže naplnit vzduchem.

E 15 – Galileiho teploměr

Teploměr využívá změny hustoty kapaliny s teplotou; tělíska uložená v kapalině pak podle teploty plovou, vznášejí se nebo leží na dně.

Potřeby

- Galileiho teploměr, 5.4
- velký skleněný válec, 5.4
- voda.

Provedení

Teplotu určíme pohledem na teploměr podle následujícího pravidla: pokud se nějaký plováček vznáší v kapalině, je teplota rovna údaji tohoto plováčku; jinak teplota leží mezi údajem nejvýše umístěného plováčku, který se nachází v dolní části (u dna), a údajem nejníže se nacházejícího plovoucího plováčku.

Technické problémy

Vzhledem k tomu, že teploměr má velkou tepelnou kapacitu, při změnách teplot může trvat velmi dlouho, než teploměr začne ukazovat správnou teplotu.

Modifikace pokusu

Úmyslné ochlazování teploměru. Do velkého skleněného válce nalijeme z vodovodu studenou vodu. Teploměr ponoříme do velkého skleněného válce tak, aby byl obklopen vodou ze všech stran. Vyčkáme a pozorujeme, jak se teploměr ochlazuje – plováčky ležící v dolní části postupně vyplouvají nahoru.

Úmyslný ohřev teploměru. Pokud nejníže položený plovoucí plováček se už „téměř chystá“ klesnout dolů, lokální osvit teploměru žárovkou v jeho blízkosti způsobí zahájení tohoto sestupu.

Fyzikální interpretace

Galileiho teploměr je skleněný válec naplněný čirou kapalinou; hustota této kapaliny klesá s rostoucí teplotou. V kapalině jsou uloženy plováčky; každý z plováčků je tvořen skleněnou kuličkou asi z půli zaplněnou kapalinou a opatřen visící destičkou s teplotním údajem. V našem teploměru je sedm plováčků s teplotními údaji od 18°C do 26°C s krokem 2°C. Každý plováček je navržen tak, že jeho hustota je rovna hustotě okolní kapaliny při teplotě odpovídající údaji na destičce plováčku.

E 16 – Paradox hustoty

„Studená“ může nadnášet míň než teplá.

Potřeby

- Dvě tělesa s hustotou blízkou hustotě vody, 4.4
- dvě kádinky,
- dva teploměry,
- teplá a studená voda s kapkou jaru.

Provedení

Hodíme-li závaží do kádinky s vodou, klesne ke dnu. Počkáme-li asi minutu, vyplave samo na hladinu. Pokud ho vytáhneme a hodíme do jiné kádinky s vodou, bude nejprve plavat. Asi po minutě opět klesne ke dnu.

Technické problémy

Silová nerovnováha je malá a popisovanému provedení experimentu může zabránit síla povrchového napětí. Proto do vody přikápneme kapku jaru, který povrchové napětí sníží.

Fyzikální interpretace

Předpokládejme, že ve vodě (index k) při pokojové teplotě plove plně ponořené těleso (index t) o stejné hustotě, jako má voda. Má ale jinou objemovou teplotní roztažnost

$$\rho_{\rm t}(t) = \rho_0\left[1-\beta_{\rm t}(t-t_0)\right], \tag{3}$$
$$\rho_{\rm k}(t) = \rho_0\left[1-\beta_{\rm k}(t-t_0)\right]. \tag{4}$$

Výsledná síla působící na volně se vznášející těleso ve vodě je rovna (kladná hodnota ve směru tíhové síly)

$$F_{\rm vysl} = F_{\rm G} - F_{\rm vz} = mg - \rho_{\rm k}gV = mg - \rho_{\rm k}g\frac{m}{\rho_{\rm t}}, \tag{5}$$

a tedy

$$F_{\rm vysl}(t) = mg\left[1-\frac{\rho_{\rm k}(t)}{\rho_{\rm t}(t)}\right]. \tag{6}$$

Po dosazení (3), (4) a s použitím $1/\left[1-\beta_{\rm t}(t-t_0)\right] \approx 1+\beta_{\rm t}(t-t_0)$ a zanedbáním vyšších členů obdržíme pro výslednici sil

$$F_{\rm vysl}(t) = mg(\beta_{\rm k}-\beta_{\rm t})(t-t_0). \tag{7}$$

Očividně tedy platí, že při stejném koeficientu roztažnosti nebo při teplotě t_0 je výslednice nulová a těleso se vznáší. Stejný výsledek dostaneme i z prvního členu Taylorova rozvoje výsledné síly $F_{\rm vysl}$ (6).

Většinou platí $\beta_{\rm k} > \beta_{\rm t}$. Potom ohřátím kádinky i vznášejícího se tělesa je výsledná síla kladná (směr dolů) a těleso padá ke dnu. Naopak ochlazením směsi těleso stoupá k hladině.

V našem případě máme závaží z plastu, pro který platí $\beta_{\rm t} > \beta_{\rm k}$. Situace se tedy obrací: ohřátím směsi se především snižuje hustota tělesa a těleso plove. Ochlazením se těleso smršťuje a padá ke dnu. Roztažnost vody sice působí proti tomuto jevu, má ale minoritní roli.

Pokud tedy do kádinky s horkou vodou hodíme těleso o pokojové teplotě, je příliš husté a klesá na dno. Až se ohřeje, vystoupá vzhůru. Vylovíme-li ohřáté těleso a hodíme-li ho do kádinky se studenou vodou, těleso zpočátku plove. Pak ztratí na objemu a klesne ke dnu.

E 17 – Vyhození zátěže z lodi

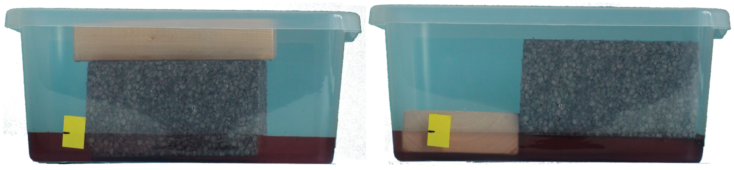
Potřeby

- Malé akvárium, 4.3
- polystyrenová loď, která zabírá na délku asi 2/3 akvária, 4.3
- náklad - velká dřevěná kostka, kámen, 4.3
- nálepka, tužka,
- voda.

Příprava

Do akvária nalijeme vodu tak, aby bylo zčásti zaplněné. Na vnější stěnu akvária umístíme nálepku tak, aby část nálepky byla v úrovni nad a část pod hladinou vody; na nálepku budeme vyznačovat polohu hladiny kapaliny v různých situacích. Na vodu položíme loď. Na nálepku tužkou vyznačíme polohu hladiny.

Provedení



Na plovoucí loď přidáme náklad. Hladina vody se zvedne; vyznačíme novou polohu hladiny na nálepku na stěně nádoby.

Náklad vyhodíme z lodi do akvária. Sledujeme, zda a jak se tím změnila poloha hladiny vody.

Verze 1. Pokud je nákladem dřevěná kostka, pak tato dřevěná kostka po vyhození z lodi plave samostatně. Poloha hladiny se nezmění.

Verze 2. Pokud je nákladem kámen, pak toto závaží po vyhození z lodi klesne ke dnu (přesněji, opatrně ho uložíme na dno). Poloha hladiny se změní – klesne.

Technické problémy

Ve skleněném akváriu musíme s kamenem manipulovat opatrně, je vhodnější použít akvárium plastové.

Fyzikální interpretace

Silová rovnováha pro plovoucí loď s nákladem: celková tíhová síla lodi s nákladem = vztlaková síla = tíha vody lodí vytlačené.

Naložení nákladu do lodi. Každý náklad způsobí zvýšení objemu vytlačené kapaliny úměrně hmotnosti tohoto nákladu, a tím způsobí i zvednutí hladiny. Čím hmotnější náklad, tím výše je hladina – záleží jen na hmotnosti nákladu (ne objemu).

Verze 1. Ať dřevěná kostka leží na lodi nebo plove samostatně, v obou případech je celková tíha plovoucích těles stejná, taktéž i celková vztlaková síla a objem vytlačené kapaliny, proto se poloha hladiny nezmění.

Verze 2. Je-li kámen vyhozen z lodi, sníží se hmotnost lodi s nákladem, a tím i objem vytlačené kapaliny úměrně hmotnosti tohoto kamene; ponořený kámen sám vytlačí pouze svůj vlastní objem (mnohem menší). Výsledný objem vytlačené kapaliny (výrazně) klesne a hladina se sníží.

Zobecnění:

Těleso hustoty ρ je uloženo na lodi plovoucí na kapalině o hustotě ρ_{kap}. Jak se změní hladina kapaliny, když těleso vyhodíme z lodi do kapaliny?

Pokud $\rho < \rho_{kap}$, vyhozené těleso plove a hladina se nezmění.

Pokud $\rho > \rho_{kap}$, těleso vyhozené z lodi se ponoří na dno, hladina poklesne.

E 18 – Plovoucí led

Potřeby

- Odměrný válec, 4.4
- led,
- nůž,
- voda.

Příprava

Nožem upravíme tvar ledu tak, aby se dal vložit do odměrného válce, do kterého přilejeme i vodu.

Provedení

Určíme polohu hladiny vody pomocí stupnice odměrného válce. Sledujeme, jak se poloha hladiny vody mění či nemění, když led taje. Stanovíme konečnou polohu hladiny po úplném roztátí ledu.

Technické problémy

Led taje pomalu. Proto v době mezi vložením ledu do nádoby a roztátím ledu můžeme vykonat řadu jiných experimentů.

Fyzikální interpretace

Po vložení ledu do kapaliny se hladina zvedne úměrně objemu ponořené části ledu. Platí rovnováha sil pro plovoucí těleso

$$V_{ledu}\rho_{ledu}g = V_{ledPonor}\rho_{vody}g.$$

Zachování hmotnosti při roztátí ledu

$$V_{ledu}\rho_{ledu} = V_{vody}\rho_{vody}.$$

Porovnáním rovnic (1) a (2) dostaneme

$$V_{ledPonor} = V_{vody}.$$

Objem ponořené části ledu je právě roven objemu vody, která vznikne jeho roztátím. Při roztátí plovoucího ledu se hladina nezmění.

Modifikace. Led leží na pobřeží a roztaje. V tomto případě se hladina vody zvedne úměrně objemu roztáté vody.

Závěr. To, jak roztátí ledu ovlivní hladinu vody, závisí na tom, zda se jednalo o led plovoucí anebo o led uložený na pevnině. V případě plovoucího ledu se hladina vody nezmění, v případě ledu uloženého na pevnině se hladina vody zvýší.

Poznámka. Hladina vody se může změnit také vlivem objemové roztažnosti vody. Ohřátí vody (v oblasti nad 4°C) způsobí zvětšení objemu, a tím se zvedne i hladina.

2 Dynamika kapalin

2.1 Bernoulliho rovnice

Při vysvětlení následujících experimentů budeme používat jak Bernoulliho rovnici, tak i rovnici kontinuity. Uveďme proto jejich znění.

Rovnice kontinuity je vlastně zákonem zachování hmotnosti proudící tekutiny, říká, že hmotnost tekutiny se během proudění nemění. Hmotnostní tok zůstává v čase konstantní:

$$Sv\rho = konst,$$

přičemž symboly S, v, ρ značí pořadě průřez proudové trubice, rychlost proudění v daném místě a hustotu tekutiny tamtéž. Pokud je tekutina nestlačitelná, lze z předchozího vztahu vynechat hustotu.

Rovnici kontinuity nejčastěji interpretujeme tak, že porovnáme objemové toky ve dvou místech proudové trubice

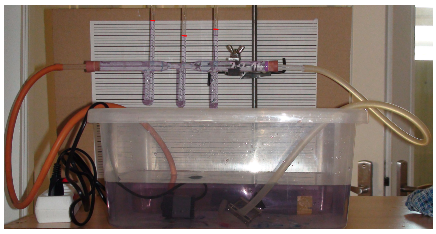
$$S_1v_1 = S_2v_2,$$

připomeňme proto, že ji nesmíme použít v případě, kdy mezi těmito místy je umístěn zdroj proudící tekutiny.

Bernoulliho rovnice je zákonem zachování energie pro objemovou jednotku proudící tekutiny. Sčítáme potenciální energii tlakovou $E_p = pV$, potenciální energii gravitační $E_{pot} = mgh$ a kinetickou energii proudící tekutiny $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Po vztažení na objemovou jednotku obdržíme tento tvar:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + h\rho g = konst.$$

Nedochází-li při proudění k výškovému spádu, vynecháváme poslední člen. Opět připomeňme, že Bernoulliho rovnice je odvozena za předpokladu, že proudící tekutina je ideální, a tedy nedochází k vnitřnímu tření, a navíc ještě, porovnáváme-li dvě místa v proudové trubici, musíme dodržet podmínku, že mezi nimi není umístěn zdroj některého z uvedených typů energií (pumpa, ventilátor, zásobní láhev,...).



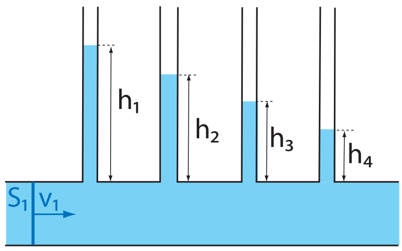
V následujících experimentech bude jako zdroj kapaliny pro proudění použita soustava sestavená z ponorného čerpadla, velké plastové nádoby a hadiček. Ponorné čerpadlo je napájeno střídavým napětím ze zásuvky a ponořeno v nádobě, která slouží jako vodní rezervoár, první hadičkou je přivedena voda z výstupu čerpadla do trubice, která má být protékána, druhá hadička vede z konce protékané trubice zpět do zásobní nádoby, odkud si čerpadlo nasává tekutinu. Výšku hladiny v připojených trubicích můžeme regulovat buď pomocí rychlosti proudění (tato lze měnit regulací zabudovanou na těle čerpadla či zapojením čerpadla do regulační zásuvky) anebo změnou výšky, ve které je (vůči čerpadlu) umístěna protékaná trubice.

E 19 – Průtok vody trubicí konstantního průřezu

Ukázka existence viskozity kapaliny.

Potřeby

- Zdroj kapaliny pro proudění, obvykle elektrické čerpadlo, 4.6
- trubice konstantního průřezu se čtyřmi vyvedenými svislými trubičkami, zásuvka pod 4.6
- nádoba na vodu, 4.3
- voda.



Příprava

Trubici připojíme ke zdroji kapaliny pro proudění, zajistíme konstantní tlak na vstupu (anebo konstantní vtokovou rychlost), uzavřeme okruh pro proudění tak, aby kapalina vytékala zpět do zdroje proudící kapaliny. Do vody dáme trochu saponátu, tím snížíme povrchové napětí.

Provedení

Dosáhneme ustáleného proudění a sledujeme výšku hladiny v jednotlivých trubicích.

Technické problémy

Pro případ, že by kapalina při spuštění čerpadla vystříkla ze svislých trubic, je lepší umístit trubice nad zásobní nádobu, aby kapalina stékala do ní.

Při spuštění čerpadla se obvykle naplní trubice kapalinou jen do určité výšky, může jí proudit i vzduch. Pokud se tak děje, buď snížíme výšku trubice nad čerpadlem, anebo stiskneme hadici za trubicí, počkáme, až se trubice naplní do rozumné výšky, a pak stisk povolíme. Pokud se do trubice nadále dostávají bubliny, můžeme zdvihnout výkon čerpadla, snížit výšku trubice nad čerpadlem, anebo nechat odtokovou hadici mírně staženou.

Fyzikální interpretace

Kapalinu považujeme za nestlačitelnou. Protože má trubice ve všech místech stejný průřez, je ve všech místech i stejná rychlost proudění (viz rovnice kontinuity), a tedy by voda v trubičkách stejného průřezu měla vystoupit do stejné výšky h, která je dána tlakem na vstupu do trubice

$$p_{vstup} + 0.5\rho v_{vstup}^2 = h\rho g + 0.5\rho v_{trubice}^2.$$

Ve skutečnosti však výška hladiny v trubičkách směrem od zdroje proudící kapaliny klesá, protože v kapalině dochází k vnitřnímu tření, tedy i ke ztrátě energie, což se projevuje i ztrátou tlakové energie.

E 20 – Průtok vody trubicí se zúžením

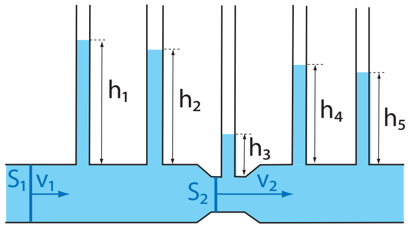
Ukázka změny tlaku při změně průřezu trubice, kterou proudí kapalina.

Potřeby

- Zdroj kapaliny pro proudění, obvykle elektrické čerpadlo, 4.6
- trubice s uprostřed zúženým průřezem s pěti vyvedenými svislými trubičkami, zásuvka pod 4.5
- nádoba na vodu, 4.3
- voda.

Příprava

Trubici připojíme ke zdroji kapaliny pro proudění, zajistíme konstantní tlak na vstupu (anebo konstantní vtokovou rychlost), uzavřeme okruh pro proudění tak, aby kapalina vytékala zpět do zdroje proudící kapaliny. Do vody dáme trochu saponátu, tím snížíme povrchové napětí.



Provedení

Dosáhneme ustáleného proudění a sledujeme výšku hladiny v jednotlivých trubicích.

Technické problémy

Stejné jako v pokusu E 19.

Fyzikální interpretace

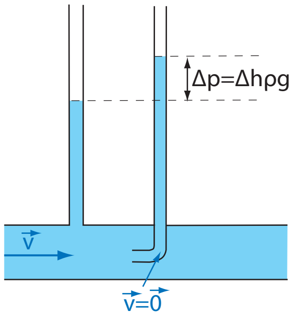
Kapalinu považujeme za nestlačitelnou. V zúženém místě je podle rovnice kontinuity větší rychlost proudění, a tedy připadá větší část celkové energie na energii kinetickou a menší část celkové energie na potenciální energii tlakovou. Proto vystoupí voda v trubičce v zúžené části do menší výšky než v okolních trubičkách. Pokud vstupní tlak není o mnoho větší než tlak atmosférický a zúžení je dostatečné, může v místě zúžení být tlak nižší než tlak atmosférický. Vznik podtlaku poznáme podle toho, že v daném místě nevystoupí kapalina do trubičky, ale naopak začne touto trubičkou proudit do trubice vzduch. Toto je princip vodní vývěvy, o které budeme psát v pokusu E 22.

E 21 – Měření rychlosti průtoku Pitotovou trubicí

Měření rychlosti proudící tekutiny na základě platnosti Bernoulliho rovnice

Potřeby

- Zdroj kapaliny pro proudění, obvykle elektrické čerpadlo, 4.6
- Pitotova trubice (viz obrázek), 4.5
- nádoba na vodu, 4.3
- voda.



Příprava

Trubici připojíme ke zdroji kapaliny pro proudění, zajistíme konstantní tlak na vstupu (anebo konstantní vtokovou rychlost), uzavřeme okruh pro proudění tak, aby kapalina vytékala zpět do zdroje proudící kapaliny.

Provedení

Dosáhneme ustáleného proudění a sledujeme výšku hladiny v obou trubičkách.

Technické problémy

Stejné jako v pokusu E 19.

Fyzikální interpretace

V trubičce, která ústí kolmo k trubici, vystoupí hladina do výšky, která odpovídá tlaku v tomto místě. V zahnuté trubičce se kapalina o zadní stěnu trubičky zastaví, a proto je tlak v tomto místě větší o hodnotu kinetické energie objemové jednotky proudící kapaliny. Z těchto údajů dokážeme z Bernoulliho rovnice spočítat rychlost proudící kapaliny:

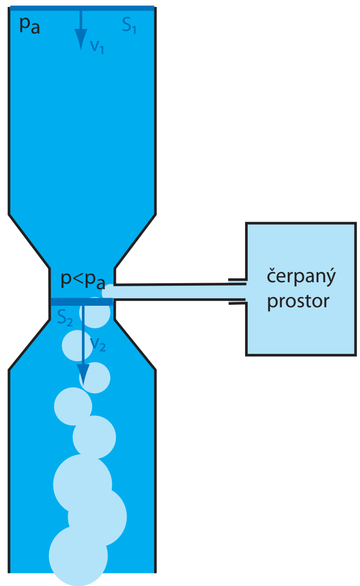
$$h_1 \rho g + \frac{1}{2}\rho v^2 = h_2 \rho g \qquad \Rightarrow \qquad v = \sqrt{2g\Delta h}.$$

E 22 – Vodní vývěva

Získání podtlaku v důsledku zúžení proudové trubice. Praktická ukázka čerpání vzduchu z daného prostoru.

Potřeby

- Zdroj proudící kapaliny – optimálně vodovodní kohoutek, je potřeba mít velký průtok,
- vodní vývěva, hadice a spojky, 5.3
- čerpaný prostor - Magdeburské polokoule. 5.3



Příprava

Vývěvu připojíme ke zdroji proudící kapaliny, pomocí hadice připojené k druhému konci zajístíme, aby voda bezpečně odtékala. K vzduchovému vstupu připojíme hadicí čerpaný prostor.

Provedení

Zapneme zdroj proudění, sledujeme změny tlaku v čerpaném prostoru (změna údaje manometru, nafouknutí balónku, odplyňování, případně až var vody,...).

Technické problémy

Teprve se ukáží

Fyzikální interpretace

Tento experiment demonstruje jednak princip vodní vývěvy, jednak její praktické užití k čerpání malých prostorů. Optimální je její užití k předvedení odplyňování kapalin, pro které je nevhodné užívat vývěvy poškoditelné vodní parou, která se při experimentech uvolňuje.

Princip vývěvy vychází z faktu, že v zúženém průřezu proudové trubice dochází k poklesu tlaku. Pokles tlaku závisí na rychlosti proudění kapaliny vývěvou a na její geometrii, tj. na poměru velikosti ploch široké proudové trubice a zúženého místa. Podle rovnice kontinuity platí $S_1v_1 = S_2v_2$. Z Bernoulliho rovnice pak můžeme určit, o kolik je tlak v místě zúžení menší než tlak atmosférický:

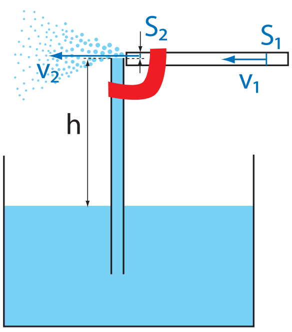
$$p_a + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad \Rightarrow \qquad p = p_a - \frac{1}{2}\rho v_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1\right)$$

E 23 – Fixírka

Získání podtlaku v důsledku zúžení proudové trubice. Praktická ukázka čerpání a rozprašování vody z nádoby pomocí proudícího vzduchu.

Potřeby

- Kádinka s vodou, 5.3
- fixírka, 5.3
- hadr na utírání vody.



Provedení

Jednu z trubiček fixírky ponoříme do vody v kádince, druhou vložíme do úst a foukneme. Pečlivě utřeme předměty, na které dopadá rozprášená voda z kádinky.

Fyzikální interpretace

Zúžením trubičky, kudy proudí vzduch, vzniká podtlak. Tento podtlak je dostatečný na vytažení vody do svislé trubičky a odtržení jednotlivých kapek z hladiny vody v trubičce.

E 24 – Válec s výtokovými otvory v různých výškách

Závislost hydrostatického tlaku na hloubce. Zákon zachování mechanické energie pro proudíci kapalinu.

Potřeby

- Válec s výtokovými otvory v různých výškách, 5.4
- plato na zachytávání vytékající vody, 4.2
- nádoba na dolévání vody do válce,
- hadr na utírání vody,
- voda.

Provedení

Válec naplníme po okraj. Pozorujeme, do jaké vzdálenosti stříká voda z jednotlivých otvorů. Je vhodné udržovat neustálým doléváním hladinu na konstantní úrovni.

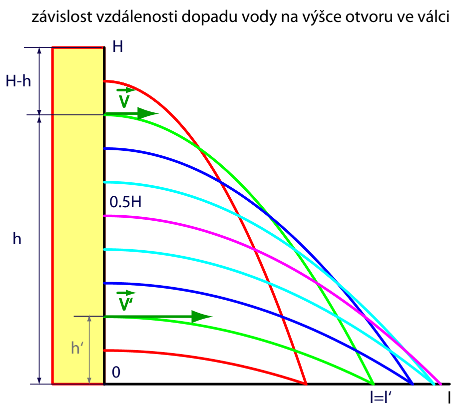
Fyzikální interpretace

Plochy otvorů považujme za zanedbatelně malé ve srovnání s plochou volné hladiny, hladinu udržujme v konstantní výšce H. Hydrostatický tlak je přímo úměrný vzdálenosti otvoru od hladiny: u hladiny je nulový, u dna maximální, zdálo by se tedy, že čím bude otvor blíže u dna, tím do větší vzdálenosti kapalina dostříkne. Tento výsledek však není v souladu s pozorováním – rychlost kapaliny při opouštění nádoby sice roste s tlakem, ale doba, po kterou kapalina dopadá, naopak s výškou klesá. Proveďme tedy výpočet.

Hladinu nulové potenciální energie umístěme na dno nádoby na zachytávání vystřikující vody. Ve výšce h ode dna má tedy myšlený objem kapaliny o hmotnosti m potenciální energii $mg(H-h)$, která se ve výtokovém otvoru přemění na kinetickou $\frac{1}{2}mv^2$. Pro rychlost vytékající kapaliny tedy platí:

$$v^2 = 2g(H-h).$$

Vzdálenost l, do které dostříkne kapalina, je určena součinem rychlosti v a doby t, za kterou kapalina dopadne z výšky h na dno nádoby: $h = \frac{1}{2}gt^2$. Platí tedy:



$$l^2 = v^2t^2 = 2g(H-h)\frac{2h}{g} \qquad \Rightarrow \qquad l^2 = 4h(H-h).$$

Chceme-li zjistit, z které výšky h bude kapalina stříkat do největší vzdálenosti, můžeme buď najít extrém této funkce, anebo si uvědomit, že jde o parabolu s vrcholem v $0.5H$: $l^2 = H^2 - 4(h - 0.5H)^2$. Kapalina tedy stříká do největší vzdálenosti ze středu válce, do nejmenší ode dna a od hladiny a otvory, ze kterých dopadá kapalina do stejné vzdálenosti, jsou stejně vzdáleny od středu válce.

Zákon zachování energie lze přepsat i do tvaru, který po vztažení na objemovou jednotku kapaliny dává znění Bernoulliho rovnice:

$$mgH = mgh + \frac{1}{2}mv^2 \qquad \Rightarrow \qquad H\rho g = h\rho g + \frac{1}{2}\rho v^2.$$

Dodejme, že do Bernoulliho rovnice je potřeba zahrnout i potenciální energii, spojenou s tlakem způsobeným vnější silou, což je v tomto případě tlak atmosférický. Celou úvahu o vzdálenosti dopadu kapaliny z otvoru ve výšce h jsme tedy mohli začít od znění Bernoulliho rovnice

$$p_a + H\rho g = p_a + h\rho g + \frac{1}{2}\rho v^2.$$

2.2 Obtékání těles

E 25 – Pohlův přístroj

Hele-Shawova cela a Pohlův přístroj zobrazují proudnice potenciálového proudění viskózní kapaliny.

Potřeby

- Pohlův přístroj (speciální Hele-Shaw cela), 5.3
- těžký stojan,
- 2D modely hydrodynamických objektů (kout, deska kolmo, deska šikmo, dutý a vypuklý válec, model profilu křídla),
- čirá a silně obarvená voda (nejlépe destilovaná),
- nádoba na vytékající vodu.

Pohlův přístroj je tvořen dvěma blízkými skleněnými deskami ve vzdálenosti cca 1 mm, které tvoří vertikální úzký kanál. V horní části přístroje jsou nádobky pro čirou a obarvenou vodu. Otvory u dna nádobek voda vytéká do prostoru mezi skleněné desky, kde se vytváří proudění střídavě obarvené a neobarvené vody. Mezi desky lze vkládat z plechu vyrobené 2D modely aerodynamických těles. Výtok kapaliny z prostoru mezi deskami je zajištěn otvorem s hadičkou. Průtok lze regulovat škrcením hadičky tlačkou.

Provedení

Pohlův přístroj upevníme svisle do stojanu. Do nádobek pokud možno současně nalijeme do stejné výše čirou a obarvenou vodu. Výtok přiškrtíme tlačkou tak, aby voda z přístroje vytékala, ale aby byl prostor mezi deskami zaplaven. Do prostoru vkládáme shora různé modely a pozorujeme proudnice kolem těles proudící kapaliny.

Fyzikální interpretace

Vyjdeme z Navierových-Stokesových pohybových rovnic pro nestlačitelnou kapalinu s vnitřním třením (popsanou hustotou ϱ a dynamickou viskozitou η)

$$\vec{a} = \vec{g} - \frac{1}{\varrho}\operatorname{grad} p + \frac{\eta}{\varrho}\Delta\vec{v} \tag{8}$$

kde p je tlak v kapalině a $\vec{g}$ tíhové zrychlení. Vyjádříme-li zrychlení $\vec{a}$

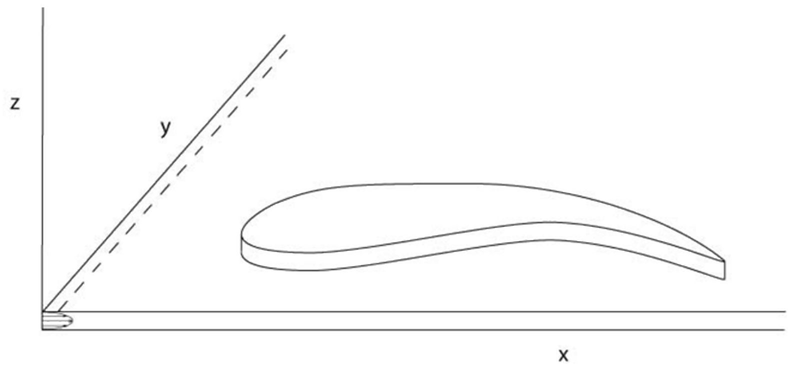
$$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2}\operatorname{grad} v^2 - \vec{v}\times\operatorname{rot}\vec{v}$$

pro případ bez tíhového pole (vodorovná Hele-Shaw cela), dostaneme

$$\vec{a} = \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2}\operatorname{grad} v^2 - \vec{v}\times\operatorname{rot}\vec{v} = -\frac{1}{\varrho}\operatorname{grad} p + \frac{\eta}{\varrho}\Delta\vec{v}. \tag{9}$$

V případě proudění při velmi malých Reynoldsových číslech, kdy viskózní síly dominují nad setrvačnými, lze v Navierových-Stokesových rovnicích setrvačné síly zanedbat (tzv. Stokesovo proudění). Zrychlení kapaliny (levá strana rovnice) je pak rovna nule. V této situaci lze současně proudění považovat za laminární a stacionární ($\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \approx 0$), položení $\mathrm{rot}\,\vec{v} \approx 0$ odpovídá zanedbání vírového charakteru proudění. Za těchto podmínek

$$\Delta \vec{v} = \frac{1}{\eta}\,\mathrm{grad}\,p. \tag{10}$$



U Hele-Shaw cely (viz obr.) kapalina protéká velmi úzkým prostorem (mezerou o tloušťce a) mezi dvěma skleněnými stěnami. Podstatné jsou tedy jen složky rychlosti podél stěn v_x a v_y ($v_z \approx 0$), a naopak dominantní jsou pouze druhé derivace těchto složek podél osy z. (Laplacián je určen kolmým profilem složek rychlosti.) Díky tomu

$$\cancel{\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x}, \tag{11}$$

$$\cancel{\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta}\frac{\partial p}{\partial y}. \tag{12}$$

Po integraci podél osy z s okrajovými podmínkami $v_x(x,y,-a/2) = v_y(x,y,-a/2) = v_x(x,y,a/2) = v_y(x,y,a/2) = 0$ dostaneme

$$v_x(x,y,z) = -\frac{a^2}{8\eta}\left[1 - \frac{4z^2}{a^2}\right]\frac{\partial p(x,y)}{\partial x},$$

$$v_y(x,y,z) = -\frac{a^2}{8\eta}\left[1 - \frac{4z^2}{a^2}\right]\frac{\partial p(x,y)}{\partial y},$$

což je ekvivalentní zápisu

$$\vec{v} = -\frac{a^2}{8\eta}\left[1 - \frac{4z^2}{a^2}\right]\mathrm{grad}\,p. \tag{13}$$

Ve všech vrstvách s různou hodnotou z jsou proudnice rozloženy stejným způsobem, jen se liší absolutní hodnotou rychlosti, která sleduje parabolický profil podél z s maximální hodnotou ve středu štěrbiny ($z = 0$) a nulou na kraji (viz hranatá závorka v rovnici (13)).[1] Konkrétně ve středu mezery ($z = 0$) je tedy

$$\vec{v}(x,y) = -\frac{a^2}{8\eta}\,\mathrm{grad}\,p(x,y).$$

Rychlost kapaliny je tedy v každém místě dána gradientem tlaku v tomto místě. Hele-Shaw cela či Pohlův přístroj nám tedy dovoluje zobrazit speciální případ tzv. potenciálového proudění, u kterého je obecně rychlost rovna gradientu nějaké funkce Φ:

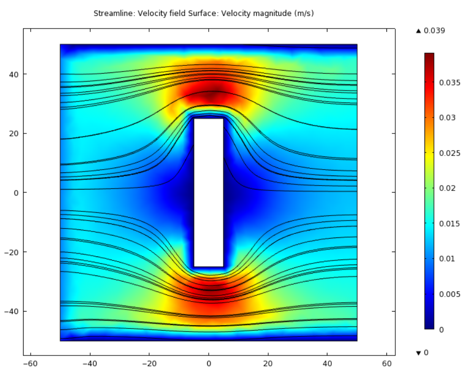
$$\vec{v} = \mathrm{grad}\,\Phi.$$

[1]Kdybychom hledali analogii s prouděním větru, který je také v přízemní vrstvě bržděn třením o zemský povrch, dospěli bychom k nesprávnému závěru. Proudnice větru mají při zemi jiný směr, než ve výšce (tzv. střih větru).

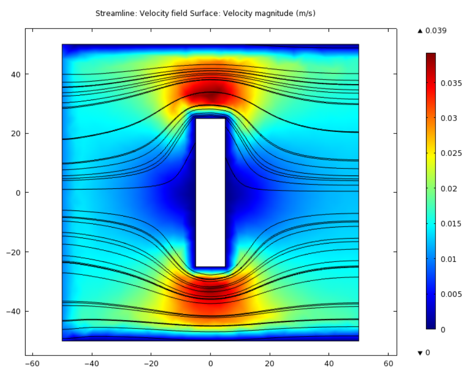
Pro nestlačitelnou kapalinu je z rovnice kontinuity $\operatorname{div}\vec{v} = 0$, a tedy $\operatorname{div}(\operatorname{grad}\Phi) = \Delta\Phi = 0$. Kapalina tedy při potenciálovém proudění v Hele-Shaw cele proudí tak, aby splňovala Laplaceovu rovnici.

Uvedené výsledek neodpovídá běžnému 3D proudění, kdy hraje roli setrvačnost viskózní kapaliny. Protože ale $\operatorname{rot}(\operatorname{grad}\Phi) = 0$ platí pro libovolnou funkci Φ (matematická identita), každé nevírové proudění ($\operatorname{rot}\vec{v} = 0$) je také prouděním potenciálovým ($\vec{v} = \operatorname{grad}\Phi$). Proudnice v Hele-Shawově cele tedy *modelují* i proudnice dvoudimenzionálního potenciálového proudění nestlačitelné **ideální tekutiny bez vnitřního tření**. V praxi tedy přibližně laminárního stacionárního proudění zanedbatelně viskózní kapaliny v situacích, kdy se v jednom směru systém příliš nemění. Proudnice kolem hydrodynamických modelů v Hele-Shawově cele a v modelované situaci jsou sice vizuálně podobné, fyzikální realita je ale v těchto případech zcela jiná.

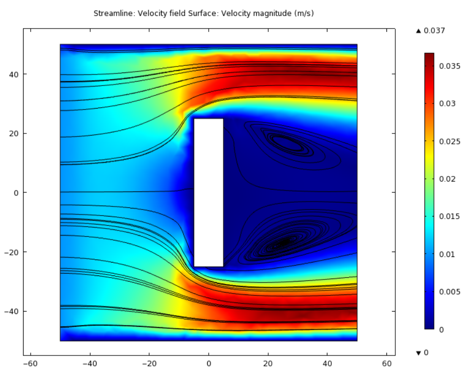
Rozdílnost proudění viskózní kapaliny v závislosti na tloušťce kanálu lze dobře pozorovat na numerických simulacích laminárního proudění řešících Navierovy-Stokesovy rovnice v Hele-Shawově cele o různé tloušťce. Proudícím médiem byla voda vstupující do cely s počáteční rychlostí 1 cm/s, plocha cely 10 cm × 10 cm, tloušťka štěrbiny $a = 1$ a 10 mm. Zatímco při štěrbině 1 mm zanedbání setrvačných sil (Stokesův model, rovnice (10)) nehraje roli (výsledek je prakticky shodný s řešením rovnice (9)), při 10 mm toto zanedbání již dává odlišné, nesprávné výsledky. Při tloušťce 1 mm je proudění prakticky potenciálové a reverzibilní (z grafů nepoznáme, proudí-li kapalina vpravo či vlevo). Při 10 mm obecný laminární model ukazuje, že po průchodu kolem překážky kapalina setrvačností udržuje úzký kanál a za překážkou vzniká vír. Proudění je tedy vírové a nepotenciálové.



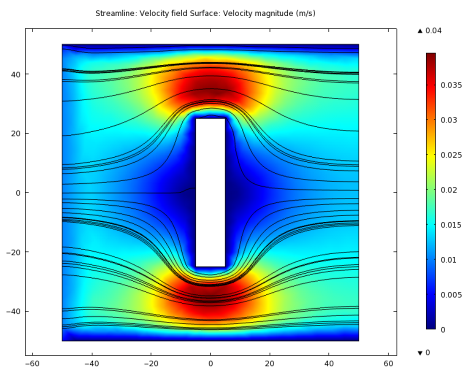
$a = 1$ mm, laminární model



$a = 1$ mm, Stokesův model



$a = 10$ mm, laminární model



$a = 10$ mm, Stokesův model

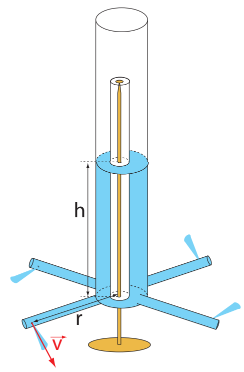
2.3 Jednoduché stroje

E 26 – Segnerovo kolo

Ukázka reaktivního pohonu.

Potřeby

- Segnerovo kolo, 5.4
- plato, které zachytí proudící kapalinu, 4.2
- kádinka s vodou.



Provedení

Vodu nalejeme seshora do Segnerova kola. Pozorujeme roztočení kola.

Fyzikální interpretace

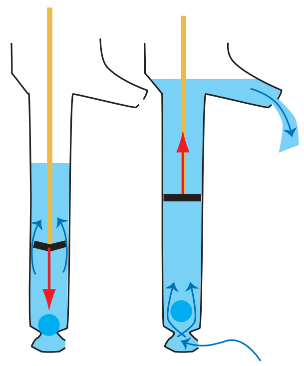
Jedná se o ukázku reaktivního pohonu. Voda stříká z otvorů rychlostí, která je dána výškou kapaliny v nádobě. Proud stříkající vody má nenulový moment síly vůči ose otáčení nádoby, proto dochází k rotaci kola.

E 27 – Model pumpy

Jednoduchý stroj sloužící k čerpání kapaliny do výšky.

Potřeby

- Model pumpy, 4.4
- kádinka s vodou.



Provedení

Pumpu ponoříme do kádinky s vodou, háček na straně slouží k zavěšení na okraj kádinky. Po ponoření sledujeme, že hladina vody v pumpě vystoupí do úrovně hladiny vody v kádince. Je potřeba, aby se píst pumpy v této chvíli nacházel pod hladinou vody. Opakovaným pohybem pístu nahoru a dolů dosáhneme toho, že voda vytéká z kohoutku pumpy.

Fyzikální interpretace

Tento typ pumpy se nazývá sací, protože pumpa kapalinu nasává. Pumpa obsahuje dva ventily – jako jeden z nich slouží kulička, jako druhý pružný disk pístu. Při stlačení pístu směrem dolů přitlačuje tlaková síla kuličku na spodní otvor, čímž jej uzavírá. Protože je disk pružný, při tomto pohybu se částečně ohýbá a kapalina, která se nacházela pod pístem, se přemisťuje kolem pístu nad něj. Při tažení pístu směrem nahoru zvedá píst kapalinu, která se nachází nad ním, směrem nahoru. Tím vzniká pod pístem podtlak, který nadzvedává kuličku, a tím pádem do pumpy stoupá další kapalina. Tento cyklus se neustále opakuje, ve chvíli, kdy je sloupec nad pístem dostatečně vysoký, kapalina začne při jednotlivých zdvizích vytékat z kohoutku.

Technické problémy

Protože píst slouží zároveň jako ventil a je pružný, ohýbá se i při zdvihu a kapalina nad pístem protéká částečně při zdvihu pod píst. Pokud pumpujeme velmi pomalu, nemusíme se dočkat vypumpování kapaliny až ke kohoutku.

Reference

[1] http://www.physics.umd.edu/lecdem/services/demos/mainindex.htm
University of Maryland, Physics Lecture-Demonstration Facility
Fluid mechanics - Buoyancy