

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Metody měření povrchového napětí kapalin

Bakalářská práce

Autor: Jonáš Kubeček

Studijní program: B0114A110004

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Matematika se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: RNDr. Leontýna Šlégrová, Ph.D.



Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor: Jonáš Kubeček

Studium: S21FY004BP

Studijní program: B0114A110004 Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Studijní obor: Matematika se zaměřením na vzdělávání, Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Název bakalářské práce: **Metody měření povrchového napětí kapalin**

Název bakalářské práce AJ: Methods for measuring the surface tension of liquids

Anotace:

Bakalářská práce pojednává o metodách měření povrchového napětí kapalin. Teoretická část se zabývá fyzikálními vlastnostmi a zákonitostmi kapalin, především fyzikální podstatou povrchového napětí kapalin. Dále se věnuje popisu vybraných metod měření povrchového napětí. Praktická část poté experimentálně testuje přesnost jednotlivých metod a využitelnost při výuce fyziky na středních školách. Součástí práce je také návrh laboratorní úlohy z fyziky pro střední školy.

Zadávací pracoviště: Katedra fyziky,
Přírodovědecká fakulta

Vedoucí práce: RNDr. Leontýna Šlégrová, Ph.D.

Oponent: RNDr. Jiří Kos

Datum zadání závěrečné práce: 11.8.2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použitých zdrojů uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne 7. 5. 2024

Jonáš Kubeček

Poděkování:

Děkuji své vedoucí bakalářské práce RNDr. Leontýně Šlégrové, Ph.D. za užitečné rady, pomoc a čas, které mi při vedení práce věnovala. Poděkování patří také panu doc. RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za pomoc při provedení praktické části práce.

Anotace

KUBEČEK, Jonáš *Metody měření povrchového napětí kapalin*. Hradec Králové, 2024. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Leontýna Šlégrová, 53 s.

Bakalářská práce pojednává o metodách měření povrchového napětí kapalin. Teoretická část se zabývá fyzikálními vlastnostmi a zákonitostmi kapalin, především fyzikální podstatou povrchového napětí kapalin. Dále se věnuje popisu vybraných metod měření povrchového napětí. Praktická část poté experimentálně testuje přesnost jednotlivých metod a využitelnost při výuce fyziky na středních školách. Součástí práce je také návrh laboratorní úlohy z fyziky pro střední školy.

Klíčová slova

kapalina, povrchové napětí, povrchová vrstva, kapilární jevy, měření, pokusy, laboratorní úloha

Annotation

KUBEČEK, Jonáš *Methods for measuring the surface tension of liquids*. Hradec Králové, 2024. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor Leontýna Šlégrová, 53 p.

The bachelor thesis focuses on methods for measuring the surface tension of liquids. The theoretical part addresses the physical properties and principles of liquids, particularly the physical nature of liquid surface tension. It also provides a description of selected methods for measuring surface tension. The practical part then experimentally tests the accuracy of individual methods and their applicability in physics education at secondary schools. The thesis also includes a proposal for a physics laboratory task for secondary schools.

Keywords

liquid, surface tension, surface layer, capillary phenomena, measuring, experiments, laboratory task

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 9 |
| 1 Fyzika kapalin | 10 |
| 1.1 Kapaliny jako látkové skupenství | 10 |
| 1.2 Mechanika kapalin | 11 |
| 1.2.1 Statika kapalin | 11 |
| 1.2.2 Dynamika kapalin | 13 |
| 1.3 Molekulová fyzika kapalin | 15 |
| 1.3.1 Koheze a adheze | 15 |
| 1.3.2 Povrchové napětí | 15 |
| 1.3.3 Kapilární jevy | 17 |
| 2 Metody měření povrchového napětí | 20 |
| 2.1 Wilhelmyho metoda | 20 |
| 2.2 Du Noüyova metoda | 22 |
| 2.3 Metoda maximálního přetlaku v bublině | 23 |
| 2.4 Metoda rostoucí kapky | 25 |
| 2.5 Metoda kapilární elevace | 25 |
| 2.6 Stalagmometrická metoda | 27 |
| 2.7 Metoda visící kapky | 28 |
| 2.8 Metoda přisedlé kapky | 29 |
| 2.9 Metoda rotující kapky | 30 |
| 2.10 Metoda s mikropipetou | 31 |
| 3 Praktická část | 32 |
| 3.1 Měření stalagmometrickou metodou | 32 |

| | | |
|-----|--|-----------|
| 3.2 | Měření metodou kapilární elevace | 34 |
| 3.3 | Měření du Noüyovou metodou | 35 |
| 4 | Návrh laboratorních úloh pro výuku fyziky na střední škole | 40 |
| | Závěr | 42 |
| | Seznam obrázků | 43 |
| | Seznam použitých zdrojů | 44 |
| A | Zadání první laboratorní úlohy | 46 |
| B | Zadání druhé laboratorní úlohy | 50 |

Úvod

S tématem povrchového napětí jakožto jevu i fyzikální veličiny se setkáváme při výuce fyziky na středních školách. Často však není kladen důraz na jeho důležitost, přestože povrchové napětí podobně jako hustota a viskozita patří mezi nejdůležitější fyzikální veličiny charakterizující vlastnosti kapalin. Povrchové napětí je příčinou mnoha jevů, se kterými se u kapalin setkáváme každý den, aniž bychom o tom přemýšleli. Ještě méně často se potom ve škole setkáme s vysvětlením, jak se veličina povrchové napětí měří.

Cílem této bakalářské práce je sestavit stručný přehled různých metod měření povrchového napětí kapalin, který může toto téma přiblížit žákům na středních školách. Dále si práce klade za cíl vybrat některé metody vhodné pro měření ve školních podmínkách. Téma práce jsem si vybral mimo jiné proto, že neexistuje příliš mnoho českých publikací, které by tyto metody shrnovaly.

První kapitola práce se zabývá teoretickými poznatky o kapalinách z pohledu mechaniky i molekulové fyziky. Ve druhé kapitole jsou představeny samotné metody měření povrchového napětí kapalin, z nichž jsou některé ověřeny v praktické části ve třetí kapitole. Čtvrtá kapitola navazuje na praktickou část s návrhy laboratorních úloh pro výuku na střední škole.

Kapitola 1

Fyzika kapalin

Ještě než se budeme zabývat metodami měření povrchového napětí kapalin, kterým je tato práce věnována, je nutné definovat pojem kapalina a zaměřit se na její základní vlastnosti, popsat důležité fyzikální jevy s kapalinami spojené a také shrnout fyzikální veličiny potřebné k dalšímu rozboru této tematiky.

1.1 Kapaliny jako látkové skupenství

Každá látka je složena z částic. Těmito částicemi jsou molekuly složené z atomů různých chemických prvků. Jelikož jsou částice v molekulách různě elektricky nabitě, působí na sebe molekuly přitažlivými silami, díky nimž je zajištěna soudržnost látek. Molekuly na sebe však působí i odpudivě, a to v případě, že jsou nějakým vnějším vlivem stlačovány k sobě. Největší mezimolekulární síly působí v látkách pevného skupenství, což způsobuje, že si těleso pevné látky udržuje určitý tvar a objem. Atomy pevných krystalických látek jsou pravidelně uspořádány do tzv. krystalické mřížky, u amorfních pevných látek pozorujeme pravidelné uspořádání pouze ve velmi omezených vzdálenostech. Částice pevných látek se díky působení přitažlivých a odpudivých sil nacházejí v tzv. rovnovážné poloze, kolem níž kmitají, a tělesa z pevné látky nemění snadno své rozměry. V látkách existují také volně pohyblivé molekuly, které překonaly působení přitažlivých sil. Skupenství, v němž látka obsahuje především volně se pohybující molekuly a přitažlivé síly jsou velmi malé, se nazývá plynné. Kvůli nesoudržnosti molekul si plyny neudrží svůj tvar ani objem a rozpínají se v celém prostoru. Plynná tělesa jsou mimo jiné velice dobře

stlačitelná. Svými vlastnostmi na pomezí mezi pevným a plynným skupenstvím se nachází skupenství kapalné. [1], [2]

Kapaliny společně s plyny řadíme do skupiny látek zvané tekutiny, jejichž základní vlastností je tekutost. Tekutina se projevuje vysokou pohyblivostí částic a neschopností udržet si svůj vlastní tvar. Kapaliny jsou sice soudržnější než plyny, přesto se jejich molekuly neřadí do mřížky. Ve své rovnovážné poloze se částice kapalin nacházejí velice krátce. Volné molekuly kapaliny se pohybují neuspořádaně a trhavě, takovému pohybu říkáme Brownův pohyb. Tekutiny považujeme za izotropické kontinuum, tedy spojitě prostředí, které má v každém směru stejné vlastnosti. Díky tomu se i základní veličiny popisující vlastnosti tekutin mění spojitě, a tak lze k popisu celého kontinua využít libovolnou částici tekutiny. [1]

1.2 Mechanika kapalin

1.2.1 Statika kapalin

Statika kapalin se zabývá popisem kapalných těles v klidu. Makroskopické vlastnosti kapalin jsou důsledkem jejich molekulárního složení, které bylo zmíněno v předchozí části. Základní veličinou popisující jakýsi stav napjatosti v kapalině je tlak p , který je definován jako podíl velikosti síly působící kolmo na danou plochu kapaliny a velikosti této plochy:

$$p = \frac{dF}{dS}. \quad (1)$$

S tlakem souvisí stlačitelnost, což je schopnost kapalin zmenšit svůj objem při zvýšení vnějšího tlaku. Vnější silovým působením na kapalně těleso se zvýší tlak na povrchu kapaliny, kvůli čemuž se zmenší vzdálenost mezi molekulami a kapalina zaujme nový rovnovážný stav. Kapalina odporuje svému stlačování vznikem vnitřního protitlaku. Míru stlačitelnosti kapaliny popisujeme tzv. koeficientem stlačitelnosti γ , charakteristickým pro každou kapalnou látku. Relativní změna objemu kapaliny při stlačování je přímo úměrná změně tlaku na povrchu kapaliny a koeficientem úměrnosti je právě koeficient stlačitelnosti γ :

$$\frac{\Delta V}{V} = -\gamma \cdot \Delta p. \quad (2)$$

V některých úvahách se můžeme setkat se zjednodušením v podobě modelu ideální kapaliny, která je dokonale nestlačitelná, tedy $\gamma = 0$. [1], [2]

Při stlačení kapaliny se tlak vyvolaný vnější silou šíří rovnoměrně celou kapalinou a ve všech bodech kapaliny se tlak změní stejně. Zmíněný jev se po svém objeviteli nazývá Pascalův zákon. Přesně však tento zákon platí jen u nestlačitelných kapalin. V případě stlačitelných kapalin obecně nemusí být změna tlaku při vnějším silovém působení ve všech bodech kapaliny stejná. Změnu tlaku δp v libovolném bodě stlačitelné kapaliny při změně tlaku v jiném bodě o δp_0 popisuje tzv. zobecněný Pascalův zákon:

$$\int_p^{p+\delta p} \frac{dp}{\varrho(p)} = \int_{p_0}^{p_0+\delta p_0} \frac{dp}{\varrho(p)}. \quad (3)$$

Nutno dodat, že v tomto zákonu uvažujeme barotropní stlačitelnou kapalinu, jejíž hustota je funkcí pouze tlaku kapaliny, tj. $\varrho = \varrho(p)$. [2]

Důležitou veličinou charakterizující nejen kapalinu je hustota ϱ , která je definována jako hmotnost objemové jednotky kapaliny, tedy

$$\varrho = \frac{m}{V}. \quad (4)$$

Hustota kapalin je obecně závislá na tlaku p a termodynamické teplotě T , protože je na těchto stavových veličinách závislý objem V kapaliny. Všechny kapaliny s rostoucí teplotou zvětšují svůj objem, čímž se jejich hustota snižuje. Jinak je tomu ale u vody, jejíž hustota mezi teplotami 0 °C a 4 °C roste. Nejvyšší hustotu má voda přibližně při teplotě 4 °C. Tomuto jevu se říká anomálie vody. [1], [2]

Uvažujeme-li homogenní nestlačitelnou kapalinu o konstantní hustotě v nádobě, je v hloubce h pod povrchem kapaliny tlak p_h , pro nějž platí vztah:

$$p_h = h\varrho g, \quad (5)$$

kde g je tíhové zrychlení. Tento tlak se nazývá hydrostatický. Důležitým poznatkem je nezávislost velikosti hydrostatického tlaku na tvaru nádoby, ve které se kapalina nachází. [2]

Na každou plochu tuhého tělesa ponořeného do kapaliny působí tlaková síla kolmo k této ploše. V důsledku různě velkých tlaků v různých hloubkách kapaliny působí na každou část ponořeného tělesa jinak velké síly. Síly působící rovnoběžně s hladinou kapaliny proti sobě ve stejné hloubce h se vzájemně vyruší, neboť jsou důsledkem

stejně velkého tlaku. Síly, které na těleso působí svisle shora a zdola stejně velké nejsou, a tak nenastává silová rovnováha. Jelikož je ve větší hloubce větší hydrostatický tlak, je také síla působící na těleso zdola větší, a tak výslednice sil působících na těleso ponořené do kapaliny směřuje svisle vzhůru, tedy proti směru působení tíhové síly. Tuto sílu nazýváme hydrostatickou vztlakovou silou \mathbf{F}_{vz} a platí pro ni vztah:

$$F_{vz} = V \rho g, \quad (6)$$

kde V je objem ponořené části tělesa a ρ je hustota kapaliny. Zmíněný poznatek vyjádřil řecký učenec Archimédes, a tak ho nazýváme Archimédův zákon. [3]

1.2.2 Dynamika kapalin

Popisem fyzikálních jevů a zákonitostí pohybujících se kapalin se zabývá hydrodynamika. Jelikož částice kapaliny neudržují stálou vzájemnou polohu, jako je tomu u pevných těles, je popis pohybující se kapaliny velice složitý. Uvažujme nyní proto speciální případ, při němž se jednotlivé částice kapaliny pohybují převážně v jednom směru. V takovém případě mluvíme o proudění kapaliny. Směr proudící kapaliny lze znázornit tzv. proudnicí, tedy myšlenou čarou, jejíž tečna v daném bodě má směr rychlosti proudící kapaliny. Jestliže se rychlost proudící kapaliny v čase nemění, mluvíme o ustáleném proudění kapaliny. Vedeme-li proudící kapalinou uzavřenou křivku, která každou proudnici protíná nejvýše jednou, tvoří tyto proudnice tzv. proudovou trubici. Objem kapaliny, který proteče daným průřezem proudové trubice za jednotku času, je objemový průtok Q_V . Platí pro něj vztah:

$$Q_V = Sv, \quad (7)$$

kde S je obsah daného průřezu a v je rychlost proudící kapaliny. [4]

V případě modelu ideální kapaliny, která je dokonale nestlačitelná a dokonale tekutá, platí rovnice popisující spojitost proudění kapaliny uzavřenou trubici. Každým průřezem této trubice totiž musí za stejnou dobu protéct stejný objem kapaliny. Rovnice spojitosti toku neboli rovnice kontinuity má tvar:

$$Q_V = Sv = \text{konst.} \quad (8)$$

Čím menší je obsah příčného průřezu proudové trubice v daném místě, tím větší musí být rychlost proudící kapaliny, a naopak. [4]

Zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny vyjádřil Daniel Bernoulli rovnicí:

$$\frac{1}{2}\varrho v^2 + h\varrho g + p = \text{konst.}, \quad (9)$$

kde první člen $\frac{1}{2}\varrho v^2$ představuje kinetickou energii pro jednotkový objem kapaliny, druhý člen $h\varrho g$ potenciální energii tíhovou pro jednotkový objem kapaliny a třetí člen p je potenciální energie tlaková vztažená na jednotkový objem kapaliny. [4]

Přejdeme-li od modelu ideální kapaliny ke skutečné kapalině, musíme uvažovat také tření, které se projeví při pohybu kapaliny. Jednotlivé molekuly kapaliny na sebe při svém pohybu působí třecími silami, které dávají za vznik jevu, kterému říkáme vnitřní tření. Při bližším pozorování kapaliny proudící uzavřenou trubicí zjistíme, že vrstva proudící kapaliny nejtěsněji přiléhající k trubici se vůbec nepohybuje. Rychlost dalších vrstev roste s rostoucí vzdáleností od stěny trubice a nejrychleji se kapalina pohybuje uprostřed trubice. Ve vrstvách kapaliny majících směr proudění kapaliny působí tečné napětí τ , které lze vyjádřit vztahem:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (10)$$

kde $d\mathbf{v}$ je přírůstek rychlosti mezi dvěma sousedními vrstvami kapaliny, které jsou od sebe vzdáleny o dy . Konstantou úměrnosti je dynamická viskozita η , jejíž velikost závisí na druhu kapaliny. Pomocí dynamické viskozity je definována kinematická viskozita ν :

$$\nu = \frac{\eta}{\varrho}, \quad (11)$$

kde ϱ je hustota kapaliny. Vztah (10), který definoval Isaac Newton, platí pro většinu kapalin. Existují ale kapaliny označované jako nenewtonovské, jejichž viskozita závisí na gradientu rychlosti. Mezi takové kapaliny řadíme koloidní roztoky, emulze nebo suspenze, tedy například roztok vody se škrobem, krev, med, kečup nebo tekuté mýdlo. Viskozitu definujeme na základě tzv. laminárního proudění kapaliny, tedy proudění, při němž se kapalina pohybuje ve vrstvách, které se vzájemně nemíchají. Při dosažení určité rychlosti se vrstvy začnou promíchávat a proudění se mění na tzv. vírové. [1], [2]

1.3 Molekulová fyzika kapalin

V první části této kapitoly byla stručně popsána struktura kapalin. U kapalin se setkáváme s tzv. krátkodosahovým uspořádáním, které je typické pravidelným uspořádáním v okruhu několika molekul nebo skupin molekul, v rámci celého kapalného tělesa jsou ale molekuly neuspořádané. Díky této struktuře jsou kapaliny na rozdíl od pevných krystalických těles, která mají dalekodosahové uspořádání, tekuté. Zaměříme se nyní podrobněji na jevy spojené s molekulovým složením kapalin. [5]

1.3.1 Koheze a adheze

Molekuly kapaliny na sebe působí mezimolekulovými silami dvojího typu. Přitažlivé síly, které nazýváme kohézní síly nebo síly soudržnosti, jsou důsledkem vzájemného vhodného uspořádání elektronů v sousedních molekulách, které se elektricky přitahují. Naopak odpudivé síly jsou způsobeny elektrostatickým odpuzováním krajních elektronů v elektronových obalech molekul. Jev plynoucí z působení kohézních sil, který u kapalin pozorujeme, se nazývá koheze neboli soudržnost.

Na rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou pozorujeme jev zvaný adheze neboli přilnavost. Jeho příčinou jsou přitažlivé síly mezi molekulami dvou různých látek, v našem případě mezi molekulami kapaliny a pevné látky. Tyto přitažlivé síly se nazývají adhézní síly nebo síly přilnavosti. [5]

1.3.2 Povrchové napětí

Jednou ze zásadních fyzikálních veličin souvisejících s většinou fyzikálních jevů molekulové fyziky kapalin je povrchové napětí kapalin. Při zkoumání této veličiny se u kapaliny musíme zaměřit na její rozhraní s okolním prostředím. Jak již bylo zmíněno výše, kapaliny se skládají z částic (molekul), které na sebe silově působí. V případě molekul uvnitř kapaliny se tyto síly vyrovnávají, neboť na sebe molekuly ze všech směrů působí stejně velkými silami. Jinak je tomu ale u molekul nacházejících se na okraji kapalného tělesa. Tyto molekuly sousedí z jedné strany s molekulami jiné látky, čímž vzniká silová nerovnováha ve směru kolmém k rozhraní kapaliny. [1]

Molekuly kapaliny na okraji kapalného tělesa tvoří tzv. povrchovou vrstvu kapaliny, která má díky nerovnováze sil odlišné vlastnosti než zbytek kapaliny. Výslednice

sil působících na každou molekulu v této vrstvě směřuje dovnitř kapaliny a povrchová vrstva se tak chová jako pružná blána. Současně mají molekuly v povrchové vrstvě větší energii než ostatní molekuly kapaliny. Tato energie, kterou nazýváme povrchová, je rovna práci, kterou je nutno vykonat při přemístění molekuly zevnitř kapaliny do povrchové vrstvy a překonat tak působení kohézních sil. Každým přesunem molekuly do povrchové vrstvy se zvětší povrch kapalného tělesa a také jeho povrchová energie. Proto má každé kapalně těleso tendenci zaujmout takový tvar, aby mělo co nejmenší obsah volného povrchu kapaliny, a tedy co nejmenší energii. Běžně si tohoto jevu můžeme všimnout u kulového tvaru kapky nebo bubliny libovolné kapaliny. [5]

Veličina povrchové napětí σ je definována jako energie E molekul kapaliny ve vrstvě na rozhraní s jinou látkou vztažená na jednotku plochy S tohoto rozhraní, tedy

$$\sigma = \frac{E}{S}. \quad (12)$$

V souladu s rozměrem jednotky povrchového napětí lze tuto veličinu definovat druhým způsobem, a to jako velikost kohézních sil F působících mezi molekulami kapaliny s jinou látkou vztažený na jednotku délky l rozhraní, tedy

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (13)$$

Povrchové napětí tedy charakterizuje schopnost kapaliny bránit zvětšení svého povrchu, a to působením síly na délku volného povrchu kapaliny. Tento jev lze ukázat jednoduchým pokusem s rámečkem z tenkého drátu, jehož jedna strana je volně pohyblivá. Vytvoříme-li v rámečku mýdlovou blánu ponořením do mýdlového roztoku, pohyblivá příčka se bude pohybovat tak, aby mýdlová blána měla co nejmenší povrch. Síla pohybující s volnou příčkou ve zmíněném pokusu se nazývá povrchová síla a má vždy směr tečny k povrchu kapaliny. [1], [5]

Povrchové napětí je závislé na teplotě kapaliny a jeho velikost je nepřímo úměrná teplotě. Při určité kritické teplotě je hodnota povrchového napětí nulová. Vliv na povrchové napětí kapaliny má také přítomnost dalších rozpuštěných látek, které mohou povrchové napětí buď snížit, nebo mírně zvýšit. Látky, které snižují velikost povrchového napětí kapaliny, se nazývají povrchově aktivní látky. Příkladem jsou saponáty užívané při mytí nádobí, které pomáhají odstranit mastnotu z povrchu nádobí právě tím, že zmenší povrchové napětí mastné kapaliny. [5]

1.3.3 Kapilární jevy

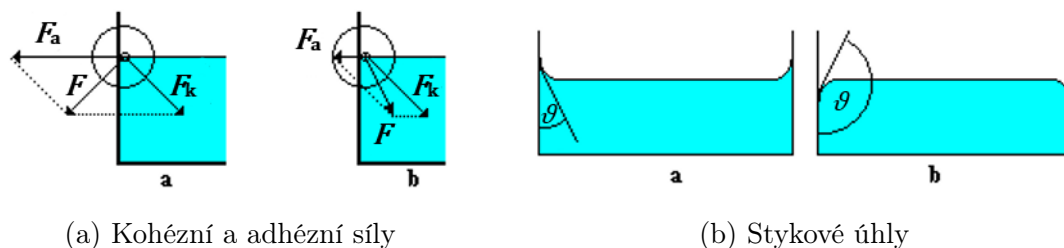
Jedním z účinků povrchového napětí jsou také jevy, které můžeme pozorovat při styku kapaliny a další látky, např. nádoby, v níž se kapalina nachází. V takovém případě se zaměříme na rozhraní kapaliny, stěny nádoby a okolního vzduchu. Dle zakřivení hladiny kapaliny v blízkosti stěny nádoby rozlišujeme kapaliny na smáčející a nesmáčející. Jak bylo zmíněno výše, kapalina má tendenci dosáhnout stavu, kdy je povrchová energie minimální. Jelikož je tato energie nejmenší na rozhraní kapaliny a stěny nádoby, zaujímá kapalina takový tvar, aby byla plocha styku se stěnou nádoby co největší, a tak smáčí stěnu nádoby. V případě některých kapalin je ale povrchové napětí na rozhraní kapaliny a stěny nádoby větší než na rozhraní nádoby a vzduchu, a tak naopak kapalina zaujímá takový tvar, aby byla plocha styku se stěnou nádoby co nejmenší, a kapalina nesmáčí stěnu nádoby. [1]

Zmíněné kapilární jevy lze vysvětlit také z hlediska silového působení mezi molekulami různých látek. Mezi molekulami kapaliny působí kohézní síly \mathbf{F}_k a současně na sebe silově působí kapalina a pevná látka (nádobu) formou adhézních sil \mathbf{F}_a . Jsou-li adhézní síly větší než kohézní síly, směřuje výslednice sil do stěny nádoby a kapalina smáčí stěnu nádoby. V opačném případě, jsou-li adhézní síly menší než kohézní síly, směřuje výslednice do kapaliny a kapalina stěnu nádoby nesmáčí. V každém případě je povrch kapaliny zakřiven kolmo k výslednici sil působící na molekulu v povrchu kapaliny (Obr. 1.1a). Úhel, pod kterým se zakřivený povrch kapaliny odklání od stěny nádoby, se označuje jako stykový úhel ϑ (Obr. 1.1b) a pomocí povrchových napětí ho lze vypočítat takto:

$$\cos \vartheta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_3},$$

kde σ_1 je povrchové napětí na rozhraní stěny nádoby a vzduchu, σ_2 je povrchové napětí na rozhraní stěny a kapaliny a σ_3 je povrchové napětí na rozhraní kapaliny a vzduchu. Dle velikostí jednotlivých povrchových napětí uvažujeme tři možné situace.

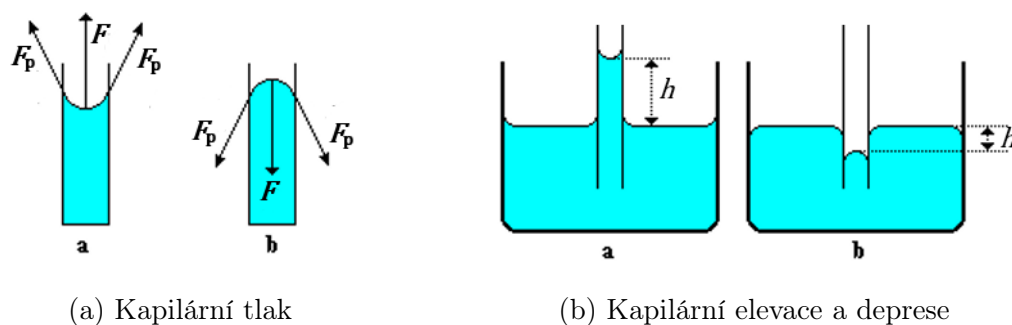
1. Je-li $\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_2$, je úhel $\vartheta = 0^\circ$ a na stěně nádoby se rozprostře tenká vrstva kapaliny.
2. Je-li $\sigma_1 > \sigma_2$, je úhel $\vartheta < 90^\circ$ a kapalina smáčí stěnu nádoby.
3. Je-li $\sigma_1 < \sigma_2$, je úhel $\vartheta > 90^\circ$ a kapalina nesmáčí stěnu nádoby. [1], [5]



Obrázek 1.1: Jevy na rozhraní kapaliny a pevné látky [6]

Vnitřní tlak v kapalině označujeme jako molekulový nebo kohézní tlak p_m . Tento tlak je důsledkem silového působení molekul uvnitř kapaliny na molekuly povrchové vrstvy a má řádově velikost jednotek GPa. Díky tomuto tlaku se kapaliny vyznačují velmi malou stlačitelností oproti plynům. Zakříví-li se vlivem smáčivosti či nesmáčivosti kapaliny povrch na hladině kapaliny, vznikne v místě zakřivení přídatný kapilární tlak p_k . U smáčivé kapaliny vzniká dutý povrch a celkový tlak je $p = p_m - p_k$. V případě nesmáčivé kapaliny vzniká naopak vypuklý povrch a celkový tlak je $p = p_m + p_k$. Na obrázku 1.2a jsou vyznačeny výslednice \mathbf{F} povrchových sil \mathbf{F}_p způsobující vznik kapilárního tlaku v obou případech.

Jako kapilární jevy běžně označujeme kapilární elevaci a kapilární depresi. Kapilární jevy získaly svůj název podle označení tenké trubice o velmi malém vnitřním průměru – kapiláry. Ponoříme-li kapiláru do kapaliny, v blízkosti stěn kapiláry se zakříví povrch a vznikne přídatný kapilární tlak. Během krátké chvíle dojde k vyrovnání tlaků díky změně výšky hladiny v kapiláře vůči okolní hladině kapaliny (Obr. 1.2b). U smáčivých kapalin dochází kvůli zápornému kapilárnímu tlaku ke kapilární elevaci, tedy vzestupu hladiny kapaliny nad okolní hladinu. Naopak u nesmáčivých kapalin dochází kvůli kladnému kapilárnímu tlaku ke kapilární depresi, tedy poklesu



Obrázek 1.2: Kapilární jevy [6]

hladiny kapaliny pod úroveň okolní hladiny. Rozdíl hladin h vypočítáme pomocí vztahu:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad (14)$$

kde σ je povrchové napětí kapaliny, ρ je hustota kapaliny, g je tíhové zrychlení a r je vnitřní poloměr kapiláry. Jako příklad smáčivých kapalin uveďme vodu a líh ve styku se sklem nebo rtuť ve styku s mědí. Naopak rtuť ve styku se sklem je typickým příkladem nesmáčivé kapaliny. [5], [6]

Výše probrané teoretické poznatky o kapalinách nyní využijeme pro popis jednotlivých metod měření povrchového napětí kapalin, kterými se zabývá následující kapitola.

Kapitola 2

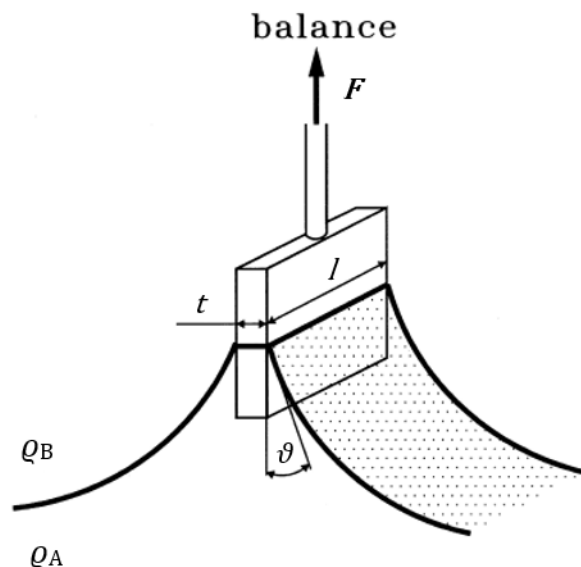
Metody měření povrchového napětí

K měření povrchového napětí kapalin existuje velké množství metod, které se liší svojí náročností, ale také odlišností pomůcek využívaných při měření. Cílem této kapitoly je uvést základní přehled nejznámějších metod s vysvětlením jejich podstaty z teoretického hlediska.

Základní metody měření povrchového napětí kapalin lze rozdělit do několika skupin dle způsobu, jakým se povrchové napětí zjišťuje. První skupinu tvoří metody, které využívají k přímému určení povrchového napětí citlivé váhy. Jsou to Wilhelmyho metoda a du Noüyova metoda. Do druhé skupiny řadíme metody založené na principu měření kapilárního tlaku, kterými jsou metoda maximálního tlaku bubliny a metoda rostoucí kapky. Třetí skupina obsahuje metody pracující s rovnováhou kapilární a tíhové síly. Do této skupiny patří metoda kapilární elevace a stalagmometrická metoda. Čtvrtou skupinu tvoří metody využívající vlivu gravitace na tvar kapky kapaliny. Patří sem metoda visící kapky a metoda přisedlé kapky. Do poslední páté skupiny lze zařadit metody, které zkoumají deformace kapky kapaliny vzniklé vnějším vlivem. Jsou to metoda rotující kapky a metoda s mikropipetou. [7]

2.1 Wilhelmyho metoda

Metoda Wilhelmyho destičky, kterou vynalezl německý fyzik Ludwig Wilhelmy, využívá závislosti povrchového napětí na síle, kterou působí kapalina na těleso smáčené v kapalině. Tímto tělesem je právě Wilhelmyho destička, tenká destička zavěšená pomocí pevného vlákna svisle na citlivou váhu. Váha je zkalibrována s destičkou



Obrázek 2.1: Wilhelmyho metoda [7]

zavěšenou mimo kapalinu a následně spuštěna do kapaliny, která destičku povrchovou silou přitáhne. Aby se zamezilo vzniku chyby, kterou by způsobila vztlaková síla působící na destičku, je destička vytažena z kapaliny tak, aby její spodní stěna byla v úrovni hladiny kapaliny, tj. aby se kapaliny pouze dotýkala. Konečně je pomocí váhy zjištěna síla, kterou kapalina přitahuje destičku.

Vztah pro výpočet povrchového napětí Wilhelmyho metodou plyne přímo z definice povrchového napětí definovaného jako podíl velikosti kohézních sil působících mezi molekulami kapaliny a jiné látky a délky rozhraní mezi kapalinou a jinou látkou. Platí tedy vztah:

$$\sigma = \frac{F}{2(l + t) \cos \vartheta}, \quad (15)$$

kde F je velikost síly, kterou naměříme pomocí citlivého měřicího zařízení, l je délka destičky, t je tloušťka destičky a ϑ je stykový úhel, pod kterým kapalina smáčí destičku. V ideálním případě, kdy kapalina zcela smáčí destičku, je úhel nulový.

Výhodou této metody je, že není nutné provádět žádné úpravy výpočtů pro dosažení přesnějších výsledků. Pro měření je vhodné využít destičku z platiny nebo slitiny platiny a iridia, které zajišťují vysokou smáčivost. Mimo to je možné použít také destičku vyrobenou ze skla, slídy či oceli. U libovolného materiálu je však vyžadována perfektní čistota. [7], [8], [9]

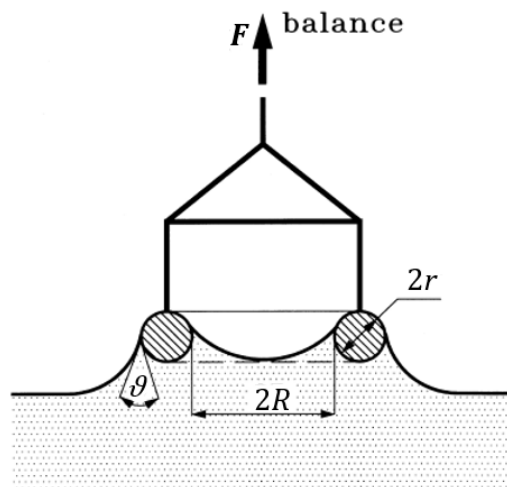
2.2 Du Noüyova metoda

Du Noüyova metoda známá také jako tzv. odtrhávací metoda využívá stejně jako Wilhelmyho metoda měření síly, kterou kapalina přitahuje těleso ke svému povrchu. Její princip vymyslel francouzský fyzik Pierre Lecomte du Noüy. K měření se využívá kroužek z tenkého drátu, tzv. du Noüyův prstenec, který je připevněn vláknem k citlivému měřicímu zařízení přizpůsobenému k měření síly. Provede se kalibrace přístroje v okamžiku, kdy se prstenec nachází mimo kapalinu, a následně je prstenec ponořen do kapaliny. Poté je prstenec postupně vynořován a vzdalován od hladiny kapaliny, přičemž je pomocí citlivého přístroje měřena kohézní síla přitahující prstenec ke kapalině, a to až do okamžiku, kdy se prstenec odtrhne od hladiny kapaliny. K výpočtu se využívá maximální síla F , která byla naměřena těsně před odtržením prstence a která způsobila přerušení spojení kapaliny s du Noüyovým prstencem.

Vztah, kterým se povrchové napětí počítá, plyne podobně jako u Wilhelmyho metody přímo z definice povrchového napětí. Na rozdíl od předchozí metody je ale nutné doplnit vztah pro výpočet tzv. korekčním činitelem f , protože při oddalování prstence od hladiny se zvedá také část objemu kapaliny. Pro velikost povrchového napětí tedy můžeme psát:

$$\sigma = \frac{F}{4\pi R \cos \vartheta} f, \quad (16)$$

kde F je velikost naměřené síly, R je poloměr použitého du Noüyova prstence a ϑ je stykový úhel. V uvedeném vztahu je nutné počítat s dvojnásobkem obvodu prstence, tedy $4\pi R$, neboť se rozhraní kapaliny a prstence nachází z jeho vnitřní i vnější strany.



Obrázek 2.2: Du Noüyova metoda [7]

Korekční činitel f byl zaveden několika způsoby. Například jako funkce $f\left(\frac{R^3}{V}, \frac{R}{r}\right)$, kde r je poloměr drátu, z něhož je du Noüyův prstenec vyroben a V je objem kapaliny, která je při oddálení prstence od kapaliny nad úrovní hladiny okolní kapaliny. Pánové Zuidema a Waters zavedli korekční činitel, jehož vztah s úpravou dle [7] lze zapsat takto:

$$f = 0,7250 + \sqrt{\frac{9,075 \cdot 10^{-4} F}{\pi^3 \Delta \rho g R^3} - \frac{1,679 r}{R}} + 0,04534, \quad (17)$$

kde $\Delta \rho$ je rozdíl hustot spodní a horní fáze, tedy hustoty kapaliny a hustoty okolního vzduchu a g je velikost tíhového zrychlení.

Výpočet povrchového napětí pomocí této metody je kvůli nutnosti použití korekčního faktoru složitější než Wilhelmyho metoda. Na rozdíl od Wilhelmyho metody je navíc nutné znát velikost hustoty použité kapaliny. Vhodným materiálem pro výrobu du Noüyova prstence je opět platina či její slitina s iridiem. Důležité je dbát na to, aby byl prstenec při smáčení rovnoběžný s hladinou kapaliny, ale také aby nebyl žádným způsobem zdeformovaný. [7], [8], [9]

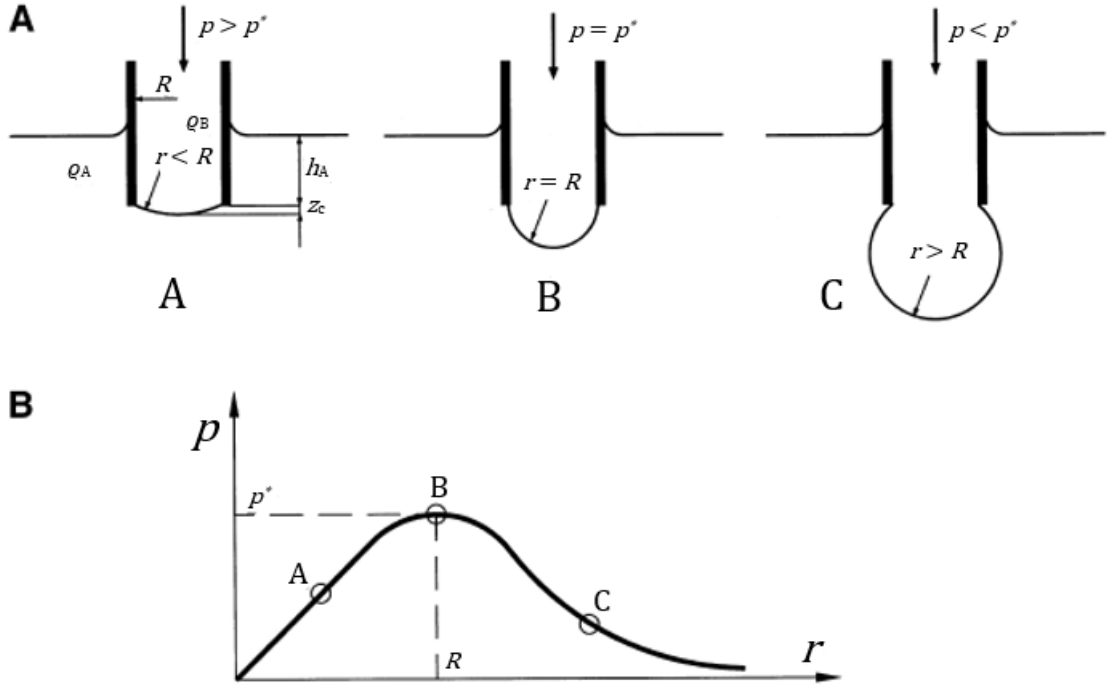
2.3 Metoda maximálního přetlaku v bublině

Povrchové napětí může být definováno jako práce potřebná ke vzniku jednotkové plochy povrchu kapaliny. Kapalně těleso má tedy tendenci zaujmout takový tvar, aby byla povrchová energie co nejmenší. To je příčinou rozdílu tlaků uvnitř a vně zakřiveného povrchu kapalného tělesa. Tlakový rozdíl, tzv. Laplaceův tlak, je příčinou mnoha jevů, například kapilární elevace či vzniku kapky nebo bubliny. Obecně tento tlakový rozdíl Δp popisuje tzv. Youngova–Laplaceova rovnice:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (18)$$

kde σ je povrchové napětí kapaliny, R_1 a R_2 jsou poloměry křivosti, které charakterizují zakřivení povrchu kapaliny. Na měření tohoto tlakového rozdílu je založena metoda maximálního přetlaku v bublině, kterou lze zjistit povrchové napětí kapaliny. [7]

Průběh metody je takový, že se tenká trubice (kapilára) ponoří do kapaliny a jejím prostřednictvím se do kapaliny vtlačuje plyn, který na konci trubice vytvoří bublinu.



Obrázek 2.3: Metoda maximálního přetlaku v bublině [7]

Citlivým měřicím zařízením se měří průběh velikosti tlaku v bublině. Z počátku je poloměr r vznikající bubliny větší než vnitřní poloměr kapiláry R . Se zvětšující se bublinou se zvětšuje její zakřivení a poloměr se zmenšuje, čímž se zvyšuje přetlak v bublině. V okamžiku, kdy se poloměr bubliny vyrovná poloměru kapiláry, tj. bublina má tvar polokoule, dosáhne přetlak svého maxima. Při dalším růstu bubliny se poloměr zvětšuje a přetlak bubliny klesá. V určitém okamžiku nakonec dojde k oddělení bubliny od kapiláry. Tento průběh je znázorněn na obrázku 2.3 společně s grafem závislosti tlaku v bublině na jejím poloměru.

Uvažujeme-li, že má bublina kulový tvar, jsou poloměry křivosti R_1 a R_2 stejně velké a rovné poloměru bubliny r , a tak z Youngovy–Laplaceovy rovnice plyne:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}. \quad (19)$$

Přetlak v bublině je roven součtu Laplaceova (kapilárního) tlaku a hydrostatického tlaku způsobeného sloupcem kapaliny nad spodním otvorem kapiláry, tedy

$$p = \Delta p + h\rho g, \quad (20)$$

kde h je hloubka ponoření kapiláry, ρ je hustota kapaliny a g je velikost tíhového zrychlení. Z předchozího textu plyne, že maximální přetlak je dosažen v okamžiku,

kdy má bublina stejný poloměr jako kapilára, proto můžeme psát:

$$p_{\max} = \frac{2\sigma}{R} + h\rho g, \quad (21)$$

z čehož již plyne vztah pro výpočet povrchového napětí kapaliny:

$$\sigma = \frac{R}{2}(p_{\max} - h\rho g). \quad (22)$$

Při použití této metody je nutné znát hustotu kapaliny, ale také přesně změřit hloubku, do níž je kapilára ponořena. [7], [8]

2.4 Metoda rostoucí kapky

Na podobné fyzikální podstatě jako předchozí metoda je postavena také tzv. metoda rostoucí kapky či bubliny. Tato metoda je založena na současném pozorování tvaru kapky a měření přetlaku v kapce. Metoda je vhodná především pro určení dynamického povrchového napětí. To je na rozdíl od statického povrchového napětí závislé na čase. Jedná se o povrchové napětí kapaliny v neklidovém stavu, tj. ve stavu, kdy není povrch kapaliny v rovnováze. [7]

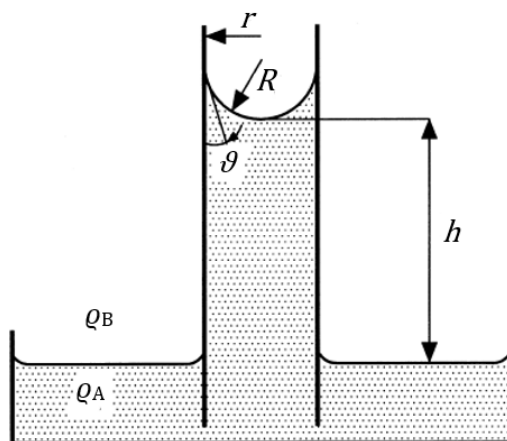
2.5 Metoda kapilární elevace

Jednou z nejstarších metod měření povrchového napětí kapalin je metoda využívající kapilárních jevů. Jestliže ponoříme kapiláru do zkoumané kapaliny, vystoupá kapalina v kapiláře do výšky odlišné od výšky okolní hladiny. To je důsledkem rozdílu tlaků pod rovným povrchem kapaliny a zakřiveným povrchem způsobeným smáčivostí či nesmáčivostí stěn nádoby kapalinou. Pro případ kapiláry s malým vnitřním poloměrem r uvažujeme kulový tvar zakřivené hladiny kapaliny v kapiláře, a tak pro kapilární tlak platí:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}. \quad (23)$$

Označme výškový rozdíl hladin kapaliny v kapiláře a v okolí kapiláry h . Kvůli výškovému rozdílu je tlakový rozdíl roven také rozdílu hydrostatického tlaku, tedy

$$\Delta p = h\Delta\rho g, \quad (24)$$



Obrázek 2.4: Metoda kapilární elevace [7]

kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustoty kapaliny a hustoty okolního plynu a g je velikost tíhového zrychlení. Z rovnosti předchozích dvou rovnic

$$h\Delta\rho g = \frac{2\sigma}{r} \quad (25)$$

již plyne upravený tvar rovnice (14) pro velikost povrchového napětí:

$$\sigma = \frac{1}{2}h\Delta\rho gr. \quad (26)$$

Pro dostatečně tenké kapiláry lze uvažovat aproximaci, při níž se místo vnitřního poloměru použije ve vztahu vnější poloměr kapiláry.

Je nutné dodat, že výše uvedený vztah platí přesně pouze pro ideální stav, kdy kapalina zcela smáčí stěny nádoby. Uvedme tedy také přesnější vztah počítající s nenulovým úhlem ϑ :

$$\sigma = \frac{h\Delta\rho gr}{2 \cos \vartheta}. \quad (27)$$

Pro přesnější výpočty je dále možné provést úpravy, které by braly v úvahu také deformaci hladiny vlivem gravitace, což je nutné především u kapilár větších rozměrů. Pro úplnost uvedme ještě vztah vhodný pro výpočet v případě, že zakřivený povrch v kapiláře není kulový:

$$\sigma = \frac{1}{2}\Delta\rho grh \left(1 + \frac{r}{3h} - 0,1288 \frac{r^2}{h^2} + 0,1312 \frac{r^3}{h^3} \right). \quad (28)$$

Metoda kapilární elevace je běžně považována za jednu z nejpřesnějších, a to i z důvodu poměrně snadného provedení měření. Na druhou stranu je její využití vhodné především pro kapaliny s malou viskozitou. Při měření je nutné dbát na perfektní čistotu kapiláry, ale také na její vhodné rozměry za účelem co nejpřesnějšího měření. [7], [8], [9]

2.6 Stalagmometrická metoda

Metodou využívající rovnováhy mezi tíhovou a kapilární silou je tzv. stalagmometrická metoda neboli metoda vážení kapky. Způsob měření touto metodou spočívá ve zjišťování hmotnosti, resp. objemu určitého počtu kapek měřené kapaliny, které samovolně odkapaly z tenké silnostěnné kapiláry do nádoby. V okamžiku, kdy se kapka odtrhne od kapiláry, je tíhová síla F_G působící na kapku v rovnováze s povrchovou silou F , která kapku drží v kontaktu s kapilárou, tedy platí:

$$mg = 2\pi r\sigma, \text{ resp. } V\Delta\rho g = 2\pi r\sigma, \quad (29)$$

kde m je hmotnost kapky, g je velikost tíhového zrychlení, r je poloměr kapiláry, V je objem kapky a $\Delta\rho$ je hustota kapaliny. Zjistíme-li měřením hmotnost, resp. objem kapky, můžeme z následujícího vztahu vypočítat velikost povrchového napětí.

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}, \text{ resp. } \sigma = \frac{V\Delta\rho g}{2\pi r}. \quad (30)$$

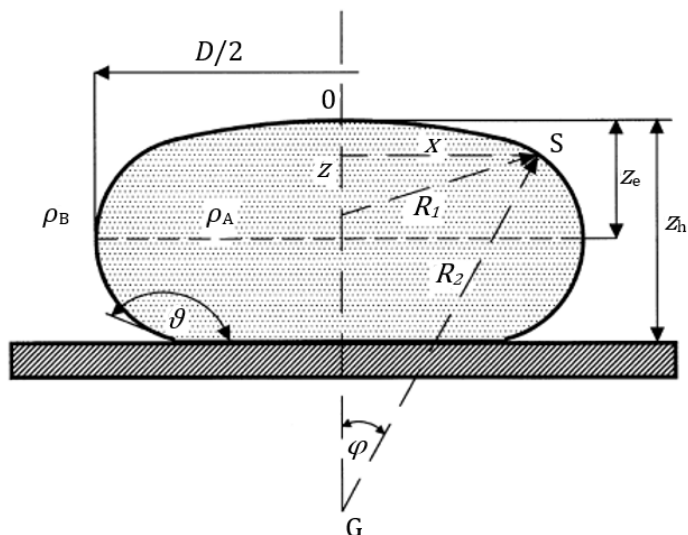
Také u této metody se potýkáme s nutností úpravy původního vztahu, tzv. Tateova zákona, pomocí korekčního činitele f , neboť naměřená hmotnost, resp. naměřený objem odkapané kapaliny je nepatrně menší než teoreticky předpokládaná hmotnost, resp. předpokládaný objem. To je způsobeno především tím, že při vzniku kapky na špičce kapiláry se část jejího objemu neoddělí od kapiláry a zůstane k ní přilnutá. Korekční činitel je funkcí $f\left(\frac{r}{\sqrt[3]{V}}\right)$, kde V je objem kapky a r je poloměr kapiláry. S jeho využitím získá předchozí vztah pro výpočet povrchového napětí nový tvar:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r f} = \frac{V\Delta\rho g}{2\pi r f}. \quad (31)$$

Velikost korekčního činitele lze kromě dohledání v tabulkách získat také výpočtem, a to pomocí následujícího vztahu:

$$f = 0,167 + 0,193\left(\frac{r}{\sqrt[3]{V}}\right) - 0,0489\left(\frac{r}{\sqrt[3]{V}}\right)^2 - 0,0496\left(\frac{r}{\sqrt[3]{V}}\right)^3. \quad (32)$$

Vzhledem k malému objemu jednotlivých kapek je pro vypovídající měření nutné nechat odkapat větší množství kapek. Při měření je také důležité zabránit nežádoucím otřesům měřicí aparatury, kvůli kterým by mohlo dojít k předčasnému oddělení kapky od kapiláry. Kapiláry využívané při této metodě se obvykle vyrábějí ze skla, ale je možné použít i jiné například kovové kapiláry. [7], [8], [9]



Obrázek 2.5: Ilustrace Bashforthovy–Adamsovy rovnice [7]

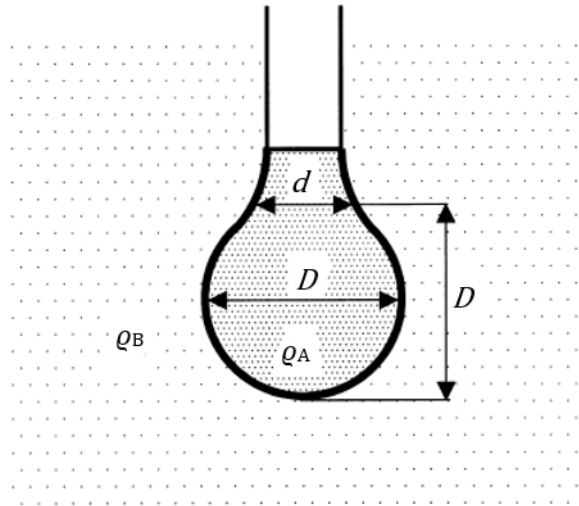
2.7 Metoda visící kapky

Díky existenci povrchového napětí se povrch kapalného tělesa chová jako pružná membrána, která se snaží zaujmout takový tvar, aby povrchová vrstva měla co nejnižší energii, tedy aby těleso mělo co nejmenší povrch. V beztížném prostředí, kde na těleso nepůsobí žádné vnější síly, je takovým tvarem koule, neboť ta má ze všech těles o daném objemu nejmenší povrch. Jestliže ale vložíme kapalně těleso do gravitačního, resp. tíhového pole, kromě povrchové síly na něj bude působit také síla gravitační, resp. tíhová. Tvar tělesa potom závisí na vztahu mezi těmito silami a je obecně popsán tzv. Bashforthovou–Adamsovou rovnicí:

$$\sigma \left(\frac{\sin \varphi}{x} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{2\sigma}{b} + \Delta \rho g z, \quad (33)$$

kde σ je povrchové napětí, $\Delta \rho$ je rozdíl hustoty kapaliny a hustoty okolního prostředí, R_1 je poloměr křivosti, x je poloměr, se kterým rotuje daný bod S povrchu kapky kolem osy z, φ je úhel, který svírá svislá osa kapky s vektorem poloměru křivosti R_2 směřujícím do bodu S, b je poloměr křivosti na vrcholu kapky a g je velikost tíhového zrychlení.

Metoda visící kapky spočívá ve vytvoření visící kapky zkoumané kapaliny na špičce jehly a následném zaznamenání tvaru kapky pomocí kamery či fotoaparátu s dostatečným zvětšením. Na visící kapce jsou změřeny dva parametry, a to tzv. rovníkový průměr D a průměr d ve vzdálenosti D od vrcholu kapky (Obr. 2.6).



Obrázek 2.6: Metoda visící kapky [7]

Povrchové napětí je poté určeno výpočtem pomocí vztahu:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g D^2}{H}, \quad (34)$$

kde H je parametr, který závisí na poměru $S = \frac{d}{D}$ parametrů kapky a je dohledatelný v tabulkách. Uveďme ale také vztah, kterým lze H vypočítat:

$$\frac{1}{H} = \frac{B_4}{S^a} + B_3 S^3 - B_2 S^2 + B_1 S - B_0, \quad (35)$$

kde B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 a a jsou konstanty příslušné danému rozsahu, do kterého spadá hodnota S .

Za účelem změření co nejpřesnější hodnoty povrchového napětí je vyžadována perfektní čistota zkoumané kapaliny i použité jehly. Při měření je nutné dbát na to, aby byla vytvořena kapka pouze na špičce jehly, která nesmáčí vnější stěny jehly. Je vhodné použít jehlu, jejíž průměr je menší než polovina rovinného průměru kapky. [7]

2.8 Metoda přisedlé kapky

Metoda přisedlé kapky je druhou z metod užívajících k určení povrchového napětí kapaliny tvar kapky ovlivněný působením tíhového pole. Princip této metody je podobný jako v předchozí metodě, tentokrát ale pozorujeme kapku, která je přisedlá k podložce. Podložka by měla být z takového materiálu, který kapalina nesmáčí, tedy

velikost krajního úhlu by měla být větší než 90° . Následně se opět pořídí dostatečně detailní snímek vzniklé kapky, který je poté analyzován. V případě velké kapky stačí nalézt rovník kapky a určit vzdálenost rovníku od vrcholu kapky z_e . Naměřená hodnota se dosadí do vztahu pro výpočet povrchového napětí:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho g z_e^2}{2}, \quad (36)$$

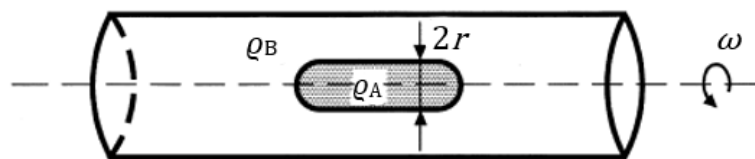
kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustot kapaliny a okolního prostředí a g je velikost tíhového zrychlení. Jestliže posuzovaná kapka není dostatečně velká, využije se k určení povrchového napětí přímo Bashforthova–Adamsova rovnice (33). [7]

2.9 Metoda rotující kapky

Mnohé technologické postupy v průmyslu a dalších odvětvích vyžadují měření povrchového napětí na rozhraní dvou kapalin, které má tak nízké hodnoty, že není možné provést měření metodami uvedenými v předchozím textu. Pro taková měření byla navržena metoda rotující kapky, která je založena na pozorování změny tvaru kapky při její rotaci. Kapka zkoumané kapaliny je suspendována do jiné kapaliny, díky čemuž se zamezí deformaci kapky působením tíhové síly. Vzniklá suspenze je umístěna do horizontální trubice, která je rotována kolem své podélné osy. Při nižších hodnotách úhlové rychlosti utvoří kapka tvar elipsoidu. Je-li úhlová rychlost dostatečně velká, vznikne požadovaný válcovitý tvar kapky. Následně stačí změřit poloměr r vzniklého válce a povrchové napětí lze vypočítat pomocí vztahu:

$$\sigma = \frac{1}{4} r^3 \Delta\rho \omega^2, \quad (37)$$

kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustot obou kapalin a ω je velikost úhlové rychlosti, se kterou trubice rotuje. [7]



Obrázek 2.7: Metoda rotující kapky [7]

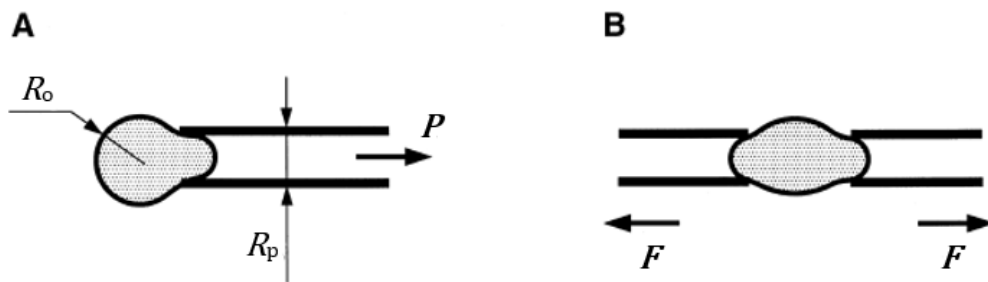
2.10 Metoda s mikropipetou

Bylo prokázáno, že povrchové napětí mikroskopických kapiček se může značně lišit od povrchového napětí makroskopických kapek. V biologii, farmacii či kriminalistice, kde se pracuje s kapalinami především na mikroskopické úrovni, jsou proto klasické metody měření povrchového napětí nevhodné. Vědeckou oblastí, která se touto problematikou zabývá, je mikrotenzometrie. Jednou z metod vhodných pro tato mikroskopická měření je metoda s mikropipetou. Metoda úzce souvisí s tlakovými metodami, které byly zmíněny v předchozím textu. Mikroskopická kapka měřené kapaliny se nabere na špičku mikropipety a následně se nasaje do mikropipety, přičemž se měří minimální tlak, při kterém kapka vytvoří půlkulovitý výběžek do mikropipety (Obr. 2.8 A). Vztah pro povrchové napětí je odvozen z Youngovy–Laplaceovy rovnice (18) a platí:

$$\sigma = \frac{\Delta p}{2\left(\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_o}\right)}, \quad (38)$$

kde Δp je naměřený tlakový rozdíl, R_p je vnitřní poloměr mikropipety a R_o je poloměr části kapky vně mikropipety. Pro správné měření je nutné, aby vnitřní průměr mikropipety byl menší než průměr měřené kapky.

V některých případech, kdy měřená kapalina smáčí stěny mikropipety, nebo dokonce zcela přilne k jejímu povrchu, je tlakový rozdíl potřebný k násátí kapky do mikropipety velký. Proto je vhodnější využít úpravu této metody pro dvě mikropipety. Kapka je nasávána do obou mikropipet současně a přitom na ni působí tzv. oddělovací silou deformující kapku. Při tomto postupu je nutné měřit také oddělovací sílu a povrchové napětí se určí ze vztahu mezi silou a deformací kapky (Obr. 2.8 B). [7]



Obrázek 2.8: Metoda s mikropipetou [7]

Kapitola 3

Praktická část

V předchozí kapitole byl představen výběr nejpoužívanějších metod měření povrchového napětí kapalin. Kromě těch nejnámějších často používaných i ve školních podmínkách kapitola obsahuje i několik dalších metod, které se využívají především k přesnému měření v laboratořích, a to za vhodných podmínek a s požadovaným vybavením.

V rámci praktické části této práce vyzkoušíme přesnost několika vybraných metod a ověříme platnost příslušných vztahů pro výpočet povrchového napětí, které lze provést v našich poněkud omezených podmínkách. Na základě výsledků měření poté určíme vhodnost využití těchto metod při měření laboratorních úloh ve výuce fyziky na střední škole.

Metody, které byly pro praktickou část vybrány, jsou stalagmometrická metoda a Du Noüyova metoda s vahadlem. Způsob měření těmito metodami je inspirovaný experimentální úlohou celostátního kola 65. ročníku fyzikální olympiády ve školním roce 2023/2024. Dále jsou to metoda kapilární elevace a Du Noüyova metoda tentokrát s použitím Du Noüyova přístroje.

3.1 Měření stalagmometrickou metodou

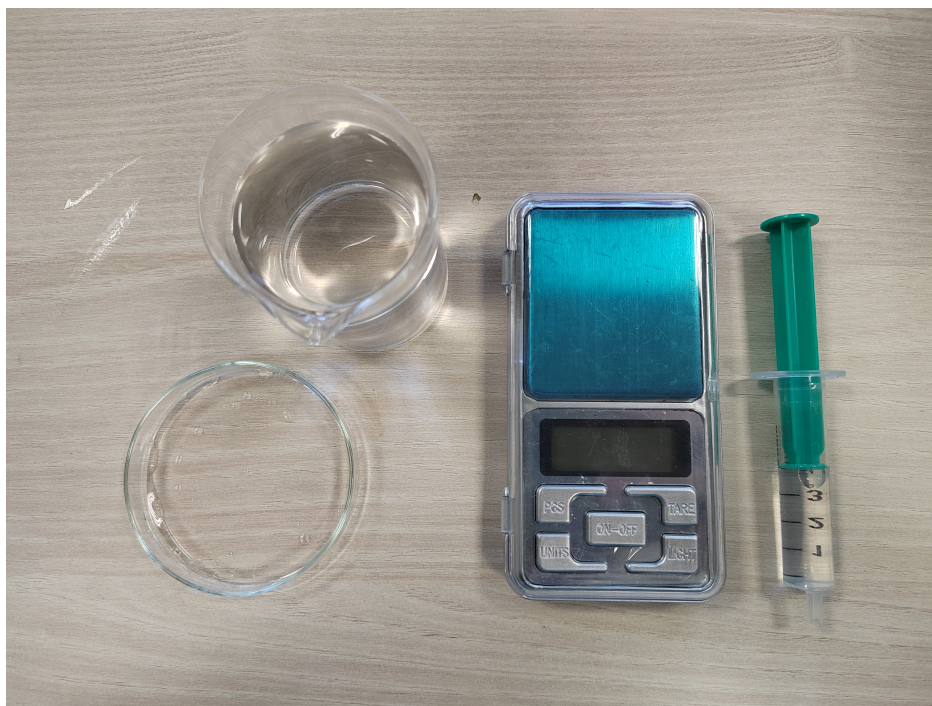
Jako vybavení pro měření stalagmometrickou metodou se v literatuře běžně uvádí aparatura s kapilárou, resp. stalagmometrem, tedy tlustostěnnou kapilárou, která je na dolním konci zabroušená, v prostřední části rozšířená a zpravidla opatřená stupnicí označující objem. Pro měření bez vysokých požadavků na přesnost však není

potřeba žádné pokročilé vybavení. Důkazem toho je zadání experimentální úlohy pro kategorii A celostátního kola 65. ročníku fyzikální olympiády. Pro měření povrchového napětí lze použít pouze obyčejnou plastovou injekční stříkačku s otvorem přiměřeného poloměru. Pomocí injekční stříkačky je totiž možné tvořit kapky měřené kapaliny a odkapat jejich požadované množství.

Podstatou experimentální úlohy fyzikální olympiády nebylo přímé měření veličin potřebných k výpočtu povrchového napětí, nýbrž nepřímé určení povrchového napětí pomocí srovnávací kapaliny. Využita k tomu byla rovnice:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{m_1}{m_2}, \quad (39)$$

kde σ_1 a σ_2 jsou povrchová napětí zkoumané kapaliny a srovnávací kapaliny a m_1 a m_2 jsou hmotnosti kapek těchto kapalin, které byly odkapány z injekční stříkačky. Jako srovnávací kapalina byla použita destilovaná voda. Pomocí injekční stříkačky byl odkapán požadovaný počet kapek a odkapaná kapalina byla zvážena pomocí digitálních vah. To bylo provedeno se srovnávací kapalinou i se zkoumanými kapalinami, kterými byly různě koncentrované roztoky technického lihu, což však soutěžícím nebylo známo. Za předpokladu, že povrchové napětí srovnávací kapaliny je 100 %, byly určeny relativní hodnoty povrchového napětí všech roztoků. [10]



Obrázek 3.1: Pomůcky k měření stalagmometrickou metodou [Foto autora]

V našem měření jsme použili stejné pomůcky jako ve fyzikální olympiádě, tedy plastovou injekční stříkačku, Petriho misku, digitální váhy a navíc také posuvné měřítko pro určení rozměrů ústí injekční stříkačky, neboť jsme velikost povrchového napětí měřili přímo.

Velikost vnitřního průměru ústí použité injekční stříkačky byla určena pomocí posuvného měřítko pětikrát, z čehož plyne průměrná hodnota $d = 3,92 \cdot 10^{-3}$ m. Rovněž pětikrát jsme určili hmotnost jedné kapky destilované vody, a to odkapáním 20 kapek této kapaliny do Petriho misky umístěné na digitálních vahách a následným dělením 20. Průměrná hmotnost je tedy $m = 0,0527 \cdot 10^{-3}$ kg. Přibližná velikost tíhového zrychlení je $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Dosazením do vztahu

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d} \quad (40)$$

jsme získali hodnotu pro povrchové napětí vody $\sigma = 76,19 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. Uvážíme-li tabulkovou hodnotu povrchového napětí $\sigma_{\text{tab}} = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$, je relativní odchylka námi naměřené hodnoty od té tabulkové necelých 5 %.

[11]

3.2 Měření metodou kapilární elevace

Metoda kapilární elevace opět nevyžaduje příliš mnoho pomůcek. K jejímu správnému provedení je ale důležité vybrat vhodnou kapiláru. Z rovnice (26) plyne, že výška kapaliny v kapiláře je nepřímo úměrná poloměru kapiláry, přičemž konstantou úměrnosti je povrchové napětí. Je tedy nutné si uvědomit, že pro získání výšky v kapiláře, kterou lze snadno změřit, musí být kapilára co nejtěsnější. Aby měření nebylo zatíženo příliš velkou chybou, nesmí být kapilára nijak zakřivena a její průřez musí být co nejideálnější kruhem. Samozřejmostí je maximální čistota použité kapiláry.

[9]

Princip metody jsme opět ověřili s destilovanou vodou. Pro naše měření jsme zvolili skleněnou kapiláru. Vnitřní průměr tenkých kapilár lze jen obtížně změřit přímo např. pomocí posuvného měřítko. Využili jsme proto špendlík vhodné tloušťky, který se přesně vejde do kapiláry, a určili jsme jeho tloušťku pomocí mikrometru. Tloušťku špendlíku jsme změřili pětikrát, z čehož plyne průměrná hodnota vnitřního průměru kapiláry $d = 1,31 \cdot 10^{-3}$ m. Po určení rozměru kapiláry jsme přistoupili k samotné



Obrázek 3.2: Pomůcky k měření metodou kapilární elevace [Foto autora]

metodě kapilární elevace. Opět pětkrát jsme určili výšku, do které kapalina v kapiláře vystoupila, a to tak, že jsme vždy kapiláru ponořili do kádinky s kapalinou a po ustálení hladiny jsme změřili sloupec kapaliny pomocí posuvného měřítka. Pro snadnější měření jsme naplnili kádinku kapalinou až po okraj. Další variantou je sestavení aparatury s pevně umístěným měřítkem, pomocí nějž lze rozdíl výšek odečítat. Z měření plyne průměrná hodnota výšky $h = 24,3 \cdot 10^{-3}$ m. S použitím hodnoty $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ pro velikost tíhového zrychlení a hodnoty $\rho = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pro hustotu vody získáme po dosazení do vztahu

$$\sigma = \frac{1}{4} h \rho g d \quad (41)$$

hodnotu pro povrchové napětí vody $\sigma = 77,48 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. Uvážíme-li tabulkovou hodnotu povrchového napětí uvedenou výše, potom je relativní odchylka měření nepatrně vyšší než 6 %.

3.3 Měření du Noüyovou metodou

Poslední metodou vybranou k měření v praktické části této práce je du Noüyova metoda. Ta na rozdíl od předchozích dvou metod vyžaduje složitější vybavení. Zá-

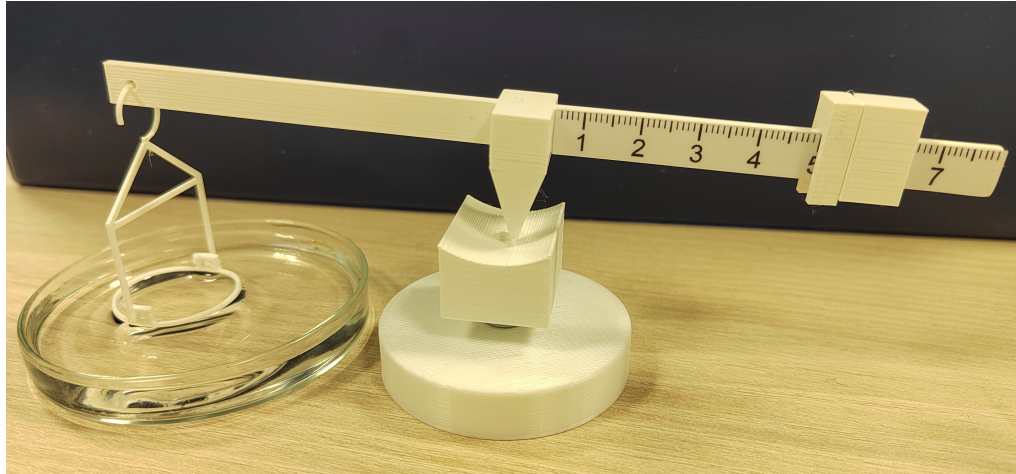
kladem je du Noüyův prsteneček, tedy kroužek z tenkého drátu. V literatuře se obvykle uvádí, že by měl prsteneček být vyroben z platiny či slitiny platiny a iridia. Kroužek by měl být také dokonale kruhový bez výraznějších zakřivení, která by způsobila nepřesné výsledky měření. Druhou klíčovou pomůckou je přístroj, kterým lze určovat sílu, jakou je nutné odtrhnout kroužek z povrchu kapaliny. Jelikož je měřená síla velice malá, musí být přístroj dostatečně citlivý. Využívá se proto například takový přístroj, který při měření síly využívá torzi vláken. [7], [12]

Jednodušší pomůcka pro měření du Noüyovou metodou byla použita v již zmíněné experimentální úloze pro kategorii A celostátního kola 65. ročníku fyzikální olympiády. Pro tuto úlohu bylo navrženo a na 3D tiskárně vytisknuto plastové vahadlo. Při tisku byl využit materiál PLA, tedy kyselina polymléčná. Na jedné straně vahadla se zavěšuje závěs s du Noüyovým prstencem, který byl v tomto případě také vyroben na 3D tiskárně, a je tedy také z PLA. Opačná strana vahadla je opatřena milimetrovým měřítkem. Na toto rameno se při měření umísťují závaží. Celé vahadlo stojí na stojánku, jehož výšku lze upravovat.

Podstatou této části úlohy fyzikální olympiády bylo přímé měření veličin potřebných k výpočtu povrchového napětí destilované vody. Díky tomu potom bylo možné dopočítat hodnoty povrchového napětí kapalin z předchozí části úlohy se stalagmo-



Obrázek 3.3: Pomůcky k měření du Noüyovou metodou [Foto autora]



Obrázek 3.4: Vahadlo pro měření σ Noüyovou metodou [Foto autora]

metrickou metodou, kde byla destilovaná voda srovnávací kapalinou. Po vhodném nastavení výšky vahadla byl σ Noüyův prstenec zavěšený na levé straně vahadla ponořen do kapaliny v Petriho misce. Na pravou stranu vahadla byla umístěna dvě závaží o hmotnostech m_1 a m_2 . Cílem bylo určit pro různé polohy obou závaží sílu, která oddělí prstenec od hladiny kapaliny. Pro tuto sílu můžeme z momentové věty psát:

$$F = \frac{m_1 g r_1 + m_2 g r_2}{r}, \quad (42)$$

kde r_1 je vzdálenost závaží m_1 od osy otáčení vahadla, r_2 je vzdálenost závaží m_2 od osy otáčení a r je vzdálenost závěsu σ Noüyova prstence od osy otáčení. Takto určenou sílu bylo možné dosadit do vztahu pro povrchové napětí:

$$\sigma = \frac{F}{2\pi d}, \quad (43)$$

kde d je průměr σ Noüyova prstence. [10]

V našem měření jsme postupovali téměř stejným způsobem. Nejprve jsme pětkrát určili hmotnost obou závaží, z čehož plynou průměrné hodnoty hmotností $m_1 = 1,02 \cdot 10^{-3}$ kg a $m_2 = 0,506 \cdot 10^{-3}$ kg. Pro tato závaží jsme určili pět dvojic různých poloh a pro každou dvojici jsme vypočítali sílu podle rovnice (42), přičemž velikost tíhového zrychlení je $g = 9,81$ m \cdot s $^{-2}$ a vzdálenost závěsu σ Noüyova prstence od osy otáčení je $r = 75,0 \cdot 10^{-3}$ m. Z pěti hodnot velikostí této síly plyne průměrná hodnota $F = 13,0 \cdot 10^{-3}$ N. Průměr použitého σ Noüyova prstence je $d = 25,0 \cdot 10^{-3}$ m. Dosazením do vztahu pro povrchové napětí získáme hodnotu povrchového napětí destilované vody $\sigma = 82,66$ N \cdot m $^{-1}$. U této hodnoty povrchového

napětí je patrná mnohem vyšší odchylka než u předchozích měření. Vzniklá nepřesnost byla patrně způsobena špatnou manipulací s vahadlem, které je velice přesně vyváženo, a tak jakýkoliv nežádoucí pohyb může pokazit měření.

Du Noüyovu metodu jsme ověřili ještě druhým způsobem, a to s použitím du Noüyova přístroje. Přístroj disponuje ramenem, na které se zavěšuje du Noüyův prstenec, a půlkruhovou stupnicí s ukazatelem, který ukazuje počet dílků stupnice příslušející hmotnosti, resp. tíze zavěšeného závaží. Před samotným měřením je nutné tento přístroj zkalibrovat, a přiřadit tak dílkům na stupnici určité hodnoty hmotnosti. Na rameno přístroje se zavěsí miska a na konci ramena se pootočí závažím tak, aby rameno bylo ve vodorovné poloze, přitom ukazatel na stupnici musí být na hodnotě 0. Postupně se na misku pokládají zlomková závaží a pro každou hmotnost se pootočí ukazatelem na stupnici tak, aby rameno bylo ve vodorovné poloze, a odečte se počet dílků ze stupnice. Z takto získaných hodnot se sestrojí tzv. kalibrační křivka, tedy graf závislosti hmotnosti na počtu dílků stupnice. Po zkalibrování se na rameno přístroje místo misky se závažími zavěsí du Noüyův prstenec. Na stojánek pod prstencem se umístí Petriho miska tak, aby bylo rameno po ponoření prstence



Obrázek 3.5: Du Noüyův přístroj [Foto autora]

do kapaliny ve vodorovné poloze. Poté se otáčí ukazatelem na stupnici, dokud se prstenec neoddělí od povrchu kapaliny. V daném okamžiku se odečte počet dílků na stupnici a pomocí kalibrační křivky se určí hmotnost m . Dosazením do vztahu

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi d}, \quad (44)$$

kde d je průměr prstence, se vypočítá velikost povrchového napětí měřené kapaliny. [12]

Při našem měření du Noüyovým přístrojem jsme získali kalibrační křivku, jejíž rovnice je $m = 0,0122n$, kde m je hmotnost a n je počet dílků stupnice. Pětkrát jsme změřili průměr kovového du Noüyova prstence a průměrná hodnota je $d = 32,8 \cdot 10^{-3}$ m. Rovněž pětkrát jsme provedli měření na přístroji a získali jsme průměrnou hodnotu hmotnosti $m = 1,52 \cdot 10^{-3}$ kg. Výpočtem získáme velikost povrchového napětí vody $\sigma = 72,16 \cdot 10^{-3}$ N \cdot m⁻¹. Relativní odchylka této hodnoty od tabulkové hodnoty je 0,8 %. Díky předchozímu měření du Noüyovou metodou s plastovým vahadlem jsme mohli plastový prstenec vyzkoušet i na du Noüyově přístroji. Průměr prstence je $d = 25,0 \cdot 10^{-3}$ m. Z pěti měření na přístroji plyne průměrná hodnota hmotnosti $m = 1,15 \cdot 10^{-3}$ kg. Po dosazení do vztahu jsme získali velikost povrchového napětí $\sigma = 71,62 \cdot 10^{-3}$ N \cdot m⁻¹. Relativní odchylka hodnoty získané při měření s plastovým prstencem je 1,6 %. Z těchto výsledků plyne, že měření s prstenci z kovu i z PLA jsou podobně přesná. Podařilo se nám tedy mimo jiné dokázat, že lze k měření du Noüyovou metodou klidně používat i plastový prstenec.

Kapitola 4

Návrh laboratorních úloh pro výuku fyziky na střední škole

V praktické části byly ověřeny tři vybrané metody měření povrchového napětí kapalin. Pro všechny tři metody jsme při měření s destilovanou vodou získali uspokojivé výsledky, které i přes množství nedokonalostí v použitých pomůckách nejsou příliš vzdálené od tabulkových hodnot povrchového napětí.

Na základě zkušeností z praktické části proto na závěr této práce uvádím dva návrhy laboratorních úloh pro výuku fyziky na střední škole, které mohou sloužit pouze jako inspirace či jako kompletní zadání pro měření. Do těchto návrhů byly vybrány stalagmometrická metoda a metoda kapilární elevace. Důvod, proč mezi tato návrhy nezařazuji také du Noüyovu metodu, jejíž dvě varianty byly rovněž vyzkoušeny v praktické části, je prostý. Navzdory poměrně snadnému postupu v obou variantách měření touto metodou nelze předpokládat, že v materiálním vybavení kabinetů fyziky běžně nalezneme du Noüyův přístroj, a když je ve škole k dispozici, tak pouze jeden, který dostatečně neposlouží k měření početnější skupiny žáků. Stejně tak je vlastnictví 3D tiskárny, která je potřebná k výrobě vahadla pro druhou variantu du Noüyovy metody, výsadou pouze některých středních škol.

První laboratorní úloha, jejíž zadání je v Příloze A, se skládá ze dvou částí. V první části by si měl žák na jednoduchém pokusu s mincí uvědomit povrchové napětí jako jev, se kterým se běžně v životě setkává. Závěrem tohoto pokusu je ověření, že čím větší povrchové napětí kapalina má, tím větší je povrchová síla, která dokáže udržet pohromadě větší množství kapaliny. V průběhu pokusu si žák také může po-

všimnout rozdílné velikosti kapek obou kapalin. Pro ještě větší názornost je možné použít místo oleje také technický líh, který má menší povrchové napětí než olej. Ve druhé části žák praktikuje samotnou metodu měření povrchového napětí, kterou je stalagmometrická, neboli kapková metoda. Úloha využívá variantu měření s plastovou injekční stříkačkou, s níž se snadno manipuluje, a tak není třeba předem chystat složitější měřicí aparaturu. Při určování hmotnosti odkapaných kapek do Petriho misky si možná pozorný žák všimne, že si lze práci ulehčit použitím tlačítka TARE, díky čemuž může na digitálních vahách určovat přímo hmotnost kapek a nemusí nic odečítat. To samozřejmě platí pouze pro váhy, které tímto tlačítkem disponují. Zadání laboratorní úlohy obsahuje stručný výčet úkolů, které má žák splnit, seznam potřebných pomůcek, základy teoretických poznatků potřebných pro tuto úlohu. Následují postup měření sepsaný krok za krokem tak, aby žák mohl pracovat samostatně bez neustálého dohledu učitele, tabulky pro zápis výsledků měření a závěr, který je připraven formou souvislého textu s vynechanými místy pro doplnění žákových pozorování a výsledků měření.

Druhá laboratorní úloha, jejíž zadání je v Příloze B, se skládá také ze dvou částí. V první části by měl tentokrát žák ověřit platnost definičního vztahu povrchového napětí, tedy že velikost povrchového napětí je přímo úměrná velikosti povrchové síly kapaliny. Jako ověření poslouží jednoduchý pokus s párátkem plovoucím na hladině vody, které se po přidání mycího prostředku pohybuje na stranu. Pro žáky atraktivnější může být pokus s pepřem na hladině, který se po přidání mycího prostředku přitiskne k okrajům nádoby. Ve druhé části se žák seznámí s metodou měření povrchového napětí, kterou je tentokrát metoda kapilární elevace. Klíčovou pomůckou v této úloze je skleněná kapilára, která je cenově dostupná a případně ji lze do vybavení školy doplnit. Kompozice druhé úlohy je stejná jako v první úloze. Do závěru žák opět doplňuje výsledky pozorování z úvodního pokusu a výsledky měření metodou kapilární elevace.

Obě přílohy s návrhy laboratorních úloh obsahují kromě zadání těchto úloh také vzorová řešení s možnými výsledky měření.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat přehled metod měření povrchového napětí kapalin. Tento cíl se mi podařilo splnit, a to především v druhé teoretické kapitole práce. Díky měřením v rámci praktické části jsem mohl naplnit také druhou část vytyčeného cíle, a to výběr metod vhodných pro výuku fyziky na střední škole.

V první kapitole se práce věnuje teoretickým poznatkům o kapalinách, a to popisu kapaliny jako skupenství, přehledu mechanických vlastností kapalin a především molekulárním vlastnostem včetně vysvětlení povrchového napětí. Druhá teoretická kapitola představuje stručný přehled různých metod měření povrchového napětí. Každá metoda je popsána včetně průběhu měření i příslušného vztahu pro výpočet povrchového napětí. Stručně jsou zmíněny také výhody či nevýhody použití jednotlivých metod.

Na teoretickou část navazuje praktická část, v níž jsem ověřil princip měření tří metod, kterými byly stalagmometrická metoda, metoda kapilární elevace a du Noüyova metoda. Z výsledků měření plyne, že všechny tři metody lze uspokojivě realizovat ve školních podmínkách i s ne zcela dokonalým vybavením. Pro běžnou výuku fyziky na střední škole jsem však kvůli větším nárokům du Noüyovy metody na pomůcky vybral pouze stalagmometrickou metodu a metodu kapilární elevace, pro které jsem ve čtvrté kapitole práce navrhnul zadání laboratorních úloh. Laboratorní úlohy mohou posloužit jako rozšíření experimentální stránky výuky fyziky. Úlohy jsou koncipovány tak, aby je žáci dokázali vypracovat samostatně bez nutné asistence vyučujícího, čímž plně podporují aktivní účast žáků ve výuce.

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Jevy na rozhraní kapaliny a pevné látky [6] | 18 |
| 1.2 | Kapilární jevy [6] | 18 |
| 2.1 | Wilhelmyho metoda [7] | 21 |
| 2.2 | Du Noüyova metoda [7] | 22 |
| 2.3 | Metoda maximálního přetlaku v bublině [7] | 24 |
| 2.4 | Metoda kapilární elevace [7] | 26 |
| 2.5 | Ilustrace Bashforthovy–Adamsovy rovnice [7] | 28 |
| 2.6 | Metoda visící kapky [7] | 29 |
| 2.7 | Metoda rotující kapky [7] | 30 |
| 2.8 | Metoda s mikropipetou [7] | 31 |
| 3.1 | Pomůcky k měření stalagmometrickou metodou [Foto autora] | 33 |
| 3.2 | Pomůcky k měření metodou kapilární elevace [Foto autora] | 35 |
| 3.3 | Pomůcky k měření du Noüyovou metodou [Foto autora] | 36 |
| 3.4 | Vahadlo pro měření du Noüyovou metodou [Foto autora] | 37 |
| 3.5 | Du Noüyův přístroj [Foto autora] | 38 |

Seznam použitých zdrojů

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír, a kolektiv. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-233-87.
- [2] VYBÍRAL, Bohumil. *Základy teoretické mechaniky*. Hradec Králové: Gaudeamus, 1999. ISBN 80-7041-315-8.
- [3] CHYTILOVÁ, Marta. *Znáte Archimédův zákon?*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1986.
- [4] VYBÍRAL, Bohumil. *Mechanika ideálních kapalin: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. Hradec Králové: Vydavatelství MAFY, 2003. [cit. 22. 10. 2023]. Dostupné z: <<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/kapaliny.pdf>>
- [5] MECHLOVÁ, Erika. *Molekulová fyzika 1: Molekulové jevy v kapalinách* [online]. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2004. [cit. 26. 10. 2023]. ISBN 80-7042-989-5. Dostupné z: <<http://artemis.osu.cz/molfs/MOLFS1.pdf>>
- [6] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 7. 3. 2024]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/>>
- [7] DRELICH, J., Ch. Fang, C. L. White. *Measurement of Interfacial Tension in Fluid-Fluid Systems*. In: P. Somasundaran, Encyclopedia of Surface and Colloid Science, 2nd edition. New York: Taylor & Francis, 2006, 3152–3166. ISBN 9780849396151.
- [8] THIESSEN, David B., Kin F. Man. *Surface Tension Measurement* In: Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press, 1999, 31-1–13. ISBN 0-8493-2145-X.

- [9] ADAMSON, Arthur W., Alice P. Gast. *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th edition. John Wiley & Sons, Inc., 1997. ISBN 978-0-471-14873-9.
- [10] ŠLÉGR, Jan. *Experimentální úloha celostátního kola 65. ročníku FO kategorie A*. Hradec Králové: 2024.
- [11] MIKULČÁK, Jiří, a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce*. Praha: Prometheus, 2023. ISBN 978-80-7196-560-2.
- [12] JEZBERA, Daniel. *Fyzikální praktikum I. – Úloha č. 5* [online]. Hradec Králové: 2021. [cit. 23. 4. 2024]. Dostupné z: <<https://lide.uhk.cz/prf/ucitel/jezbeda1/fyzprakt1.html>>

Příloha A

Zadání první laboratorní úlohy

Měření povrchového napětí vody kapkovou metodou

Úkol:

1. Ověřte vlastnosti povrchového napětí kapaliny.
2. S využitím kapkové metody určete velikost povrchového napětí vody.

Pomůcky: voda, olej, korunová mince, 2 kapátka, destilovaná voda, kádinka, Petriho miska, plastová injekční stříkačka, digitální váhy, posuvné měřítko

Teorie:

Molekuly každé kapaliny na sebe vzájemně přitažlivě silově působí. U molekul uvnitř kapaliny se tyto síly vyruší, neboť působí na každou molekulu ze všech stran stejně. Když se ale dostane molekula na okraj kapaliny, například na hladinu, působí na ni ostatní molekuly kapaliny jen z jedné strany, a tak je molekula přitahována dovnitř kapaliny. Molekuly na povrchu kapaliny díky tomu tvoří tzv. povrchovou vrstvu kapaliny, která se chová jako pružná blána.

Povrchové napětí σ definujeme jako podíl velikosti povrchové síly F a délky okraje povrchu l , na nějž tato síla působí kolmo v rovině povrchu kapaliny, tedy

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Jednou z metod, jak určit velikost povrchového napětí kapaliny, je tzv. stalagmometrická metoda, která se častěji označuje jako kapková metoda. Metoda spočívá ve zjišťování hmotnosti m kapky dané kapaliny, která odkápne z kapiláry. V okamžiku odtržení kapky od kapiláry je tíhová síla působící na kapku v rovnováze s povrchovou silou, která kapku přitahuje ke kapiláře. S využitím předchozího vztahu tedy můžeme psát:

$$F = F_G \iff \sigma l = mg.$$

Kapilára má poloměr r a je kruhového průřezu, takže $l = 2\pi r$. Pro povrchové napětí kapaliny tedy platí:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r} = \frac{mg}{\pi d}.$$

Postup měření:

1. Vlastnosti povrchového napětí kapaliny:
 - (a) Do kapátka naberte vodu.
 - (b) Na korunovou minci postupně kapejte vodu z kapátka tak, aby na minci vznikala jedna větší kapka.
 - (c) Spočítejte, kolik kapek vody se vejde na minci, než kapka přeteče z okraje mince.
 - (d) Nyní do druhého kapátka naberte olej a proveďte stejný postup jako s vodou.
 - (e) Výsledky svého pozorování doplňte do závěru.
2. Měření povrchového napětí vody kapkovou metodou:
 - (a) Nejprve pomocí posuvného měřítka změřte pětkrát vnitřní průměr d ústí injekční stříkačky. Naměřené průměry zapisujte do připravené tabulky.
 - (b) Určete hmotnost m_{pr} prázdné Petriho misky pomocí digitálních vah. Hmotnost misky si poznamenejte. (Ujistěte se před vážením, že je miska dokonale suchá a čistá, případně ji vytřete dobře savým ubrouskem.)
 - (c) Naberte do injekční stříkačky dostatečné množství destilované vody z kádinky.
 - (d) Do předem zvážené Petriho misky odkapejte z injekční stříkačky 30 kapek vody. (Je vhodné nejprve vyzkoušet, jakou silou je třeba stlačovat stříkačku, aby kapky vznikaly, a odkapat několik zkušebních kapek zpět do kádinky.)
 - (e) Po odkapání určete hmotnost m_{pl} Petriho misky i s 30 kapkami vody. Hmotnost si poznamenejte do připravené tabulky.
 - (f) Vodu z Petriho misky vylijte (zpět do kádinky) a Petriho misku dobře vysušte.
 - (g) Stejným způsobem odkapejte 30 kapek a určete jejich hmotnost alespoň pětkrát.

- (h) Odečtením hmotnosti m_{pr} prázdné misky od hmotnosti m_{pl} misky s kapkami určete (pro každé měření) hmotnost m_{30} 30 kapek. Dále vydělením této hmotnosti 30 určete hmotnost m jedné kapky. Hodnoty doplňte do tabulky.
- (i) Určete průměrné hodnoty průměru d ústí stříkačky a hmotnosti m jedné kapky vody.
- (j) Vypočítejte pomocí průměrných hodnot velikost povrchového napětí σ vody a porovnejte ji s tabulkovou hodnotou $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.
- (k) Svoje výsledky doplňte do závěru.

Výsledky měření:

| č. m. | d [mm] | č. m. | m_{pr} [g] | m_{pl} [g] | m_{30} [g] | m [g] |
|-------|----------|-------|---------------------|---------------------|--------------|---------|
| 1 | | 1 | | | | |
| 2 | | 2 | | | | |
| 3 | | 3 | | | | |
| 4 | | 4 | | | | |
| 5 | | 5 | | | | |

| | |
|-------------|----|
| $\bar{d} =$ | mm |
| $\bar{m} =$ | g |

Závěr:

Povrchové napětí patří mezi nejdůležitější veličiny popisující chování kapalin. Díky povrchovému napětí lze nad okrajem nádoby s kapalinou vytvořit vrchlík z kapaliny, aniž by kapalina přetekla. Podobný jev jsme pozorovali na pokusu s mincí. Na minci se povedlo nakapat kapek vody, než voda přetekla, zatímco u oleje jsme napočítali kapek. To, že se na minci udrží kapka vody než oleje, je způsobeno tím, že má olej velikost povrchového napětí než voda.

Velikost povrchového napětí lze zjistit kapkovou metodou. V našem měření jsme určili, že velikost povrchového napětí vody je , což se od tabulkové hodnoty liší o .

Příklad řešení první laboratorní úlohy

Výsledky měření:

| č. m. | d [mm] | č. m. | m_{pr} [g] | m_{pl} [g] | m_{30} [g] | m [g] |
|-------|----------|-------|---------------------|---------------------|--------------|---------|
| 1 | 2,2 | 1 | 14,30 | 15,88 | 1,58 | 0,053 |
| 2 | 2,1 | 2 | 14,30 | 15,86 | 1,56 | 0,052 |
| 3 | 2,2 | 3 | 14,30 | 15,93 | 1,63 | 0,054 |
| 4 | 2,2 | 4 | 14,30 | 15,85 | 1,55 | 0,050 |
| 5 | 2,1 | 5 | 14,30 | 15,80 | 1,50 | 0,052 |

$$\bar{d} \doteq 2,16 \text{ mm}$$

$$\bar{m} \doteq 0,0521 \text{ g}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{mg}{\pi d} \\ \sigma &= \frac{0,0521 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\pi \cdot 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \\ \sigma &= \underline{\underline{75,32 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}}}.\end{aligned}$$

Závěr:

Povrchové napětí patří mezi nejdůležitější veličiny popisující chování kapalin. Díky povrchovému napětí lze nad okrajem nádoby s kapalinou vytvořit vrchlík z kapaliny, aniž by kapalina přetekla. Podobný jev jsme pozorovali na pokusu s mincí. Na minci se povedlo nakapat 40 kapek vody, než voda přetekla, zatímco u oleje jsme napočítali 34 kapek. To, že se na minci udrží větší kapka vody než oleje, je způsobeno tím, že má olej menší velikost povrchového napětí než voda.

Velikost povrchového napětí lze zjistit kapkovou metodou. V našem měření jsme určili, že velikost povrchového napětí vody je $\sigma = 75,32 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, což se od tabulkové hodnoty liší o $2,57 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Příloha B

Zadání druhé laboratorní úlohy

Měření povrchového napětí vody metodou kapilární elevace

Úkol:

1. Ověřte vlastnosti povrchového napětí kapaliny.
2. S využitím metody kapilární elevace určete velikost povrchového napětí vody.

Pomůcky: voda, mísa či hlubší talíř, párátko, pepř, mycí prostředek, destilovaná voda, kádinka, skleněná kapilára, plastové pravítko, mikrometr, sada špendlíků či jehel

Teorie:

Molekuly každé kapaliny na sebe vzájemně přitažlivě silově působí. U molekul uvnitř kapaliny se tyto síly vyruší, neboť působí na každou molekulu ze všech stran stejně. Když se ale dostane molekula na okraj kapaliny, například na hladinu, působí na ni ostatní molekuly kapaliny jen z jedné strany, a tak je molekula přitahována dovnitř kapaliny. Molekuly na povrchu kapaliny díky tomu tvoří tzv. povrchovou vrstvu kapaliny, která se chová jako pružná blána.

Povrchové napětí σ definujeme jako podíl velikosti povrchové síly F a délky okraje povrchu l , na nějž tato síla působí kolmo v rovině povrchu kapaliny, tedy

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Mezi metody, kterými lze povrchové napětí určit, patří tzv. metoda kapilární elevace (vzlínání). Metoda spočívá ve zjišťování výšky, do které vystoupá kapalina v kapiláře daného vnitřního poloměru r . Výškový rozdíl oproti výšce hladiny v okolí kapiláry je způsoben vznikem přídavného kapilárního tlaku pod zakřiveným povrchem kapaliny

v kapiláře, jehož velikost je

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}.$$

Současne díky výškovému rozdílu Δh pro hydrostatický tlak platí:

$$\Delta p = \Delta h \rho g,$$

kde ρ je hustota kapaliny a g je velikost tíhového zrychlení. Z rovnosti předchozích dvou vztahů můžeme odvodit vztah pro výpočet povrchového napětí:

$$\Delta h \rho g = \frac{2\sigma}{r} \quad \implies \quad \sigma = \frac{1}{2} \Delta h \rho g r = \frac{1}{4} \Delta h \rho g d.$$

Postup měření:

1. Vlastnosti povrchového napětí kapaliny:
 - (a) Připravenou mísu naplňte vodou do výšky alespoň 2 cm.
 - (b) Na hladinu opatrně položte párátko.
 - (c) Na jednu stranu vedle párátko kápněte do vody mycí prostředek a pozorujte, co se stane s párátkem.
 - (d) Mísu vyprázdněte, opláchněte od mycího prostředku a znovu naplňte vodou.
 - (e) Poprašte hladinu vody pepřem.
 - (f) Doprostřed hladiny kápněte mycí prostředek a pozorujte, co se stane s pepřem.
 - (g) Výsledky svého pozorování doplňte do závěru.
2. Měření povrchového napětí vody metodou kapilární elevace:
 - (a) Nejprve určete vnitřní průměr kapiláry. Vyberte vhodný špendlík, který co nejlépe vyplňuje trubici kapiláry. Poté pětkrát změřte průměr d špendlíku. Naměřené průměry zapisujte do připravené tabulky.
 - (b) Do kádinky s destilovanou vodou vložte plastové pravítko až na dno, opřete ho o stěnu kádinky do svislé polohy.
 - (c) Nyní vložte do kádinky vedle stupnice pravítka kapiláru, vyčkejte až se ustálí výška hladiny v kapiláře a určete výšku h_1 hladiny v kádince a výšku h_2 hladiny vody v kapiláře.
 - (d) Stejně měření proveďte pětkrát. (Pokaždé se ujistěte, že v kapiláře po vložení do vody nejsou bublinky, případně kapiláru profoukněte.) Naměřené hodnoty zapisujte do připravené tabulky.

- (e) Z pěti naměřených dvojic výšek určete výškový rozdíl $\Delta h = h_2 - h_1$.
Hodnoty doplňte do tabulky.
- (f) Určete průměrné hodnoty d vnitřního průměru kapiláry a Δh výškového rozdílu.
- (g) Vypočítejte pomocí průměrných hodnot velikost povrchového napětí σ vody a porovnejte ji s tabulkovou hodnotou $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.
- (h) Svoje výsledky doplňte do závěru.

Výsledky měření:

| č. m. | d [mm] | č. m. | h_1 [mm] | h_2 [mm] | Δh [mm] |
|-------|----------|-------|------------|------------|-----------------|
| 1 | | 1 | | | |
| 2 | | 2 | | | |
| 3 | | 3 | | | |
| 4 | | 4 | | | |
| 5 | | 5 | | | |

| | |
|-------------------------|----|
| $\bar{d} =$ | mm |
| $\overline{\Delta h} =$ | mm |

Závěr:

Povrchové napětí patří mezi nejdůležitější veličiny popisující chování kapalin. Velikost povrchového napětí je úměrná velikosti povrchové síly, která působí na okraj povrchu kapaliny. To jsme ověřili na pokusu s párátkem. Když položíme párátko na hladinu vody, párátko se téměř , protože na něj působí z obou stran síly. Když ale pomocí mycího prostředku velikost povrchového napětí na jedné straně párátko, párátko , protože na něj ze strany od mycího prostředku působí povrchová síla. Podobně se také pepř .

Velikost povrchového napětí lze zjistit metodou kapilární elevace. V našem měření jsme určili, že velikost povrchového napětí vody je , což se od tabulkové hodnoty liší o .

Příklad řešení druhé laboratorní úlohy

Výsledky měření:

| č. m. | d [mm] | č. m. | h_1 [mm] | h_2 [mm] | Δh [mm] |
|-------|----------|-------|------------|------------|-----------------|
| 1 | 1,305 | 1 | 82 | 104 | 22 |
| 2 | 1,301 | 2 | 82 | 110 | 28 |
| 3 | 1,302 | 3 | 81 | 110 | 29 |
| 4 | 1,306 | 4 | 80 | 100 | 20 |
| 5 | 1,302 | 5 | 80 | 104 | 24 |

| |
|---|
| $\bar{d} = 1,303 \text{ mm}$ |
| $\overline{\Delta h} = 24,6 \text{ mm}$ |

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{4} \Delta h \rho g d \\ \sigma &= \frac{1}{4} \cdot 24,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1,303 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \sigma &= \underline{\underline{78,39 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}}}.\end{aligned}$$

Závěr:

Povrchové napětí patří mezi nejdůležitější veličiny popisující chování kapalin. Velikost povrchového napětí je přímo úměrná velikosti povrchové síly, která působí na okraj povrchu kapaliny. To jsme ověřili na pokusu s párátkem. Když položíme párátko na hladinu vody, párátko se téměř nepohybuje, protože na něj působí z obou stran stejně velké síly. Když ale pomocí mycího prostředku snížíme velikost povrchového napětí na jedné straně párátko, párátko uteče pryč od mycího prostředku, protože na něj ze strany od mycího prostředku působí menší povrchová síla. Podobně se také pepř rozuteče ke stěnám mísy.

Velikost povrchového napětí lze zjistit metodou kapilární elevace. V našem měření jsme určili, že velikost povrchového napětí vody je $\sigma = 78,39 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, což se od tabulkové hodnoty liší o $5,64 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.