

5. MOLEKULINĖ FIZIKA

5.1. Skysčių klampumas

- Skysčiai. Jų fizinės savybės.
 - Skysčių tekėjimas siaurais vamzdžiais.
 - Bernulio lygtis.
 - Puazeilio ir Hageno dėsnis.
 - Dinaminė ir kinematinė klampumas. Jų matavimo vienetai.
 - Klampomačiai (viskozimetrai).
-

5.1.1. Įvadas

Kiekviena gyvojo organizmo ląstelė yra nepaprastai sudėtinga sistema, galinti normaliai veikti tikrai pastoviomis sąlygomis. Ląstelių aplinką sudaro vadinamasis tarpląstelinis, audinių, skystis. Palaikyti šio skysčio fizinių savybių ir cheminės sudėties pastovumą yra svarbiausia sąlyga, leidžianti atskiroms ląstelėms ir visam organizmui normaliai funkcionuoti. Tai nepaprastai sudėtinga, kadangi gyvieji organizmai nuolat taikosi prie kintančios aplinkos. K. Bernaras (*C. Bernard*) organizmo skysčius (tarpląstelinį skystį, smegenų skystį, limfą, kraują) pavadino *vidine terpe*.

Organizmo vidinės terpės pagrindą sudaro vanduo. Daug jo ir visame organizme. Be to, įvairios medžiagos patenka į organizmą kaip vandeniniai tirpalai, ir organizmas nusikrato nuodingų apykaitos produktų taip pat tirpalų pavidalu. Apie 70 kg sveriančio suaugusio žmogaus organizme apytikriai yra 42 kg (60 %) vandens. Jis pasiskirstęs taip: ląstelių vanduo – 40 % kūno svorio ir neląstelinis – 20 %; pastarąjį sudaro kraujo plazmos vanduo (5 % kūno svorio) ir tarpląstelinis vanduo (15 % kūno svorio). Judriausia vidinės terpės dalis – kraujas, transportuodamas maisto medžiagas, O₂, CO₂ ir kitus medžiagų apykaitos produktus, atlieka daug funkcijų: maitina, valo, reguliuoja temperatūrą.

Organizmo skysčiai išnešioja po visą organizmą hormonus, fermentus ir kitas veikliąsias medžiagas, kurios padeda nervų sistemai sujungti daugybę elementų į vieną, bendrai funkcionuojantį vienetą – organizmą.

Taigi medikams ir biologams reikia žinių apie skysčių fizines savybes, prietaisus, kuriais galima tas savybes tirti, skysčių tekėjimo dėsnius. Šiam tikslui ir skirtas šis knygos skyrius.

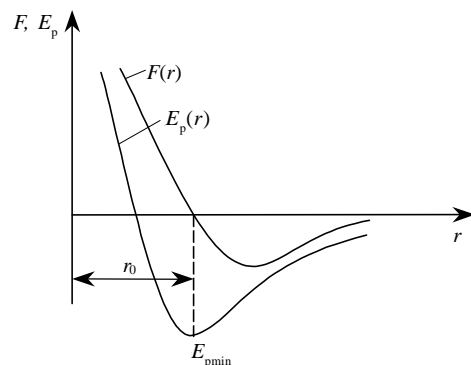
5.1.2. Skysčiai ir jų savybės

Kūnai, su kuriais susiduriame kasdieniame gyvenime, visada mums atrodo vientisi, t. y. visiškai užpildyti juos sudarančia medžiaga. Tačiau mūsų jutimo organai, suvokiantys kūnus kaip tolydžius, sudaro klaidingą įspūdį apie jų tikrąsias savybes. Dabar gerai žinoma, kad medžiaga susideda iš atomų ir molekulių. Diskrečios, molekulinės medžiagos sandaros samprata atsirado jau gilioje senovėje. Medžiagos savybių aiškinimas remiantis jos molekulinės sandaros samprata sudaro molekulinės kinetinės medžiagos teorijos esmę. Nagrinėjant atomų ir molekulių sąveiką, pastebėta, kad esant palyginti dideliems atstumams juos veikia traukos, o mažiems – stūmos jėgos (5.1.1 pav.). Šiame paveiksle pavaizduotos tipiškos tarpmolekulinių jėgų $F(r)$ ir potencinės molekulių sąveikos energijos $E_p(r)$ priklausomybės nuo atstumo tarp molekulių. Kai $r = r_0$, potencinės energijos kreivė turi minimumą E_{pmin} , atitinkantį pusiausvrios padėties energiją. Atomai ir molekulės nuolat juda ir todėl turi kinetinės energijos. Traukos jėgos siekia surišti atomus ir molekules į vieną visumą, o kinetinė energija šiai tendencijai priešinasi. Jeigu suminė atomų ir molekulių kinetinė energija (jos modulis) daug didesnė negu jų traukos suminė potencinė energija (reikia priminti, kad potencinė traukos energija neigiama), tai medžiaga yra *dujinės būsenos*; jeigu daug mažesnė, – *kietosios*. *Skystoji* būseną susidaro, kai šios energijos apylygės.

Dujos yra sancaupa molekulių, netvarkingai judančių visomis kryptimis nepriklausomai viena nuo kitos. Todėl dujinės būsenos medžiaga neišlaiko nei formos, nei tūrio. Jos tūrį ir formą lemia indas, kuriame ji yra. Nesant indo, dujos stengiasi užpildyti visą erdvę.

Kietajame kūne molekulės ilgai išlaiko pastovią tarpusavio padėtį, ir tik nedideli svyravimai vyksta apie apibrėžtas pusiausvrias padėtis. Kietojo kūno molekulės arba atomai išsidėsto apibrėžtose padėtyse, sudarydami kristalinę gardelę. Kietosios būsenos medžiaga išlaiko ir formą, ir tūrį. Ją deformuojant (keičiant formą arba tūrį), atsiranda jėgos, kurios stengiasi sugrąžinti buvusią formą ir tūrį (žr. 5.6 skyrelį).

Daug sudėtingesnė yra skysčių sandara. Skystyje, kaip ir kietajame kūne, molekulės stipriai sąveikauja išlaikydamos tarpusavio ryšius. Tačiau skysčio molekulės juda kur kas laisviau negu



5.1.1 pav. Tarpmolekulinių jėgų ir potencinės energijos priklausomybė nuo atstumo tarp molekulių

kietojo kūno molekulės, nors ir ne taip laisvai kaip dujų molekulės. Toks judėjimas primena kietojo kūno molekulės svyravimus apie pusiausvirąją padėtį. Tačiau protarpiais skysčio molekulė ištrūksta iš savo aplinkos, nes tarpmolekulinės sąveikos jėgos išlaiko skysčio molekulę arti jos laikinosios pusiausvyros apytiksliai 10^{-12} – 10^{-10} s, po to ji peršoka į naują laikinąją pusiausvirą (maždaug savo spindulio atstumu), kur vėl tam tikrą laiką tęsia judėjimą, panašų į svyravimą. Atitinkamai skysčio sandara yra tarpinė tarp kietojo kūno ir dujų sandaros. Skystoji būseną išsiskiria tuo, kad medžiaga stengiasi išlaikyti tūrį, bet neišlaiko formos.

Kiekviena skysčio molekulė iš visų pusių yra apsupta kaimynių, nutolusių nuo jos vidutiniu nuotoliu, artimu r_0 . Šiluminis molekulių judėjimas daugiausia vyksta potencialo duobės viduje (5.1.1 pav.). Skysčio molekulė per 1 s gali pakeisti savo padėtį apie 10^8 kartų, atlikdama tarp dviejų šuolių 10^3 – 10^5 virpesių. Laiko tarpas tarp dviejų molekulių šuolių vadinamas *gyvavimo trukme*. Ši trukmė priklauso nuo skysčio rūšies ir temperatūros.

Mechaniniu požiūriu skysčiai skiriasi nuo kietųjų kūnų pirmiausia tuo, kad jie neturi rimties trinties – net mažiausia jėga sukelia skysčių dalelių judėjimą. Toks teiginys tinka idealiesiems skysčiams. Realiosiuose skysčiuose (tokie ir yra gyvuosiuose organizmuose) pastebima vidinė trintis (klampumas), t. y. tam tikras pasipriešinimas (žr. 5.1.5 skyrelį). Skysčio forma priklauso nuo indo formos. Realieji skysčiai pasižymi spūdumu, t. y. skysčius slegiant, jų tūris truputį mažėja. Visi reiškiniai, susiję su klampumu ir spūdumu, apsunkina skysčių judėjimo nagrinėjimą. Teoriškai patogiau nagrinėti neklampių ir nespūdžių skysčių judėjimą. Tokie skysčiai vadinami *idealiaisiais*. Jiems galioja tokie dėsniai:

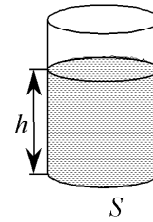
1. *Paskalio dėsnis*: nejudančiame skystyje išorinis slėgis perduodamas į visas puses vienodai. Slėgis, veikiantis nejudančiame skystyje, vadinamas *hidrostatiniu slėgiu*. Visi realieji skysčiai turi svorį, todėl hidrostatinį slėgį skystyje sudaro ne tik išorinis slėgis, bet ir slėgis, kurį sukelia paties skysčio svoris. Pavyzdžiui, inde, kurio pagrindo plotas yra S , įpilta skysčio (5.1.2 pav.). Indo dugną slegia skysčio, kurio aukštis h ir tankis ρ , svoris $P = mg = \rho Vg$; čia g – laisvojo kritimo pagreitis. Kadangi tūris $V = Sh$, tai $P = \rho Shg$, o skysčio stulpelio sudaromas hidrostatinis slėgis

$$p = P/S = \rho gh. \quad (5.1.1)$$

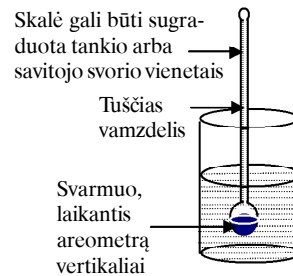
Kuo daugiau dalelių yra virš kurio nors taško, tuo didesnis jų svoris, taigi ir skysčio slėgis.

2. *Susisiekiančiųjų indų dėsnis*: slėgis tame pačiame gylyje nepriklauso nuo indo formos, todėl susisiekiančiuose induose skysčio paviršius yra viename lygyje.

3. *Archimedo dėsnis*: panardintą į skystį kūną veikia aukštyn nukreipta išstumiančioji jėga, kuri yra lygi kūno išstumto skysčio svoriui. Jei kūno tankis mažesnis už skysčio tankį, tai kūnas, įmestas į skystį, nepasineria, o nugrimzta tik tiek, kad išstumtojo skysčio svoris susilygintų su to kūno svoriu. Esant šiai pusiausvyrai, kūnas plūduriuoja. Įmetus tą patį kūną į mažesnio tankio skystį, jis nugrimzta, nes savo svoriui atsverti turėtų išstumti didesnį skysčio tūrį. Šiuo principu veikia *areometras* – tankiamatis (5.1.3 pav.). Tai prietaisas skysčio, kuriame jis plūduriuoja, tankiui pagal panirimo gylį matuoti. Jei skystis labai tankus, areometras plūduriuoja arti paviršiaus, nes reikia išstumti nedidelį tūrį skysčio, kurio svoris prilygsta areometro svoriui.



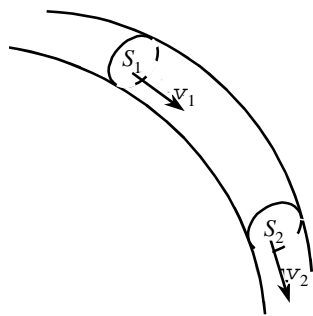
5.1.2 pav. Indas su skysčiu



5.1.3 pav. Areometras

5.1.3. Srovės tolydumo lygtis

Ankstesniame skyrelyje buvo aprašomi nejudantiems skysčiams galiojantys dėsniai. Toliau yra rašoma apie skysčio judėjimą, kuris vadinamas *tekėjimu*. Sakoma, kad skystis teka *stacionariai*, jei laikui bėgant skysčio dalelių judėjimo greitis ir kryptis bet kurioje srovės dalyje nekinta. Čia skysčio dalele vadinamas labai mažas jo tūrio elementas, kuriame vis dėlto yra nemažai molekulių.



5.1.4 pav. Srovės vamzdis

Skysčio tekėjimas vaizduojamas srovės linijomis. *Srovės linija* – tai tokia linija, kurios kryptis bet kurioje vietoje atitinka skysčio dalelių judėjimo kryptį. Iš srovės linijų galima spręsti ne tik apie dalelių judėjimo kryptį, bet ir apie greičio didumą – kur srovės linijos tankesnės, ten ir greitis didesnis. Stacionaraus tekėjimo – srovės linijų forma nekinta – kuri nors skysčio dalelė visą laiką juda ta pačia srovės linija. Tam tikra skysčio dalis, apribota iš visų pusių srovės linijomis, vadinama *srovės vamzdžiu* (5.1.4 pav.). Kai tekėjimas stacionarus, nė viena skysčio dalelė neišeina iš srovės ir į ją neįeina. Pavyzdžiui, tam tikrose srovės dalyse skerspjūvio plotai yra S_1 ir S_2 , o idealaus skysčio tekėjimo greičiai per šiuos skerspjūvius – v_1 ir v_2 . Per 1 s pro pjūvį S_1 pratekės skysčio, kurio tūris yra V_1 , o pro S_2 – V_2 . Šie tūriai turi būti lygūs: $V_1 = V_2$ ($v_1 S_1 = v_2 S_2$). Vadinasi, idealiojo skysčio tekėjimo greičio ir srovės vamzdžio skerspjūvio ploto sandauga tam pačiam srovės vamzdžiui yra pastovus dydis:

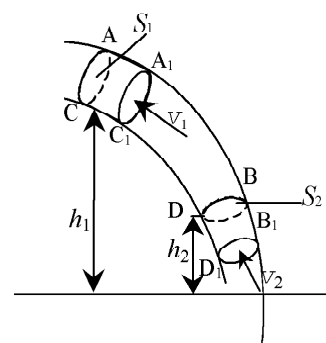
$$vS = \text{const.} \quad (5.1.2)$$

Tai yra stacionaraus skysčio tekėjimo *srovės tolydumo lygtis*. Iš jos matyti, kad ten, kur srovės vamzdžio skerspjūvis mažesnis, srovės greitis didesnis, ir atvirkščiai. Tačiau pro skerspjūvį per laiko vienetą visada prateka toks pat idealaus skysčio tūris.

5.1.4. Bernulio lygtis

Pasvirajame srovės vamzdyje (5.1.5 pav.) skysčio tūris dalyje ABDC ribojamas tekėjimo greičiui statmenais plotais S_1 ir S_2 . Per trumpą laiko tarpą Δt šis skysčio tūris srovės vamzdyje truputį pasislinks ir užims padėtį $A_1 B_1 D_1 C_1$. Kadangi skystis nespūdus ir tolydus, tai tūriai V_1 ir V_2 yra lygūs $V_1 = V_2 = V$.

Skysčio masė užimamuose tūriuose turi *kinetinės energijos* $E_k = mv^2/2$, *potencinės energijos* $E_p = mgh$ ir *vidinės potencinės energijos* $E = pV$. Čia m – skysčio masė, užimanti tūrį V , v – skysčio greitis, h – skysčio stulpelio aukštis, p – skysčio slėgis. Esant tam tikram išorės slėgiui p_A , skystis visada turi vidinės potencinės energijos. Vidinės potencinės energijos didumas matuojamas darbu, kurį turi



5.1.5 pav. Skysčių tekėjimas pasviruoju vamzdžiu

atlikti skystis, išstumdamas skysčio tūrį V beorės erdvę, ar atvirksčiai – darbu, kurį reikia atlikti, norint įstumti skysčio tūrį V iš beorės erdvės į tam tikro slėgio p_A skysčio aplinką.

Visa energija, kurią turi skerspjūvyje S_1 išskirta skysčio masė m , yra $mv_1^2/2 + mgh_1 + p_1V$. Pasislinkus šiai skysčio masei į skerspjūvį S_2 , visa energija yra $mv_2^2/2 + mgh_2 + p_2V$. Tekant idealiajam skysčiui iš skerspjūvio S_1 į S_2 , energijos nuostolių nėra, todėl, remiantis energijos tvermės dėsniu, išskirtosios masės energija abiejuose skerspjūviuose turi būti ta pati:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 + p_1V = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 + p_2V. \quad (5.1.3)$$

Vadinasi, pilnutinė idealiojo skysčio masės energija bet kuriame srovės vamzdžio skerspjūvyje, kai tekėjimas stacionarus, yra pastovus dydis. Padalijus visus narius iš tūrio V ir žinant, kad $m/V = \rho$, gaunama

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}; \quad (5.1.4)$$

čia dydis p vadinamas *statiniu slėgiu*, dydis ρgh – *hidrostatiniu slėgiu*, o $\rho v^2/2$ – *dinaminiu slėgiu*. Ši idealiojo skysčio tekėjimo greičio ir slėgio ryšį teoriškai 1738 metais nustatė D. Bernulis (*D. Bernoulli*), todėl (5.1.4) lygtis vadinama *Bernulio lygtimi*. Žodžiais ją galima nusakyti taip: *dinaminio, hidrostatinio ir statinio slėgių srovės vamzdyje suma yra pastovus dydis*. Jei srovės vamzdis yra horizontalus ($h_1 = h_2$), tai

$$\frac{mv_1^2}{2} + p_1V = \frac{mv_2^2}{2} + p_2V$$

ir Bernulio lygtis užrašoma

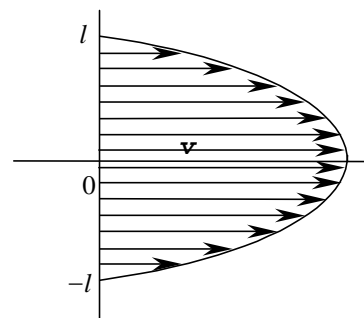
$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}. \quad (5.1.5)$$

Dinaminio ir statinio slėgių suma vadinama *pilnutiniu slėgiu*. Statinis slėgis yra slėgis į kūno, apie kurį teka skystis, paviršių. Pavyzdžiui, tekant skysčiui vamzdžiu, statinis slėgis yra skysčio slėgis į sienelę. Vamzdžio susiaurėjimuose padidėja skysčio greitis, kartu dinaminis ir pilnutinis slėgiai, o statinis – sumažėja. Visų narių (5.1.4) ir (5.1.5) lygtyse matavimo vienetas yra slėgio vienetas paskalis ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

Bernulio lygtis yra pagrindinė hidrodinamikos lygtis. Ji galioja ne tik idealiesiems, bet ir nedidelės klamos skysčiams.

5.1.5. Skysčių klampumas

Dėl molekulių sąveikos visi realieji skysčiai pasižymi *vidine trintimi*, arba *klampumu*. Galima daryti prielaidą, kad skystis sudarytas iš atskirų skysčio sluoksnių. Vidinės trinties jėgos, veikiančios sluoksnių paviršių liestinės kryptimi, atsiranda tarp skysčio sluoksnių, judančių nevienodais greičiais: greičiau judantis sluoksnis veikia lėčiau judantį greitinančiąja jėga, o lėčiau judantis veikia greitesnį stabdančiąja jėga. Taip judančius sluoksnius galima stebėti tekant skystiui drėkinamam vamzdžiui (5.1.6 pav.). Panašiai įvairiais kraujo indais teka kraujas kraujagyslėmis gyvuosiuose organizmuose. Didžiausią greitį įgyja dalelės, judančios vamzdžio ašimi, o artėjant joms prie vamzdžio sienelių greitis mažėja, nes atsiranda skysčio išorinių sluoksnių ir vamzdžio sienelių trinties jėga. Arčiausiai vamzdžio krašto esantis sluoksnis nejuda. I. Niutonas (*I. Newton*) nustatė, kad vidinės trinties jėga tarp dviejų skysčio sluoksnių yra tiesiog proporcinga tų sluoksnių vidutinių greičių skirtumui $\Delta v = v_2 - v_1$, sluoksnių lietimosi plotui S ir atvirkščiai proporcinga atstumui Δl tarp taškų, kuriuose matuojami vidutiniai sluoksnių greičiai:



5.1.6 pav. Skysčio tekėjimas drėkinamam vamzdžiui

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S; \quad (5.1.6)$$

čia η – *dinaminė klampa*, kuri priklauso nuo skysčio prigimties, $\Delta v / \Delta l$ – greičio gradientas, apibūdinantis greičio kitimo spartą, pereinant iš vieno sluoksnio į kitą statmena sluoksniams kryptimi. Dinaminė klampa skaitine verte lygi vidinės trinties jėgai, veikiančiai tarp skysčio sluoksnių, kurių lietimosi plotas lygus 1 m^2 , kai greičio gradientas lygus 1 s^{-1} . Dinaminės klamos matavimo vienetas SI sistemoje yra Pa·s (paskalsekundė).

Vidinės skysčių trinties reiškiniu esmė ta, kad skysčio molekulės, veikiamos išorinės jėgos, atlieka šuolius (žr. 5.1.2 skyrelį) tos jėgos kryptimi. Kuo dažniau skysčio molekulė peršoka iš vienos laikinosios pusiausvyros vietos į kitą, tuo mažesnė skysčio klampa ir didesnis skysčio *takumas*, dydis, atvirkščias klampai ($1/\eta$). Vidinės trinties kilmę molekulinė kinetinė teorija aiškina taip: molekulės, pereidamos iš greitesniojo sluoksnio į lėtesnįjį, perneša didesnį judesio kiekį negu atvirkščiai kryptimi, o judesio kiekio kitimas sukelia jėgą, lėtinančią greitesnįjį ir greitinančią lėtesnįjį skysčio ar dujų sluoksnį, taigi vidinę trintį.

Dažnai greta dinaminės klamos žinyuose nurodoma ir *kinematinė klampa*, kuri lygi dinaminės klamos ir skysčio tankio santykiui:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}; \quad (5.1.7)$$

čia ρ – medžiagos tam tikroje temperatūroje tankis. Kinematinė klampa matuojama m^2s^{-1} .

Kinematinė klampa daugiau nei dinaminė atsižvelgia į vidinę trintį, skysčio judėjimo ypatumus. Pavyzdžiui, vandens klampa ~ 100 kartų didesnė nei oro (kai $t = 0^\circ\text{C}$), bet vandens kinematinė klampa 10 kartų mažesnė nei oro ir todėl klampa turi didesnę įtakos oro judėjimui nei vandens. Plačiau apie dujų klampą ir jos aiškinimą molekulinės teorijos atžvilgiu parašyta 5.2 skyriuje.

Įvairių skysčių klampa. Daugelyje veiklos sričių labai svarbu žinoti įvairių skysčių klampą. Priedų 12 lentelėje pateiktos kai kurių skysčių dinaminės klamos. Pavyzdžiui, medicinoje iš kraujo klamos kitimo greičio krešėjimo metu sprendžiama apie galimus organizmo susirgimus, nes, sergant įvairiomis ligomis, kraujo klampa būna skirtinga. Dėl pataloginių pakitimų kraujo dinaminė klampa gali keistis nuo $1,7 \cdot 10^{-3}$ Pa·s iki $22,9 \cdot 10^{-3}$ Pa·s. Veninio kraujo klampa yra truputį didesnė nei arterinio. Kai kurie infekciniai susirgimai didina kraujo klampą, o kiti, pavyzdžiui, tuberkuliozė – mažina. Sunkus fizinis darbas taip pat didina kraujo klampą, nes dirbant iš kraujo su prakaitu daugiau pasišalina vandens, negu jo pereina iš tarpląstelinio skysčio.

Organizmo kraujo klampa priklauso nuo kraujagyslių būklės bei kraujotakos greičio. Pasirodo, kad, mažėjant kapiliarų spindžiui, didėja tik homogeninių skysčių klampa. Kraujas yra heterogeninis skystis, todėl, kapiliarų skersmeniui pasidarius mažesniau nei 150 μm ir toliau tebemažėjant, jo klampa sumažėja.

Skysčių klamos priklausomybė nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, skysčių klampa mažėja. Šią priklausomybę nusako Frenkelio formulė

$$\eta = Ae^{\frac{\varepsilon}{kT}};$$

čia A – konstanta, k – Bolcmano konstanta, T – skysčio absoliučioji temperatūra, ε – skysčio molekulių aktyvacijos energija, t. y. minimali energija, reikalinga molekulei nugalėti potencialo barjerą (5.1.1 pav.) ir peršokti į naują pusiausvirąją padėtį.

J. I. Frenkelis (*β. Č. Ōšâĳzâëü*) labai vaizdžiai nusakė šilumos judėjimą skysčiuose. Jis aiškino, kad skysčio molekulės savo ilgus pastovaus gyvenimo periodus nuolat keičia trumpalaikiais šuoliais tarp šių padėčių. Šie periodai labai skirtingi ir nuolat netvarkingai keičiasi, bet vidutinė virpesių trukmė apie pusiausvirąją padėtį kiekvienam skysčiui yra apibrėžtas dydis ir jis stipriai mažėja temperatūrai didėjant. Todėl padidėja molekulių judrumas ir sumažėja skysčio klampa.

5.1.6. Laminarusis ir turbulentinis klampiųjų skysčių tekėjimas vamzdžiais. Puazeilio ir Hageno lygtis

Organizmų paviršiuje per ploną oro sluoksnį, kontaktuojantį su paviršiumi ir vadinamą *pasienio sluoksniu*, dėl molekulinės difuzijos vyksta šilumos ir masės pernešimas. Pasienio sluoksnio savybės priklauso nuo oro klampumo savybių ir nuo judesio kiekio, susijusio su klampumo jėgomis, pernešimo.

Pasienio sluoksnis atsiranda ant lygaus plokščio paviršiaus, panardinto į judantį srautą (dujas ar skystį). Kada srauto linijos yra lygiagrečios su paviršiumi, tekėjimas vadinamas *laminariuoju* ir

jame vyksta atskirų molekulių judesio kiekių keitimasis. Laminariosios srovės atskiri sluoksniai tartum slenka vienas kito atžvilgiu. Didėjant srovės greičiui, atskiros skysčio dalelės ne tik slenka, bet ir pradeda sukstis – skystyje susidaro sūkuriai. Toks tekėjimas vadinamas *turbulentiniu*. Skysčių tekėjimas vamzdžiais gali būti ir laminarusis (sluoksninis), ir turbulentinis. Turbulentiniam tekėjimui yra būdingas slėgio atskirose skysčio dalyse kitimas, paprastai lydimas garsinių reiškinių (triukšmo, čiurlenimo, šnypštimo ir kt.), todėl turbulentinį tekėjimą lengva aptikti.

Šuolis nuo laminariojo prie turbulentinio tekėjimo vyksta priklausomai nuo klampumo ir inercinių jėgų santykio, kuris apibūdinamas Reinoldso skaičiumi. Anglų fizikas O. Reinoldsas (*O. Reynolds*) 1883 metais eksperimentiškai nustatė, kad skysčių tekėjimo vamzdžiais pobūdis priklauso nuo skysčio savybių (tankio, klampos), jo tekėjimo greičio ir vamzdžio skersmens, t. y. tam tikro bemačio dydžio skaitinės vertės. Šis dydis pavadintas *Reinoldso skaičiumi* (Re):

$$Re = \frac{\rho v_{kr} D}{\eta} = \frac{v_{kr} D}{\nu}; \quad (5.1.8)$$

čia ρ – skysčio tankis, ν – kinematinė klampa, v_{kr} – krizinis laminariojo tekėjimo perėjimo į turbulentinį greitis, D – vamzdžio skersmuo, η – dinaminė klampa. Krizinė Re vertė tiesiame lygių sienelių vamzdyje visų skysčių yra tokia pati $\cong 2300$. Kai $Re < 2300$, tekėjimas yra laminarusis, kai $Re > 2300$, tekėjimas vadinamas turbulentiniu.

Tiek laminariojo, tiek turbulentinio tekėjimo atveju pasienio sluoksnyje tekėjimo greitis kinta nuo 0 paviršiuje iki laisvo srauto greičio V pasienio sluoksnio viršuje. Apskritai pasienio sluoksnio storis yra santykinis. Dažnai naudojamas storis, kuriame greitis lygus $0,99 V$, bet, nagrinėjant judesio kiekio pernašą, patogiau naudotis vidutiniu pasienio sluoksnio storiumi.

Tekant realiesiems skysčiams horizontaliu vamzdžiu, skysčio dalelių potencinė energija eikvojama vidinės trinties jėgoms nugalėti ir todėl išilgai vamzdžio ašies krinta statinis slėgis. Ž. Puazeilis (*J. Poiseuille*) 1840 metais eksperimentais nustatė, kad laminarusis skysčio tekėjimo neplačiu horizontaliu apvaliu vamzdžiu vidutinis greitis v_{vid} tiesiog proporcingas slėgių įėjime p_1 ir išėjime p_2 skirtumui, vamzdžio spindulio R kvadratui ir atvirkščiai proporcingas skysčio klampai η ir vamzdžio ilgiui l :

$$v_{vid} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l}. \quad (5.1.9)$$

Tai *Puazeilio dėsnis*. Žinant v_{vid} , galima rasti skysčio, pratekančio skerspjūvio S vamzdžiu per laiko vieneta, tūrį

$$Q = v_{vid} S.$$

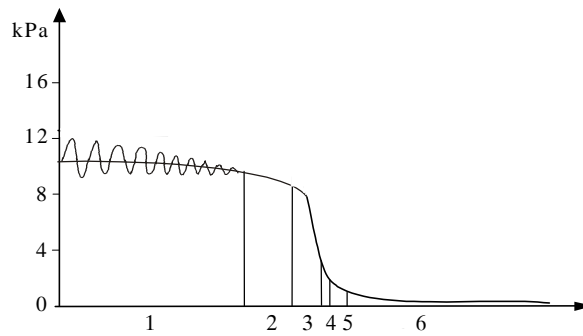
Kadangi $S = \pi R^2$, tai

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{\pi R^4}{8\eta}. \quad (5.1.10)$$

Ši formulė vadinama *Hageno ir Puazeilio lygtimi*.

Skysčių tekėjimas vamzdžiais yra svarbus medicinoje, nes kraujotakos sistema sudaryta iš įvairaus skersmens apvalių indų. Kraujo tekėjimas sveikame organizme yra laminarusis, nedidelis turbulentinis tekėjimas atsiranda arčiau širdies vožtuvų, taip pat kiekvienoje didesnio spindžio kraujagyslėje ar bronche, t. y. ten, kur susidaro neplatus susiaurėjimo „žiedas“. Tačiau esant kai kuriems susirgimams, kai kraujo klampa būna mažesnė nei normali, Reinoldso skaičius gali viršyti krizinę reikšmę ir judėjimas gali tapti turbulentinu. Tuomet kaklo srities arterijose girdimi ūžesiai.

Kraujo tekėjimo aorta, kurios vidinis skersmuo lygus apie 2 cm, greitis yra ne didesnis kaip 30–40 cm/s. Didelės arterijos išsišakoja į mažesnio skersmens arterijas, šios – į dar mažesnes arterioles ir galiausiai į kapiliarus. Galima tai išsivaizduoti kaip lygiagrečiai sujungtų vamzdžių sistemą, kurios bendras skerspjūvio plotas didėja atsirandant kraujo indų išsišakojimui. Suminis kapiliarų skerspjūvio plotas yra 600–800 kartų didesnis už didžiųjų arterijų skerspjūvio plotą, todėl kapiliaruose kraujo tekėjimo greitis yra tik apie 0,05–0,08 cm/s. Kapiliarai jungiasi į venules, o šios į venas, dėl šio jungimosi skerspjūvio plotas mažėja, o tekėjimo greitis didėja. Pavyzdžiui, didžiojoje venoje, kuri jungiasi prie dešiniojo prieširdžio, kraujas teka 6–14 cm/s greičiu. Susitraukimo metu kairiajame skilvelyje slėgis padidėja ir būna apie 13–16 kPa didesnis už atmosferos slėgį. Papildomo slėgio virš atmosferos pasiskirstymas didžiajame kraujo apytakos rate pateiktas 5.1.7 paveiksle. Matyti, kad arteriolėse ir kapiliaruose slėgis labiau mažėja didėjant trinčiais. Iš pirmo žvilgsnio gali atrodyti keista, kad trinties pasipriešinimas yra didelis arteriolėse ir kapiliaruose, kurių visas skerspjūvio plotas yra didelis. Šiam faktui paaiškinti pasinaudojama modeliu iš n lygiagrečiai sujungtų vienodo spindžio r vamzdelių. Iš (5.1.10) formulės išplaukia, kad vieno vamzdelio pasipriešinimas yra atvirkščiai proporcingas r^4 , o iš lygiagretaus vamzdelių jungimo dėsnio išplaukia, kad bendras n vamzdelių pasipriešinimas yra atvirkščiai proporcingas nr^4 . Suminis jų skerspjūvio plotas S yra proporcingas nr^2 , todėl suminis sistemos pasipriešinimas yra atvirkščiai proporcingas Sr^2 . Be to, dinaminė klampa kapiliaruose yra mažesnė. Taigi gana akivaizdu, kad netgi esant dideliame S sandauga Sr^2 yra maža, jei r pakankamai mažas, ir bendras pasipriešinimas yra didelis. Taip yra arteriolių ir kapiliarų atveju.



5.1.7 pav. Slėgių pasiskirstymas didžiajame kraujo apytakos rate:

1 – didžiosiose arterijose, 2 – mažosiose arterijose, 3 – arteriolėse, 4 – kapiliaruose, 5 – venulėse, 6 – venose [pagal 38]

5.1.7. Kūnų judėjimas skystyje

Klampumas pasireiškia ne tik skysčiams judant įvairiais indais, bet ir kūnui judant skystyje. Kai kūnas juda klampiam skystyje, esant dideliems kūnų greičiams, atsiranda didelės pasipriešinimo jėgos. Apie kūną esančios klampios terpės laminariajame sraute susidaro sūkuriai bei sūkurinės srovės. Šiuo atveju slėgis į judančio kūno priekinį paviršių pasidaro didesnis negu į užpakalinį ir atsiranda papildoma jėga, kuri priešinasi kūno judėjimui. Pasipriešinimo jėgos didumas ir kilmė priklauso nuo kūno formos ir judėjimo greičio. Klampioje terpėje judančio kūno paviršius apsitraukia plonyčiu tos medžiagos sluoksniu, kuris juda kartu su šiuo kūnu. Kitus aplinkinius skysčio sluoksnius galima laikyti nejudančiais. Taigi tarp prilipusio sluoksnio ir arti kūno esančių kitų sluoksnių susidaro greičio gradientas, kartu ir didelės vidinės trinties, arba klampumo, jėgos (5.1.6. formulė).

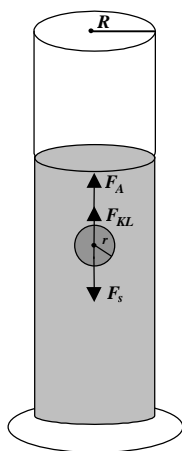
Mažiams kūnų judėjimo greičiams Dž. Stoksas (*J. Stokes*) nustatė, kad klampumo jėga yra tiesiog proporcinga skysčio dinaminei klampai, kūno judėjimo greičiui ir jo matmenims. Rutuliškiesiems kūnams ši jėga

$$F = 6\pi\eta rv; \quad (5.1.11)$$

čia η – dinaminė klampa, v – rutuliuko greitis, r – rutuliuko spindulys.

Krintantį klampioje terpėje rutuliuką veikia trys jėgos (5.1.8 pav.):

- sunkio jėga $F_s = mg = 4/3\pi\rho r^3g$; čia ρ – rutuliuko medžiagos tankis;
- Archimedo jėga $F_A = m_s g = 4/3\pi\rho_s r^3g$; čia m_s – išstumto skysčio masė, ρ_s – skysčio tankis;
- pasipriešinimo (klampumo) jėga, apskaičiuojama pagal (5.1.11) formulę.



5.1.8 pav. Jėgos, veikiančios krintantį klampiam skystyje rutulėlį

Įmetus kūną į skystį, jo greitis mažėja tol, kol judėjimo greitis tampa pastovus (tolygusis judėjimas). Tada

$$mg + F_A + F_{kl} = 0,$$

arba, įrašius šių jėgų (modulių) išraiškas, atsižvelgus į jėgų kryptis:

$$4/3\pi r^3 \rho g - 4/3 \pi r^3 \rho_s g - 6\pi\eta r v_0 = 0; \quad (5.1.12)$$

čia v_0 – tolygiai krintančio rutuliuko greitis. Iš šios formulės galima išreikšti

$$v_0 = \frac{2r^2 g}{9\eta} (\rho - \rho_s). \quad (5.1.13)$$

Iš čia matyti, kad mažesnis tos pačios medžiagos rutuliukas grimzta lėčiau negu didesnis. Dėl šios priežasties mažyčiai vandens lašeliai ir kietosios dalelės tiesiog „plūduriuoja“ ore ir krinta labai pamažu.

5.1.8. Viskozimetrija

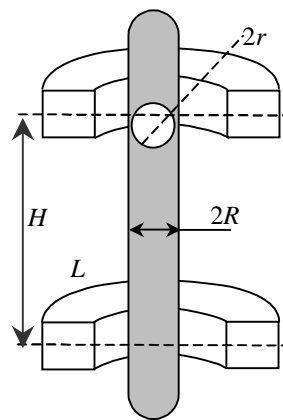
Metodų visuma skysčių klampai nustatyti vadinama *viskozimetrija*. Prietaisai, kuriais nustatoma klampa, vadinami *viskozimetrais*, arba *klampomačiais*. Jų yra kelios grupės.

Rotaciniuose viskozimetruose skystis teka tarp dviejų kūnų, pavyzdžiui, cilindrų. Vienas iš cilindrų sukasi (rotorius), o kitas yra pritvirtintas. Klampa randama matuojant rotoriaus kampinį greitį, jei žinomas sukimo momentas, arba matuojant jėgos momentą, veikiantį nejudantį cilindrą, kai yra žinomas rotoriaus sukimosi greitis. Tačiau jėgų momentų priklausomybė nuo klamos išreiškiama sudėtingais matematiniais sąryšiais, todėl dažniausiai tokie viskozimetrai graduojami pagal žinomos klamos skystį ir taip matuojama santykinė klampa. Rotaciniu viskozimetru galima matuoti skysčių dinaminę klampą 1–10⁵ Pa·s intervale. Tokią klampą turi tepalai, išlydyti silikatai, metalai, lakai, klijai ir kt.

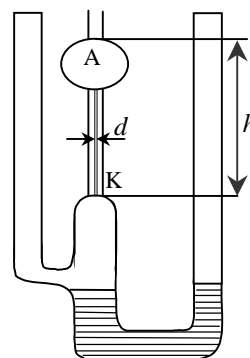
Kitai viskozimetrų grupei priklauso tie, kurie skirti matuoti absoliučiąją skysčio klampą. Jiems priklauso *Stokso viskozimetras* (5.1.9 pav.) ir įvairūs *rotametrai*. Stokso viskozimetruose rutuliukas (spindulio r) krinta vertikaliai žemyn cilindru (kurio spindulys yra R). Nusistovėjęs kritimo greičiui v , jį galima apskaičiuoti žinant laiką, per kurį rutuliukas nukrenta atstumą H tarp dviejų cilindro žymių. Tada klampa η yra r , R ir v funkcija. Šio tipo viskozimetrai leidžia matuoti klampą nuo 0,1 iki 10⁵ Pa·s. Rotametriuose klampiam skystyje esantį rutuliuką veikia oro srautas, kuris verčia jį judėti vertikaliai aukštyn. Tada klampa matuojama analogiškai kaip Stokso viskozimetruose.

Mažai (nuo 10² iki 10⁻³ Pa·s) dujų ir skysčių klampai matuoti naudojami *kapiliariniai viskozimetrai* (5.1.10 pav.). Virš kapiliaro K viršutinės dalies yra rezervuaras A, kurio tūris V yra žinomas. Sunkio jėgos veikiamas, skystis teka kapiliaru. Išmatavus laiką, per kurį skystis išteka iš rezervuaro, pagal (5.1.10) Hageno ir Puazeilio formulę galima nustatyti skysčio tūrį, pratekantį vamzdžio skerspjūviu S per laiko vieneta.

Šia formule galima naudotis, kai yra tenkinamos tokios sąlygos: pirma, skysčio tankis viskozimetre turi būti vienodas; antra, skysčio tekėjimas kapiliaru turi būti laminarusis, t. y. Reinoldso skaičius Re neturi viršyti 2300.



5.1.9 pav. Stokso viskozimetro schema



5.1.10 pav. Kapiliarinio viskozimetro schema

Remiantis (5.1.9) formule, laminariojo skysčio tekėjimo kapiliaru greitis

$$v_{\text{vid}} = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{R^2}{8\eta};$$

čia $\Delta p / \Delta x$ – slėgio gradientas, parodantis slėgių skirtumą dviejuose kapiliaro skerspjūviuose, kai atstumas tarp jų lygus vienetai. Ištekėjusio iš kapiliaro per tam tikrą laiką skysčio tūris

$$V = S v_{\text{vid}} t = \pi R^2 v_{\text{vid}} t; \quad (5.1.14)$$

čia $S = \pi R^2$ – kapiliaro skerspjūvio plotas. Į šią lygybę įstačius v_{vid} išraišką, gaunama

$$V = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{R^4 t}{\eta}, \quad \text{arba} \quad \eta = \frac{\pi R^4}{8V} \frac{\Delta p t}{\Delta x}. \quad (5.1.15)$$

Skysčio tekėjimą vertikaliu kapiliaru sąlygoja tik paties skysčio, kurio aukštis h , slėgis. Taigi

$$\Delta p = h \rho g. \quad (5.1.16)$$

Įstačius šią išraišką į (5.1.15) formulę,

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8V \Delta x} h \rho g t. \quad (5.1.17)$$

Tada kinematinė klampa

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi R^4}{8V \Delta x} h g t. \quad (5.1.18)$$

Ištekant kapiliaru per laiko vieneta vienodam skirtingų skysčių tūriui,

$$\frac{\pi R^4}{8V \Delta x} h g = c;$$

čia c – pastovus dydis – *viskozimetro konstanta*, priklausanti tik nuo kapiliaro matmenų ir laisvojo kritimo pagreičio g . Taigi

$$\nu = c t. \quad (5.1.19)$$

Žinant c , tam tikram tūriui, nurodytam viskozimetro instrukcijoje, ir išmatavus skysčio tekėjimo trukmę, galima apskaičiuoti to skysčio kinematinę klampą ν .

Prie tokio tipo viskozimetrų priskiriamas ir medicinos įstaigose naudojamas Heso viskozimetras, kuriuo nustatoma kraujo klampa. Jį sudaro du vienodi tarpusavyje vamzdeliu sujungti kapiliarai. Vieno kapiliaro galas panardinamas į vandenį, kito – į kraują. Kadangi skysčių klampa yra nevienoda, tai kapiliaruose užpildomi tūriai yra skirtingi. Pasinaudojus Hageno ir Puazeilio formule, galima užrašyti santykinę vandens ir kraujo tūrių bei klampų priklausomybę: $Q_v : Q_k = \eta_k : \eta_v$; čia Q_v, Q_k – atitinkamai vandens ir kraujo kapiliaruose tūriai, η_v, η_k – vandens ir

kraujo klamos. Tokiu būdu galima nustatyti santykinę kraujo klampą vandens atžvilgiu. Pavyzdžiui, kraujo santykinė klampa (vandens atžvilgiu) lygi 5–6, o kraujo plazmos 1,5–2.

LABORATORINIS DARBAS

Skysčių klamos tyrimas

Darbo užduotis

- Nustatykite:
 - skysčio kinematinės klamos priklausomybę nuo temperatūros;
 - skysčio dinaminę klampą Stokso būdu.

Darbo priemonės ir prietaisai

Įrenginys kinematinėi klampai nustatyti ir jos priklausomybei nuo temperatūros tirti, sekundmatis, stiklinė kolba, guminė žarnelė, spaustukas, cilindras, slankmatis, mikrometras, įvairūs rutuliukai.

Darbo metodika

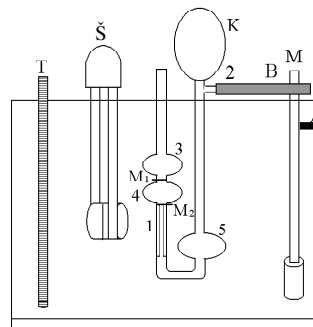
1. Skysčio kinematinės klamos priklausomybės nuo temperatūros tyrimas

Skysčio kinematinės klamos priklausomybė nuo temperatūros tiriama 5.1.11 paveiksle pavaizduotu įrenginiu. Jį sudaro U formos vamzdelis, kairiojoje šakoje kapiliaras (1), o dešiniojoje šakoje rezervuaras (5) tiriama skysčiui, šildytuvas (Š), maišyklė (M), termometras (T) (visos šios dalys yra stikliniame inde, užpildytame vandeniui), guminė kriaušė (K). Metaliniu spaustuku užspaudus atšakėlės (2) galą, guminės kriaušės (K) paspaudimais tiriamasis skystis kairiojoje šakoje pakeliamas iki pusės viskozimetro praplatėjimo (3). Nuėmus metalinį spaustuką nuo atšakėlės (2), kapiliaru pradeda tekėti tiriamasis skystis. Žinant skysčio tekėjimo tarp žymų M_1 ir M_2 vamzdelio susiaurėjimuose trukmę t , pagal (5.1.19) formulę galima apskaičiuoti skysčio kinematinę klampą.

Viskozimetro konstanta c yra užrašyta jo techniniame pase.

Darbo eiga

1. Stiklinis indas iki žymės A užpildomas vandeniui.
2. Pasižymima tiriamojo skysčio (alyvos) temperatūra. Šiuo atveju ji sutampa su stikliniame inde esančio vandens temperatūra.



5.1.11 pav. Prietaisas kinematinės klamos priklausomybei nuo temperatūros tirti

3. Metaliniu spaustuku užspaudžiama guminė žarnelė (B) ir guminės kriaušės paspaudimais tiriamasis skystis pakeliamas iš rezervuaro (5) iki pusės kapiliaro praplatėjimo (3).
4. Atleidus spaustuką, sekundmačiu išmatuojama skysčio tekėjimo tarp žymų M_1 ir M_2 trukmė t .
5. Įjungiamas šildytuvus ir palaukiama, kol temperatūra pakils 5°C . Po to kartojami 3 ir 4 punktai.
6. Toliau 3–5 punktai kartojami, keičiant temperatūrą $15\text{--}60^\circ\text{C}$ intervale.
7. Įrašius matavimo rezultatus į (5.1.19) formulę, visoms temperatūroms apskaičiuojama tiriamojo skysčio kinematinė klampa ν .
8. Duomenys surašomi į lentelę:

$T, ^\circ\text{C}$	t, s	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$

9. Nubraižomas priklausomybės $\nu = \nu(T)$ grafikas.

2. Skysčio dinaminės klamos nustatymas Stokso būdu

Skysčio klampa šiame darbe nustatoma Stokso būdu, kuris aprašytas 5.1.7 skyrelyje. Dinaminė klampa išreiškiama iš (5.1.13) formulės:

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_s}{v_0}. \quad (5.1.20)$$

Tačiau ji tinka tik tada, kai rutulėlis krinta neribotoje aplinkoje. Jei rutulėlis krinta išilgai ašies uždaro vamzdžio ar cilindro (5.1.8 pav.), kurio spindulys yra R , tai rutulėlio tolygaus kritimo greitis

$$v_0 = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_s}{\eta(1 + 2,4 r/R)}, \quad (5.1.21)$$

o dinaminė klampa

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_s}{v_0(1 + 2,4 r/R)}. \quad (5.1.22)$$

Darbo eiga

1. Svarstyklėmis nustatoma 10 ml talpos matavimo cilindro masė m_0 . Po to į jį pilamas tiriamasis skystis ir nustatoma cilindro su skysčiu masė m_1 . Tada randama skysčio masė m_s ($m_s = m_1 - m_0$) ir skysčio tankis ρ_s .
2. Mikrometru išmatuojamas rutulėlio skersmuo d ($r = d/2$) ir svarstyklėmis nustatoma jo masė m_r . Apskaičiuojamas rutulėlio tūris, o po to – tankis ($\rho = m/V$). Matavimai atliekami bent su trimis rutulėliais.

3. Rutulėlis įleidžiamas į skystį, ir sekundmačiu išmatuojamas laiko tarpas t_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), per kurį rutulėlis grimzta aukštį h . Matuojama ne nuo skysčio paviršiaus, o 2–3 cm giliau, tuomet rutulėlis grimzta pastoviu greičiu.
4. Slankmačiu išmatuojamas uždaro vamzdžio, kuriuo krinta rutulėliai, vidinis skersmuo D ($R = D/2$).
5. Įrašius į (5.1.22) formulę visų dydžių vertes, apskaičiuojamos dinaminės klampos vertės η_i ir matavimų bei skaičiavimų rezultatai surašomi į lentelę:

i	m_s , kg	ρ_0 , kg/m ³	d_p , m	r_p , m	$m_{r,i}$, kg	ρ_p , kg/m ³	t_i , s	η_i , Pa·s

6. Įvertinamas matavimų tikslumas.

5.2. Dujų klampumas

- Molekulinės kinetinės teorijos sąvokos.
- Dujų dėsniai.
- Tobulųjų dujų būsenos lygtis.
- Klampos reiškiniai skysčiuose ir dujose (žr. 5.1 skyrių).
- Klampos priklausomybė nuo temperatūros (žr. 5.1 skyrių).
- Molekulių vidutinis laisvasis lėkis ir jo priklausomybė nuo slėgio ir temperatūros.

5.2.1. Molekulinės kinetinės teorijos sąvokos

Molekulinė fizika tiria tokias medžiagos savybes, kurias sąlygoja jų molekulinė sudėtis. Dažniausiai pasitaikančiomis sąlygomis, t. y. kai slėgis nėra labai didelis, o temperatūra nėra labai maža, būtent molekulės yra tos sandaros dalelės, kurios lemia medžiagos būseną. Taigi molekulinė fizika tiria savybes kūnų, kurie sudaryti iš labai didelio skaičiaus labai smulkių dalelių. Tokią sistemą galima nagrinėti dviem būdais: *mikroskopiniu* ir *makroskopiniu*.

Mikroskopinis būdas yra *modelinis*. Nagrinėjamos pavienių molekulių savybės, jų judėjimo ir sąveikos dėsniai, kuriamas medžiagos sandaros modelis. Molekulių savybės sužinomos iš įvairių fizikos ir chemijos eksperimentų, o jų judėjimo dėsniai apibrėžiami remiantis tam tikromis prielaidomis. Po to *statistiniais* metodais nustatomos makroskopinių objektų savybės, kurias galima palyginti su stebimomis bandymuose. Esant galimybei palyginti su tikrove, galima prielaidas koreguoti.

Makroskopinis nagrinėjimo būdas yra *fenomenologinis* (gr. *phainomenon* – reiškinys). Tiriamas išorinis makroskopinių objektų savybių pasireiškimas, nustatomi svarbiausių parametru kitimo dėsningumai ir jų savitarpio priklausomybės. Parametru kitimo savitumus lyginant su bandymais kuriama bendra teorija.

Modelinis ir fenomenologinis medžiagos savybių tyrimo būdai vienas kitą papildo. Jeigu mikroskopinės teorijos išvados sutampa su makroskopiniais eksperimentų duomenimis, galima tikėti, kad mikroskopinės teorijos prielaidos yra teisingos. Kita vertus, mikroskopinė teorija išaiškina fenomenologinių dėsnių prasmę, parodo jų taikymo ribas ir kai kada nustato makroskopinių parametru vertes konkrečioms sąlygoms.

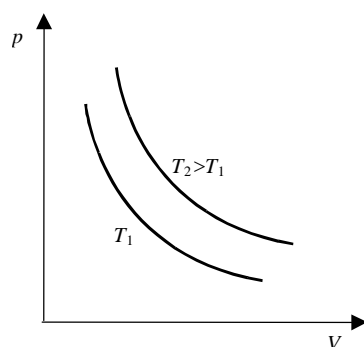
5.2.2. Dujų dėsniai

Dujų savybės svarbios daugumai mainų, vykstančių tarp gyvų organizmų ir aplinkos. Dujų dėsniais pirmiausia galima aprašyti oro pokyčius, svarbius aplinkos fizikai. Be to, jais galima remtis nagrinėjant vandens garų savybes. *Vandens garai* – tai dujos, kurios ypatingos reikšmės turi meteorologijai, hidrologijai ir ekologijai (plačiau žr. 5.4 skyrių), nors jų koncentracija atmosferoje palyginti maža.

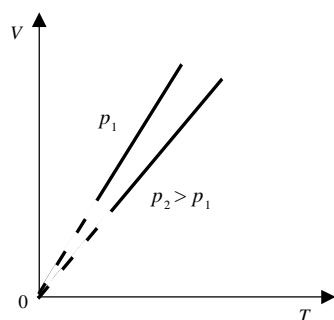
Aprašyti 5.1 skyriuje pagrindiniai hidrodinamikos dėsniai tam tikromis sąlygomis tinka ir dujoms. Tačiau dujos neišlaiko pastovaus tūrio, išsiskiria dideliu spūdumu, turi mažą dinaminę klampą – tuo jos skiriasi nuo skysčių. Tokias dujų savybes lemia silpna jų molekulių sąveika.

Dujos skirstomos į *realiąsias* ir *tobuląsias*. Pastarosiomis laikomos tokios dujos, tarp kurių molekulių nėra sąveikos jėgų, o molekulės yra labai maži tamprūs rutuliukai. Molekulėms susidūrus kinta tik jų greičio kryptis, o greičio didumas lieka nepakitęs. Dauguma realiųjų dujų, pavyzdžiui, oras ir jo komponentai, normaliomis sąlygomis (0°C, 760 mm Hg) nedaug skiriasi nuo tobulųjų dujų.

Tam tikros masės kiekvienų dujų būseną apibūdina *slėgis, tūris ir temperatūra*. Kintant vienam iš šių parametrų, kinta ir bent vienas iš likusiųjų. Tarp šių kitimų visada yra tam tikras ryšys. Vyksmai, kai iš trijų parametrų kinta tik du, o vienas lieka pastovus, vadinami *izovyksmais*. Bandytais buvo nustatyti trys izovyksmų dėsniai. Jie sudaro fenomenologinės tobulųjų dujų teorijos pagrindą.



5.2.1 pav. Izotermės



5.2.2 pav. Izobarės

1. *Izoterminis vyksmas* – tai slėgio kitimas kintant tūriui, kai temperatūra išlieka pastovi ($T = \text{const}$). Izoterminį vyksmą nusako *Boilio ir Marioto* dėsnis: pastovios temperatūros dujų slėgis atvirkščiai proporcingas jų užimamam tūriui. Matematiškai šis dėsnis užrašomas

$$pV = \text{const}, \quad (5.2.1)$$

o konstantos didumas priklauso nuo dujų prigimties, masės ir temperatūros. Grafiškai p ir V koordinatėse slėgio priklausomybė nuo tūrio, kai temperatūra pastovi, vaizduojama lygiaašė hiperbole (5.2.1 pav.). Ji vadinama *izoterme*. Tų pačių dujų didesnės temperatūros izotermės yra toliau nuo koordinatinių pradžių.

2. *Izobarinis vyksmas* – tai tūrio kitimas kintant temperatūrai, kai slėgis išlieka pastovus ($p = \text{const}$). Šis vyksmas nusakomas *Gei-Liusako* dėsniumi: kai slėgis pastovus, dujų tūris tiesiog proporcingas jų absoliučiajai temperatūrai:

$$\frac{V}{T} = \text{const}. \quad (5.2.2)$$

Ši konstanta priklauso nuo dujų prigimties, masės ir slėgio. Grafiškai V ir T koordinatėse tūrio priklausomybė nuo

temperatūros vaizduojama tiesė (5.2.2 pav.), kurios tęsinys į žemų temperatūrų pusę eina per koordinacių pradžią. Ši tiesė vadinama *izobare*. Tų pačių dujų didesnio slėgio izobarės yra arčiau temperatūrų ašies.

Izobarės susikerta koordinacių pradžioje tik teoriškai, nes absoliučiosios temperatūros nulis yra nepasiekiamas. Nepasiekiamą tokią būseną, kai molekulių šiluminis judėjimas visai sustoja ir dujų slėgis tampa lygus nuliui.

3. *Izochorinis vyksmas* – tai dujų slėgio uždarame inde ($V = \text{const}$) kitimas keičiant jų temperatūrą. Izochorinį vyksmą nusako *Šarlio* dėsnis: uždarame inde dujų slėgis tiesiog proporcingas jų absoliučiajai temperatūrai:

$$\frac{p}{T} = \text{const.} \quad (5.2.3)$$

Konstanta priklauso nuo dujų prigimties, jų masės ir tūrio. Grafiškai p ir T koordinatėse slėgio priklausomybė nuo temperatūros vaizduojama tiesė (5.2.3 pav.), kurios, kaip ir izobarių, tęsinys eina į koordinacių pradžią. Tiesė vadinama *izochore*. Tų pačių dujų didesnio tūrio izochorės yra arčiau temperatūrų ašies. Izochorių susikirtimas koordinacių pradžioje toks pats teorinis, kaip ir izobarių.

5.2.3. Tobulųjų dujų būsenos lygtis

Atsižvelgiant į dujų dėsnius, bet kokios dvi tų pačių dujų būsenos, nusakomos atitinkamai parametrais p_1, V_1, T_1 ir p_2, V_2, T_2 , yra susijusios lygybe

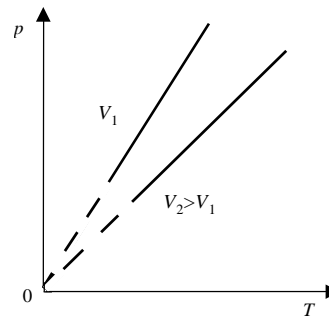
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (5.2.4)$$

Kadangi būsenos parinktos atsitiktinai, galima tvirtinti, kad, bet kaip kvazitolydžiai kintant tobulųjų dujų parametrams, jie visada susiję sąryšiu

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (5.2.5)$$

Šis sąryšis vadinamas *Klaiperono lygtimi*. Konstantos vertė nustatoma žinant tam tikro dujų kiekio bent vienos būsenos vertes p, V ir T .

Remiantis *Avogadro* dėsniu, vienodomis sąlygomis, t. y. esant tam pačiam slėgiui ir temperatūrai, vienoduose tūriuose yra vienodi skaičiai dujų molekulių nepriklausomai nuo dujų prigimties.



5.2.3 pav. Izochorės

Eksperimentais patvirtinta, kad vienas molis tobulųjų dujų normaliomis sąlygomis ($p_n = 1,013 \cdot 10^5$ Pa ir $T_n = 0^\circ\text{C} = 273,15$ K) užima $V_n = 22,41$ dm³ = $2,241 \cdot 10^{-2}$ m³ tūrį.

Tuomet vieno molio dujų (5.2.5) lygties konstanta

$$\frac{p_n V_n}{T_n} = R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K}) \quad (5.2.6)$$

Ji vadinama *universalioja dujų konstanta*. Skaitine verte ji lygi darbui, kurį atlieka izobariškai besiplėsdamas 1 mol dujų, kai temperatūra padidinama 1 K.

Bet kokiam dujų kiekiui (5.2.5) lygtis užrašoma taip:

$$pV = \frac{m}{M} RT; \quad (5.2.7)$$

čia m – dujų masė, M – jų molio masė, o santykis $m/M = \nu$ parodo molekulių skaičių. Tai yra *tobulųjų dujų būsenos lygtis*. Kartais ji vadinama Klauzijaus ir Klaiperono lygtimi. Iš šios lygties, laikant paeiliui kiekvieną iš trijų parametrų pastoviu, galima užrašyti visus tris izovoksnų dėsnius ir sužinoti tų dėsnių konstantų vertes.

Perrašius (5.2.7) lygtį taip, kad įeitų molekulių skaičius ν , ir dar padauginus ir padalijus iš Avogadro skaičiaus $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹, (5.2.7) virsta tokia:

$$p = \frac{\nu N_A}{V} \cdot \frac{R}{N_A} T;$$

čia νN_A yra bendras molekulių skaičius N , o $N/V = n$ – molekulių tankis,

$$\frac{R}{N_A} = k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

yra *Bolcmano* konstanta. Taip tiesiogiai iš dujų būsenos lygties gaunama lygtis

$$p = nkT, \quad (5.2.8)$$

kuri parodo, kad tobulųjų dujų slėgis yra ne tik tiesiog proporcingas absoliučiajai temperatūrai T , bet ir dujų molekulių tankiui n . Ši lygtis, užrašyta makroskopiniu fenomenologiniu būdu, yra susijusi su pagrindine *dujų kinetinės teorijos lygtimi*

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}; \quad (5.2.9)$$

čia m_0 – molekulės masė, $\overline{v^2}$ – vidutinis kvadratinis molekulės greitis. Ši priklausomybė buvo nustatyta mikroskopiniu modeliniu metodu. Čia vertėtų prisiminti statistinėje fizikoje įrodomą vidutinės kinetinės energijos tolygaus pasiskirstymo laisvės laipsniais dėsnį: bet kokios sistemos, esančios šiluminėje pusiausvyroje temperatūroje T , chaotiško judėjimo vidutinė kinetinė energija, tenkanti vienam laisvės laipsniui, lygi $1/2 kT$. Tobulųjų dujų molekulės turi tik tris slenkamojo

judėjimo laisvės laipsnius, todėl

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (5.2.10)$$

ir (5.2.9) virsta (5.2.8) lygtimi. Matyti, kad mikroskopiniu metodu užrašyta (5.2.9) lygtis patvirtina fenomenologiškai (bandymais) atrastą tobulųjų dujų būsenos (5.2.7) lygtį.

5.2.4. Dujų vidinė trintis (klampumas)

Dujoms judant, jose, kaip ir skysčiuose (žr. 5.1 skyrių), atsiranda vidinės trinties jėga. Ją galima apskaičiuoti pagal (5.1.6) formulę. Galima išreikšti ir dujų dinaminę klampą. Tegu dujose yra du sluoksniai A ir B (5.2.4 pav.), nutolę vienas nuo kito per 2λ ; čia λ – vidutinis molekulių laisvojo kelio ilgis (molekulių vidutinis laisvasis lėkis). Viršutinis sluoksnis slenka ašies x kryptimi greičiu v_1 , o apatinis – v_2 , ir $v_1 > v_2$; molekulių tankis abiejuose sluoksniuose vienodas ir lygus n . Pro plotą ΔS per laiko tarpą Δt abiem kryptimis pralėks toks pat molekulių skaičius:

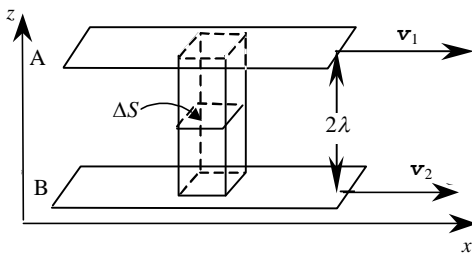
$$\Delta n = \Delta n_A = \Delta n_B = \frac{1}{6} n \overline{v} \cdot \Delta S \cdot \Delta t; \quad (5.2.11)$$

čia \overline{v} – vidutinis šiluminio judėjimo greitis.

Kadangi pereinančių iš sluoksnio A molekulių kryptingo judėjimo greitis v_1 yra didesnis negu sluoksnio B greitis v_2 , tai pirmąją kryptimi pernešamas didesnis judesio kiekis negu antrąją. Perneštų judesio kiekių $\Delta(mv)$ kryptimi z (statmena sluoksnių slinkimo kryptims) skirtumas

$$\Delta(mv) = \frac{1}{3} \overline{v} m n \lambda \left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| \Delta S \cdot \Delta t.$$

Iš čia trinties jėga (judesio kiekio pokytis per laiko vienetą)



5.2.4 pav. Brėžinys dujų dinaminės klampos formulėi išvesti

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{1}{3} \overline{v} m n \lambda \left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| \Delta S,$$

arba

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{1}{3} \overline{v} \rho \lambda \left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| \Delta S, \quad (5.2.12)$$

nes $nm = \rho$.

Palyginus šią lygtį su (5.1.6) lygtimi, matyti, kad dujų dinaminė klampa

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{v} \rho \lambda \quad (5.2.13)$$

Kadangi \bar{v} nepriklauso nuo dujų slėgio, dujų tankis ρ yra tiesiog proporcingas slėgiui ($\rho \sim p$), o molekulių vidutinis laisvasis lėkis λ atvirkščiai jam proporcingas ($\lambda \sim 1/p$), tai η turi nepriklausyti nuo dujų slėgio. Tyrimai šią išvadą patvirtino. Ji teisinga tik tol, kol molekulių vidutinis laisvasis lėkis yra mažesnis už indo, kuriuo teka dujos, tiesinius matmenis.

Vadinasi, dujų dinaminė klampa, kaip ir molekulių chaotiškojo judėjimo vidutinis greitis, tiesiogiai proporcinga kvadratinei šakniai iš absoliučios temperatūros.

Kūnui judant netekančių dujų atžvilgiu, taip pat pasireiškia dujų klampa. Kūno paviršius pasidengia labai plonu dujų sluoksniu, kuris juda kartu su kūnu ir kurio molekulės turi su kūno judėjimo greičiu susijusį judesio kiekį. Molekulėms chaotiškai judant, tarp šio sluoksnio ir gretimų dujų sluoksnių vyksta molekulių kaita ir judesio kiekis pernešamas lygiai taip pat kaip tarp skirtingais greičiais tekančių dujų sluoksnių. Dėl judesio kiekio pernešimo didžiausiu greičiu judantis dujų sluoksnis, kartu ir kūnas, prie kurio jis prilipęs, yra stabdomas.

Toliau apžvelgiami įvairūs su dujų klampa susiję reiškiniai.

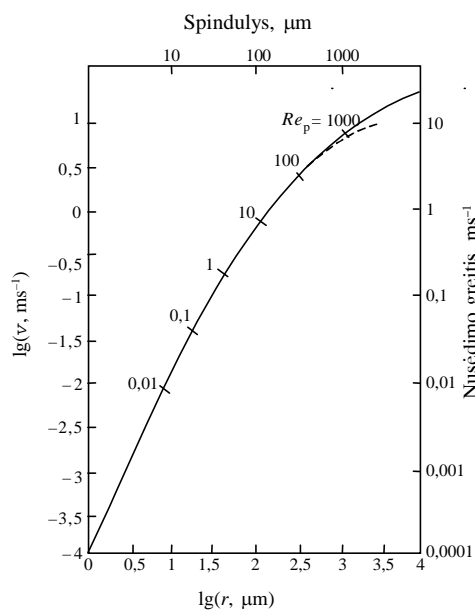
Dalelių pernaša. Mažos dalelės atmosferoje yra pernešamos dėl to paties vyksmo kaip ir dujų masės pernaša – tai turbulentinė difuzija. Dalelės yra inertiškos, todėl jos negali greitai reaguoti į greičiausius sukurių judėjimus, kaip kad dujų molekulės, bet esamam atmosferos turbulentiškumui tai nesvarbu. Tačiau esant dalelei arti paviršiaus, inertiškumas gali tapti svarbus, nes dėl oro srovės krypties greito kitimo jos gali nukristi ant kitų objektų. Kitas skirtumas nuo molekulių yra gravitacinių

jėgų svarba dalelėms.

Veikianti dalelę gravitacijos jėga yra dalelės sunkio ir jos išstumto oro sunkio skirtumas. Veikiama gravitacijos jėgos, dalelė juda pastoviu nusėdimo greičiu v_s , kai gravitacinė jėga susilygina su pasipriešinimo jėga. Dalelėms, kurioms tinka Stokso dėsnis (žr. 5.1 skyrių), t. y. toms, kurių $Re \leq 0,1$, nusėdimo greitis

$$v_s = 2\rho g r^2 / (9\rho_a \gamma);$$

čia γ – oro kinematinė klampa, r – dalelės spindulys, ρ – dalelės tankis, ρ_a – aplinkos tankis. Dalelėms, kurių $Re > 0,1$ reikia įskaityti pasipriešinimo koeficiento priklausomybę nuo Re . Esant $\rho = 1g/cm^3$ dalelių nusėdimo greičio priklausomybė nuo jų spindulio r pateikta 5.2.5 paveiksle. Stokso dėsnis galioja dalelėms, kurių $\rho = 1g/cm^3$ ir $r \leq 30 \mu m$. Tai tinka žiedadulkėms, sporoms ir



5.2.5 pav. Dalelių nusėdimo greičio priklausomybė nuo jų spindulio

kitiems gamtiniams aerozoliams. Lietaus lašelių (trūki linija 5.2.5 pav.), kai $r > 2$ mm, v_s artėja prie pastovios vertės, nes jie krisdami deformuojasi ir pasipriešinimas vis didėja.

Be šio aprašyto pastovaus judėjimo egzistuoja dar ir nepastovus judėjimas. Jis vyksta tada, kai dalelė yra papildomai veikiamą horizontalios krypties oro srauto. Šiuo atveju dalelė ne tik krinta žemyn, bet ir juda greičiu v_0 horizontalia kryptimi. Dėl tokio poveikio dalelė, palyginti su pradine horizontalia padėtimi, bus nupūsta atstumu l , vadinamu *stabdymo keliu*. Jis randamas iš lygties $l = v_0 \tau$; čia $\tau = m / 6\pi\eta r$ ir vadinama *relaksacijos trukme*. Nusėdimo greitis $v_s = \tau g$.

Dalelių nusodinimas. Dalelių nusodinimas ant objektų vyksta dėl difuzijos (Brauno judėjimo) ir jų susidūrimo. Jei dalelės masė ir inertiškumas yra maži, tai sutikusi kliūties ribinį sluoksnį, dalelė sustos arba aplenks kliūtį. Taip elgiasi muilo burbulai, paleisti pavėjui. Dalelės nusodinimo tikimybė priklauso nuo dalelės stabdymo atstumo l ir pasienio sluoksnio storio, kuris proporcingas kvadratinei šakniai iš matmens ir atvirkščiai proporcingas kvadratinei šakniai iš greičio. Todėl nusodinimo tikimybė didesnė ant mažų kliūčių ir esant dideliame oro srauto greičiui. Didelės masės dalelė lengvai pereina pasienio sluoksnį ir nusėda ant kliūties. Santykis l/r vadinamas *Stokso kriterijumi* ir žymimas *Stk*. Jis leidžia palyginti dalelių nusodinimą įvairiomis sąlygomis. Kitas svarbus dydis – susidūrimo efektyvumas, nusakomas santykiu susiduriančių dalelių su visu pereinančių per kliūties plotą dalelių skaičiumi, jei kliūties nebūtų. Susidūrimo efektyvumas priklauso nuo Stokso kriterijaus. Geras susidūrimo efektyvumas stebimas vandens lašeliams, kurių spindulys $r \sim 10$ μm atsitrenkiant į pušies spyglius, kurių storis ~ 1 mm, kai žemi debesys slenka per mišką. Šiuo atveju $Stk > 10$,

Ūkanos pagavimas ant voro tinklo vyksta dar efektyviau, nes lašeliai ($r = 10$ μm) yra daug didesni už tinklo siūlus, kurių $R = 0,1$ μm . Todėl bet kuris lašelis, pereidamas net atstumu, mažesniu arba lygiu r , yra sugaunamas. Šis procesas vadinamas *sugavimu*. Sugavimas yra svarbus procesas dalelėms, kurių matmenys lygūs kliūties matmenims ar didesni už juos, nusodinti.

Dalelių nusodinimui gali kliudyti atšokimas nuo kliūties, todėl gamtoje objektai, kurių paviršius yra minkštas, sugauna daleles geriau. Minkštas paviršius sugeria dalelės judesio momentą. Nusodinimo efektyvumo priklausomybės nuo dalelių kinetinės energijos tyrimai rodo, kad dalelė gerai sugaunama ant stiklo strypų, kai jos energija mažesnė kaip 10^{-12} J. Padidėjus energijai iki 10^{-11} J, sugavimo efektyvumas sumažėja beveik dviem eilėmis. Jei objektas yra lipnus, tai sugavimo tikimybė ir esant didesnėms energijoms yra artima vienetui. Dėl gamtinių objektų paviršiaus sandaros ypatumų pagavimo tikimybė didinant dalelės kinetinę energiją mažėja daug lėčiau. Šie tyrimai atlikti su dalelėmis, kurių $r > 10$ μm . Mažesnėms dalelėms sugavimo efektyvumas mažiau priklauso nuo paviršiaus lygumo.

Esant $r < 5$ μm nusėdimo greitis mažėja dėl to, kad mažėja sugavimo efektyvumas. Dalelių, kurių $r < 0,1$ μm , nusėdimas vyksta dėl Brauno judėjimo. Apibendrinta nusėdimo greičio priklausomybė nuo dalelės spindulio pateikta 5.2.5 paveiksle. Sugavimo procesai yra silpniausi 0,1–0,2 μm spindulio dalelėms, todėl žmogaus sukurti aerozoliai su tokio skersmens dalelėmis yra plačiai paplitę Žemės atmosferoje. Pavyzdžiui, SO_2 dalelės gali pasklisti dideliame plote, nes silpnai sugaunamos, ir tik padidėjusios dėl drėgmės poveikio iki 1 μm yra nusodinamos. Žmogui kvėpuojant, spindulio $r > 10$ μm dalelės efektyviai sugaunamos nosies gleivinėje, o $r = 1$ –10 μm dalelės patenka į bronchus ir gali nusėsti ant sienelių, $r < 1$ μm spindulio dalelės patenka į plaučius ir ten nusėda.

Paviršiaus trintis ir formos pasipriešinimas. Jėga, kuria oras veikia paviršių jo tekėjimo kryptimi, vadinama *paviršiaus trintimi*. Oro tekėjimas virš natūraliųjų paviršių paprastai yra daug sudėtingesnis negu teoriniu atveju. Tačiau kai kuriais atvejais greičio kitimas esant vėjui virš augalų lapų, orientuotų lygiagrečiai su srautu, atitinka teorinį modelį. Pavyzdys gali būti greičio kitimo ir turbulentiškumo atsiradimo išilgai lapo paviršiaus nagrinėjimas. Dėl lapo kreivumo ir priekinio krašto užlinkimo yra stebimas greičio kitimas (iškraipymas) bei turbulentiškumo atsiradimas. Krizinė Re reikšmė šiuo atveju yra $9 \cdot 10^3$, nors plokščio lygaus paviršiaus ji yra apie $2 \cdot 10^4$. Didinant greitį v arba turbulentiškumo lygį oro sraute, greitis atitinkamuose paviršiaus sluoksniuose, palyginti su v , didėja, o Re mažėja iki $1,9 \cdot 10^3$. Šios jėgos atsakingos už augalų sporų išbarstymą.

Be paviršinės trinties sukeltos jėgos ir judesio momento pernašos, įdėtą į dujų srautą kūną veikia jėga srauto kryptimi. Ši jėga yra žinoma kaip *aerodinaminis pasipriešinimas*, nes ji priklauso nuo kūno formos ir jo orientacijos. Maksimalų aerodinaminį pasipriešinimą patiria kūnai, orientuoti statmenai srauto kryptimi. Galima sakyti, kad toks kūnas oro srauto greitį sumažina nuo v iki 0. Tada maksimalus greitis, kuriuo judesio momentas gali būti perduodamas vienetiniam kūno plotui, yra $0,5\rho v^2$, tačiau turint omeny, kad srautas stengiasi aptekėti kliūtį, jis yra mažesnis ir išreiškiamas $0,5C_f\rho v^2$; čia C_f yra kūno formos faktorius.

Dažniausiai šios abi jėgos yra sumuojamos į vieną jėgą τ , veikiančią vienetinį plotą srauto tekėjimo kryptimi, t. y. lygią $2rl$ (r spindulio ir l aukštinės cilindro) ir πr^2 sferos. Santykis $\tau/(0,5\rho v^2)$ apibūdina bendrą pasipriešinimo koeficientą C_d (cilindro ir sferos, orientuotų stačiu kampu į srovę, jis yra tarp 0,4 ir 1,2, kai Re skaičiai yra nuo 10^2 iki 10^5). Tinkamai parinkus kėbulų formą, greitų automobilių pasipriešinimo koeficientas sumažinamas iki $\sim 0,3$.

Vykstant atmosferos judėjimui, visi gamtiniai paviršiai – pavieniai lapai, augalai, medžiai, javai, dirvožemis, vanduo – veikiami tam tikrų jėgų. Atitinkamai kiekvienas objektas arba paviršius tokio pat didumo, bet priešingos krypties jėga veikia atmosferą. Šių jėgų didumas priklauso nuo judesio momento perdavimo tarp oro ir paviršiaus. Momento perdavimas visada susijęs su vėjo šlytimi: vėjo greitis objekto paviršiuje yra lygus nuliui ir didėja didėjant atstumui nuo paviršiaus. Izoliuoti objektai, pavyzdžiui, pavieniai augalai ar medžiai, linkę turėti labai neįprastus ribinius sluoksnius ir iškraipyti atmosferos judėjimą. Lygus žemės paviršius ir vienodos vegetacijos augalai orui judant generuoja sūkurius.

Jei turbulentiškumas yra stiprus, lapai virpa (plasnoja). Matavimai rodo, kad charakteringas skersmuo sūkurių, sukuriamų d skersmens cilindru, yra apie $5d$, kai $Re > 200$. Sūkuriai, sukurti lapų ar stiebų, suskyla, formuodami vis mažesnius ir mažesnius sūkurius, lėtai nešamus pasroviui ir įsiskverbiančius į kitų lapų ir stiebų paviršinius sluoksnius.

Lapų paviršiaus pasipriešinimas gali padidėti dėl lapų paviršiaus nelygumų ir dėl ten esančių plaukelių. Taip pridėjus tikrą kviečio lapą prie jo aliumininės kopijos, pasipriešinimas padidėja 20 %, kai vėjo greitis yra 1,5 m/s, ir 50 %, kai vėjo greitis lygus 0,5 m/s, nes tai sąlygoja didėjimą paviršiaus trinties, kuri svarbi esant mažoms v vertėms. Realiai gyvenime labai retai egzistuoja aerodinaminė izoliacija, ir lapijos pasipriešinimo koeficientas priklauso nuo jos tankio bei vėjo greičio.

LABORATORINIS DARBAS

Dujų klampos tyrimas

Darbo užduotis

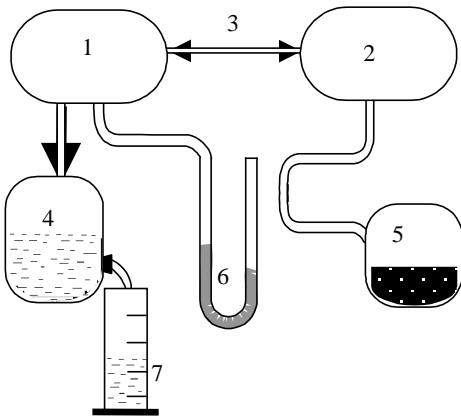
- Nustatykite oro dinaminę klampą ir molekulių vidutinį laisvąjį lėkį.

Darbo priemonės ir prietaisai

Sekundmatis, manometras, matavimo cilindras ir prietaisai oro klampos koeficientui matuoti.

Darbo metodika

Prietaisai oro klampai matuoti (5.2.6 pav.) sudarytas iš indų (1) ir (2), sujungtų kapiliaru (3), kurio ilgis yra l , o spindulys lygus r . Indas (1) sujungtas su vandens pripildytu indu (4). Indas (2) sujungtas su indu (5), užpildytu drėgmę sugeriančia medžiaga. Slėgių skirtumą kapiliaro galuose matuoja manometras (6).



5.2.6 pav. Prietaiso oro klampai matuoti struktūrinė schema

Klampa pasireiškia, kai oras slenka iš indo (2), kuriame slėgis lygus atmosferiniam, per kapiliarą (3) į kitą indą (1), kuriame slėgis mažesnis dėl ištekancio iš indo (4) vandens. Ištekėjusio vandens tūris matuojamas matavimo cilindru (7).

Dujų arba skysčių sluoksniai, slinkdami vienas kito atžvilgiu, veikia vienas kitą klampos arba vidinės trinties jėga ((5.1.6) ir (5.2.12) formulės).

Puazeilis apskaičiavo, kad kapiliarinio vamzdelio, kurio spindulys yra R ir ilgis l , galuose slėgių skirtumui esant Δp , per laiką t ištekėjusio skysčio, kurio dinaminė klampa lygi η , tūris (žr. (5.1.15) formulę) yra

$$V = \frac{\pi R^4 t}{8\eta l} \Delta p. \quad (5.2.14)$$

Vandens manometru išmatavus vamzdžio galuose slėgių skirtumą, gaunama

$$\Delta p = \rho g \Delta h; \quad (5.2.15)$$

čia Δh – manometro skysčio stulpelio aukščių skirtumas, ρ – manometro skysčio tankis, g – laisvojo kritimo pagreitis.

Iš (5.2.15) ir (5.2.14) lygybių plaukia

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho t g \Delta h}{8Vl}. \quad (5.2.16)$$

Molekulinėje kinetinėje dujų teorijoje dinaminė klampa η yra susijusi su dujų tankiu, kuris iš Klauzijaus ir Klapeirono lygties

$$\rho = \frac{Mp}{RT}, \quad (5.2.17)$$

molekulių vidutiniu šiluminio judėjimo greičiu

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (5.2.18)$$

ir molekulių vidutiniu laisvuju lėkiu λ ((5.2.13) formulė).

Nustačius dinaminę klampą η , atmosferos slėgį p , temperatūrą T ir žinant oro molio masę $M = 1,29 \cdot 10^{-3}$ kg/mol, įvertinamas vidutinis oro molekulių laisvasis lėkis

$$\lambda = \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (5.2.19)$$

Darbo eiga

1. Matavimų įrenginys paruošiamas tyrimams: į indą (4) įpilamas vanduo. Atsukus čiaupą palaukiama, kol nusistovės manometro rodmenys. Tuo metu vanduo teka į atsarginį indą.
2. Nusistovėjus slėgių skirtumui vamzdelio galuose, po ištekantčio vandens čiaupu pastatomas matavimo cilindras skysčio tūriui V matuoti. Prieš užsukant čiaupą užsirašomos manometro stulpelių aukščių skirtumo Δh vertės, o po 3–5 minučių čiaupas užsukamas ir užrašomos pritekėjusio vandens tūrio V , laiko t vertės.
3. Pagal (5.2.16) formulę apskaičiuojama dinaminė klampa η . (Kapiliario duomenys l ir r pateikiami prietaiso apraše.)
4. 2–3 užduotys kartojamos ne mažiau kaip tris kartus. Apskaičiuojama dinaminės klamos vidutinė vertė.
5. Termometru ir barometru išmatuojama aplinkos temperatūra T ir slėgis p .
6. Pagal (5.2.19) formulę apskaičiuojamas molekulių vidutinis laisvasis lėkis λ .

5.3. Tirpalų paviršiaus įtempimas

-
- Skysčio agregatinė būseną (žr. 5.1 skyrių).
 - Skysčių molekulinis slėgis ir paviršiaus įtempimas.
 - Paviršiaus įtempimo koeficiento fizikinė prasmė, jo matavimo vienetai.
 - Pusiausvyros sąlygos terpių skiriamos riboje.
 - Skysčio laisvojo paviršiaus kreivumo įtaka slėgiui. Laplaso formulė.
 - Tirpalų paviršiaus įtempimas.
 - Kapiliariniai reiškiniai.
 - Paviršiaus įtempimo koeficiento matavimo būdai.
-

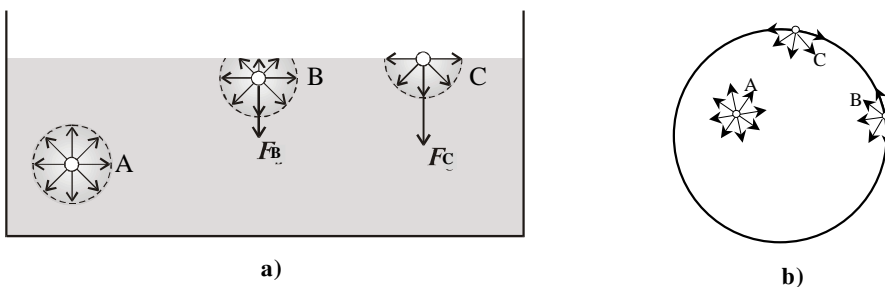
5.3.1. Skysčių paviršiaus įtempimas

Skystis visada įgauna tokią formą, kuri atitinka jį veikiančias jėgas (žr. 5.1.2 skyrelį). Todėl skysčiui esant uždarame inde, normaliomis Žemės traukos sąlygomis atsiranda aiški riba, skirianti dvi medžiagos būsenas – dujas (garus) ir skystį. Tokios pat temperatūros dujų tankis paprastai daug mažesnis negu skysčio tankis. Tačiau esant pakankamai aukštai temperatūrai, didesnei negu vadinamoji *krizinė temperatūra*, būdinga kiekvienam skysčiui (vandens ji yra 374 K), skysčio savybės nesiskiria nuo stipriai suspaustų dujų ir aiški būsenų skiriamoji riba išnyksta. Atradus krizinę temperatūrą, tapo aišku, kodėl ilgą laiką nepavykdavo paversti skysčiu kai kurių dujų, pavyzdžiui, deguonies ir vandenilio. Jų krizinė temperatūra labai žema ($T_{O_2} = -118^\circ\text{C}$, $T_{H_2} = -240^\circ\text{C}$). Norint šias dujas paversti skysčiu, reikia jas atšaldyti iki temperatūros, žemesnės už krizinę.

Pagrindinės skysčių ypatybės normaliomis sąlygomis yra gebėjimas išlaikyti tūrį ir laisvojo paviršiaus egzistavimas. Prie tūrinių skysčio savybių priskiriami, pavyzdžiui, šiluminis plėtimasis ir spūdimas. Šiame darbe išnagrinėjami kai kurie paviršiniai reiškiniai, t. y. tokie, kuriuos lemia skysčio laisvasis paviršius.

Skysčio, besiliečiančio prie kitos terpės, pavyzdžiui, jo paties garų, kito skysčio arba kietojo kūno (tarp jų ir indo, kuriame jis yra, sienelių), paviršius yra ypatingose, palyginti su kita skysčio mase, sąlygose. Galima palyginti skysčio molekulių B ir C, esančių arti skysčio ir dujų ribos, būseną su būsena molekulės A, esančios toli nuo šios ribos, skysčio viduje (5.3.1 pav., a). Molekulė skysčio viduje iš visų pusių apsupta kitų molekulių. Traukos jėgos, kurios veikia iš šalia esančių molekulių pusės, tarpusavyje kompensuojasi. Tuo tarpu molekulę, besiribojančią su dujomis, skysčio molekulės supa tik iš vienos pusės, o iš dujų pusės molekulių daug mažiau. Tokiu atveju visų jėgų suma sudaro atstojamąją, nukreiptą į skysčio vidų. Suradę šių jėgų, veikiančių visas paviršiaus molekules, atstojamąją ir padaliję iš ploto, kuriame išsidėsčiusios paviršinės molekulės, gautume vadinamąjį *molekulinį slėgį*, kuriuo paviršiaus sluoksnis veikia visą skysčio masę. Skysčių molekulinis slėgis yra didelis, pavyzdžiui, vandens jis siekia iki $11 \cdot 10^8$ Pa ir pan. Dėl šios priežasties skysčiai yra sunkiai suslegiami – norint pastebimai sumažinti jų tūrį, reikia veikti išoriniu slėgiu, kurio didumas prilygtų molekuliniam slėgiui.

Be jėgų, nukreiptų į skysčio vidų, paviršiaus sluoksnio molekules veikia ir gretimos molekulės paviršiaus liestinės kryptimi. Įsivaizduokime skysčio paviršius, kurį sudaro apskritas vienos molekulės storio plotelis (5.3.1 pav., b). Kiekvieną molekulę, esančią plotelio viduje ne ties jo kontūru, veikiančių jėgų atstojamoji yra lygi nuliui (molekulė A). Tačiau molekules, kurios išsidėsčiusios išilgai plotelį ribojančio kontūro (B, C), veikia atstojamoji jėga, nukreipta į plotelio vidų. Taigi



5.3.1 pav. Jėgos, veikiančios molekules skysčio viduje (a) ir horizontalia kryptimi paviršiuje (b)

molekulinės jėgos, veikiančios į plotelio vidų, stengiasi šį plotelį sumažinti. Tos jėgos vadinamos *paviršiaus įtempimo jėgomis*. Paviršiaus įtempimo jėga F yra proporcinga plotelio kontūro ilgyje esančių molekulių skaičiui, kuris savo ruožtu proporcingas paviršiaus kontūro ilgiui l ; vadinasi,

$$F = \sigma l. \quad (5.3.1)$$

Proporcingumo koeficientas σ priklauso nuo skysčio prigimties ir vadinamas *paviršiaus įtempimo koeficientu*. Jei $l = 1$ m, iš (5.3.1) formulės gauname, kad $\sigma = F$, t. y. paviršiaus įtempimo koeficientas išreiškia jėgą, kuri veikia paviršiaus liestinės kryptimi 1 m ilgio paviršiaus kontūrą.

Norint pervesti molekulę iš vidinių sluoksnių į paviršių, reikia įveikti molekulinį slėgį. Kitaip sakant, kiekviena molekulė, esanti arti skysčio paviršiaus, palyginti su molekulėmis, esančiomis skysčio viduje, turi tam tikrą potencinės energijos perteklių. Kuo didesnis skysčio paviršius, tuo didesnis skaičius molekulių turi šią perteklinę potencinę energiją. Taigi tam tikros skysčio masės paviršiaus pokytis dS , esant tam tikrai temperatūrai, sukuria paviršinės energijos pokytį

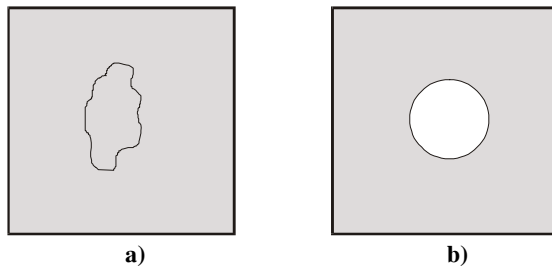
$$dU_S = \sigma dS; \quad (5.3.2)$$

čia koeficientas σ yra tas pats *paviršiaus įtempimo koeficientas*. Vadinasi, paviršiaus įtempimo koeficientas σ gali būti matuojamas darbu, kurį reikia atlikti norint padidinti skysčio paviršiaus plotą vienu ploto vienetu, esant pastoviai temperatūrai. Jo SI matavimo vienetas yra N/m arba J/m². Jeigu skysčio paviršius keičiamas adiabiškai, tai jo temperatūra pakinta. Pavyzdžiui, padidinus skysčio paviršių, skystis atšąla.

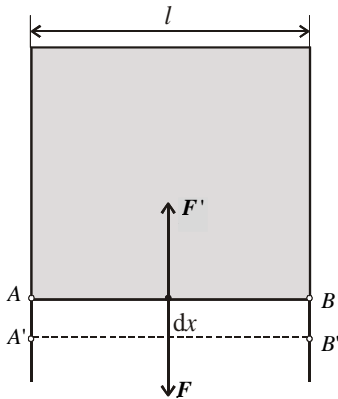
Kadangi molekulės siekia pereiti iš skysčio paviršiaus į jo gilumą, skysčio paviršius stengiasi susitraukti, todėl išilgai paviršiaus veikia *paviršiaus įtempimo jėgos*. Dėl to skystis įgauna tokią formą, kad jo laisvasis paviršius būtų kiek galima mažesnis. Visų pirma tai matyti iš apvalios formos, kurią įgauna maži skysčio lašeliai: gyvsidabrio lašai ant horizontalios stiklinės plokštelės, vandens lašai ant įkaitusios krosnies, ant dulkėto kelio ir pan. Visais šiais atvejais skysčio molekulių sąveika su kietuoju kūnu, ant kurio yra lašai, yra maža, palyginti su jėgomis, veikiančiomis tarp skysčio dalių. Todėl skysčio polinkis sumažinti savo paviršių aiškiai matomas: sferinė lašelių forma atitinka jų mažiausią paviršių. Kai lašelių matmenys maži, sunkio jėgos įtaka lašelių formai nedidelė. Nesvarumo sąlygomis sferinis „lašas“ gali turėti matmenis, daug didesnius negu įprasti skysčio lašai.

Tuo atveju, kai skystis egzistuoja plonų plėvelių pavidalu, galima nepaisyti potencinės energijos tūrinės dalies. Tokios būsenos reiškiniai, susiję su paviršiaus įtempimu, yra paties paprasčiausio ir aiškiausio pavidalo, kadangi jiems nedaro įtakos efektai, sukelti kūnų tūrinių savybių. Paviršiaus

įtempimo egzistavimą galima vaizdžiai pademonstruoti naudojant muilo plėveles. Pavyzdžiui, ant vielinio karkaso padedame kilpą iš siūlo (5.3.2 pav.). Kol muilo plėvelė kilpos viduje yra vientisa, kilpa gali būti bet kokios formos (5.3.2 pav., a). Bet plėvelė kilpos viduje pradūrus taip, kad skysta plėvelė liktų tik tarp siūlo iš išorinės vielos, paviršiaus įtempimo jėgos veikiamas siūlas įgauna apskritimo formą (5.3.2 pav., b).



5.3.2 pav. Siūlo kilpa muilo plėvelėje



5.3.3 pav. Rėmelis su judančia kraštine ir muilo plėvele

Plėvelės siekis susitraukti iki mažiausių galimų matmenų paaikšina muilo burbulų rutulinę formą. Tuo pačiu skysčio paviršiaus sumažėjimu nusistovint pusiausvyrai galima paaikinti taip pat ir šlapių smiltelių bei šlapių plaukų sulipimą. Kai plaukų šepetys panardintas į vandenį, šepetio plaukai yra išsisklaidę. Ištraukus šepetį iš vandens, plaukai sulimpa. Kai plaukai sulipę, juose esantis vanduo turi mažesnę paviršių, negu kai plaukai išsisklaidę.

Paėmus stačiakampį vielos rėmelį, kurio viena ilgio l kraštinė galėtų judėti likdama lygiagrečiai su savo pradine padėtimi (5.3.3 pav.), ir panardinus jį į muilo tirpalą, rėmelis apsitraukia muilo plėvele, iš abiejų pusių apribota paviršinio sluoksnio. Bandyamas rodo, kad plėvelė stengiasi susitraukti, ir judri kraštinė AB ima judėti. Norint sustabdyti kraštinės judėjimą, ją reikia veikti jėga F , kuri atsvertų jėgą F' , veikiančią

kraštinę iš muilo plėvelės pusės. Padidinus jėgą F nykstamai mažu dydžiu, kraštinė lėtai perkeliama jėgos F kryptimi atstumu dx . Taigi jėga F atlieka darbą $A = Fdx$. Dėl to paviršiaus sluoksnio plotas padidėja dydžiu $dS = 2l dx$ (paviršinis sluoksnis padidėja iš abiejų plėvelės pusių), kartu paviršinė energija padidėja $dUs = 2l\sigma dx$. Prilyginus $dA = dUs$, gaunama lygybė

$$\sigma = F / 2l, \quad (5.3.2a)$$

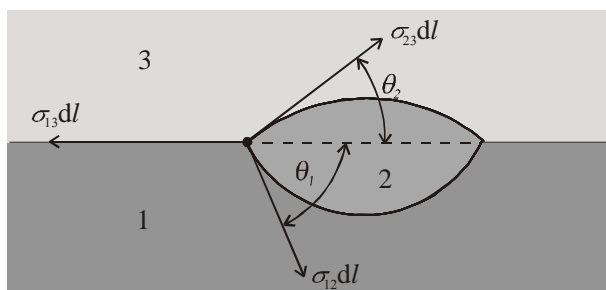
iš kurios galima įvertinti σ didumą.

Paviršiaus įtempimo koeficiento apibrėžtį dar reikia papildyti nurodant terpę, su kuria skystis ribojasi. Taip daroma dėl to, kad paviršinio sluoksnio molekulės veikia tarpmolekulinės jėgos ir iš nagrinėjamo skysčio molekulių pusės, ir iš aplinkinės terpės molekulių pusės. Darbas, kurį reikia atlikti norint ištraukti molekulę iš vidinių skysčio sluoksnių į jo paviršių, kartu ir paviršiaus įtempimas, priklauso ne tik nuo paties skysčio, bet ir nuo terpės, su kuria jis ribojasi. Lentelėse paprastai pateikiamos skysčio, besiribojančio su oru arba jo paties sočiaisiais garais, paviršiaus įtempimo koeficiento vertės. Pavyzdžiui, besiribojančio su oru, esant 0°C temperatūrai, vandens paviršiaus įtempimo koeficientas yra $75,7 \text{ mN/m}$, o su sočiaisiais garais – $73,2 \text{ mN/m}$. Taip pat galima apibrėžti dviejų nesimaišančių skysčių arba skysčio ir kietojo kūno skiriamosios ribos paviršiaus įtempimo koeficientą.

5.3.2. Pusiausvyros sąlygos terpių skiriamosioje riboje

Trijų terpių tarpusavio ribos pavyzdys gali būti skysčio lašas ant kito tankesnio skysčio paviršiaus (5.3.4 pav.). Pažymėjus ilgio elementą, nukreiptą išilgai trijų terpių (1, 2, 3) lietimosi linijos, dl , šį elementą veikiančios paviršiaus įtempimo jėgos užrašomos kaip $\sigma_{12}dl$, $\sigma_{23}dl$, $\sigma_{13}dl$. Elementas dl nukreiptas statmenai brėžinio plokštumai. Jei $\sigma_{13} < \sigma_{12} + \sigma_{23}$, tai pusiausvyra nusistovi taip, kaip parodyta 5.3.4 paveiksle. Pusiausvyros sąlyga yra tokia, kad atstojamosios jėgos, veikiančios elementą dl , projekcijos į ašis, nukreiptas išilgai ir skersai terpių (1, 3) skiriamosios plokštumos, turi būti lygios nuliui:

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} \cos \theta_1 + \sigma_{23} \cos \theta_2, \quad \sigma_{12} \sin \theta_1 = \sigma_{23} \sin \theta_2. \quad (5.3.3)$$



5.3.4 pav. Lašo pusiausvyros sąlygos dviejų skysčių riboje

Iš sistemos (5.3.3) galima nustatyti kampus θ_1 ir θ_2 , vadinamus *sąlyčio kampais*. Tuo tarpu, jeigu $\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23}$, parodyto pavidalo pusiausvyra yra neįmanoma, ir lašas (2) pasklinda visu skysčio (1) paviršiumi plonu molekulinio sluoksniu. Kaip pavyzdį galima nurodyti benzino arba žibalo plėvelę ant vandens paviršiaus. Paprastai tokios plėvelės spindi vaivorykštės spalvomis dėl šviesos interferencijos. Tokiu atveju sakoma, kad skystis (2) visiškai drėkina skystį (1) arba atvirkščiai.

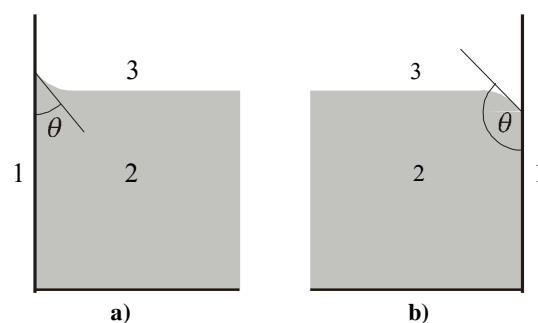
Norint ištyrinėti pusiausvyros sąlygas skysčio ir kietojo kūno riboje, reikia (5.3.3) lygtyse kampą θ_1 laikyti lygiu nuliui ($\theta_1 = 0$), nes kietasis kūnas pastebimai nesideformuoja. Paviršiaus įtempimo jėgų atstojamąją atsveria statmenosios slėgio, arba įtempimo, jėgos skysčio ir kietojo kūno riboje. Kampą θ_2 galima žymėti θ . Todėl šiuo atveju reikia sąlygos, kad būtų lygi nuliui bendros jėgos dedamoji liestinės kryptimi

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23} \cos \theta. \quad (5.3.4)$$

Iš čia lengvai randama sąlyčio kampo išraiška:

$$\theta = \arccos [(\sigma_{13} - \sigma_{12}) / \sigma_{23}]. \quad (5.3.5)$$

Kampas paprastai parenkamas taip, kad apimtų sritį, kurią užima skystis (2). Kai $(\sigma_{13} - \sigma_{12}) / \sigma_{23} > 1$, (5.3.4) sąlyga negali būti tenkinama. Tada lašas (2) yra ne pusiausvyros būsenos, o išplinta kietojo kūno paviršiumi, padengdamas jį plona plėvele. Tuo atveju sakoma, kad skystis visiškai drėkina kietojo kūno paviršių. Kitu ribiniu atveju, kai $(\sigma_{13} - \sigma_{12}) / \sigma_{23} < -1$, taip pat joks kampas netenkina (5.3.4) sąlygos. Skystis susitraukia į sferinį lašą, šiek tiek susiplojusį dėl sunkio jėgos. Pavyzdys gali būti gyvsidabrio lašas ant švaraus stiklo paviršiaus arba vandens lašas ant parafino paviršiaus. Tuo atveju sakoma, kad skystis visiškai nedrėkina kietojo kūno paviršiaus. Dažniausiai tik iš dalies drėkinama ($0 < \theta < \pi/2$) arba iš dalies nedrėkinama ($\pi/2 < \theta < \pi$). Dalinio drėkinimo reiškinys pastebimas prie indų sienelių, kai induose pripilta skysčio (5.3.5 pav.). Sąlyčio kampo θ didumas nustatomas pagal (5.3.5) formulę.



5.3.5 pav. Sąlyčio kampai, kai skystis drėkina (a) arba nedrėkina (b) indo sienelės

Akivaizdu, kad drėkinimas ir nendrėkinimas yra santykinės sąvokos: skystis, drėkinantis vieną kietąjį kūną, gali nendrėkinti kito kietojo kūno. Pavyzdžiui, vanduo drėkina stiklą, bet nendrėkina parafino. Gyvsidabris nendrėkina stiklo, bet drėkina varį ir pan.

Drėkinimo ir nendrėkinimo reiškiniai turi didelę reikšmę gamtoje ir technikoje. Pavyzdžiui, vanduo nendrėkina augalų lapų ir stiebų dėl juos dengiančio plono į vašką panašių apnašų sluoksnio. Kaip tik todėl per lietu nesušlampa medžių lapai, šieno kaugės, šiaudų stiebai ir pan. Vandens telkiniuose vandens paviršiaus plėvele laisvai bėgioja ir šokinėja vabzdžiai – čiuožikai. Galima atsargiai padėti ant vandens lengvą aliumininę kelių centų monetą, ir ji, šiek tiek įlenkusi paviršinę plėvelę, liks ant jos gulėti. Alavuojuojant, lituojant ir virinant metalus, taip pat kljuojant įvairius kietuosius kūnus, pirmiausia reikia gerai paviršius drėkinti. Geras drėkinimas dažikliais užtikrina sėkmingą audinių ir keraminių dirbinių dažymą. Muilo naudojimas skalbiant taip pat pagrįstas drėkinimo reiškinium. Aprasojus akinių stiklams, pro juos nesimato. Tačiau matyti trukdo ne tai, kad stiklas padengtas vandeniu, o tai, kad jį dengiantis vanduo yra šviesą išsklaidančių lašelių pavidalo. Norint išvengti lašelių susidarymo ant stiklo, reikia kruopščiai nuvalyti riebalus, padengti specialiu laku ir kt., kad vanduo galėtų drėkinti stiklą.

Įdomu pažymėti, kad nesvarumo sąlygomis dėl drėkinimo reiškinio vanduo uždarame stikliniame inde pasiskirsto prie jo visų sienelių, o oras susikaupia indo vidurinėje dalyje. Aprašytas reiškinys pirmą kartą eksperimentiškai buvo nustatytas dar 1962 metais kosminių laivų skrydžių metu.

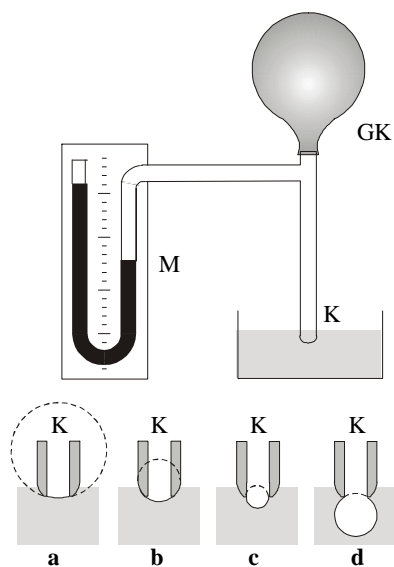
5.3.3. Skysčio laisvojo paviršiaus kreivumo įtaka slėgiui. Laplaso formulė

Kokią reikšmę turi skysčio paviršiaus kreivumas? Lengva pastebėti, kad jėgos, susijusios su paviršiaus įtempimu ir nukreiptos skysčio paviršiaus liestinės kryptimi, išgaubto paviršiaus atveju sukelia papildomą slėgį toje paviršiaus pusėje, į kurią jis nukreiptas savo įgaubtumu. Bandymas atliktas su prietaisu, parodytu 5.3.6 paveiksle. Siauras vamzdelio (K) galas įleistas į skystį nedideliame gylyje. Spaudžiant guminę kriaušę (GK), vamzdelio su kriauše viduje sukuriama aukštesnis slėgis, matuojamas manometru (M). Didėjant slėgiui vamzdelyje, išpučiamo burbuliuko spindulys vis mažėja (5.3.6 pav., a, b, c). Toliau spaudžiant kriaušę, pasiekama tokia padėtis, kad burbuliuko spindulys pradeda didėti (5.3.6 pav., d), o manometras rodo slėgio sumažėjimą.

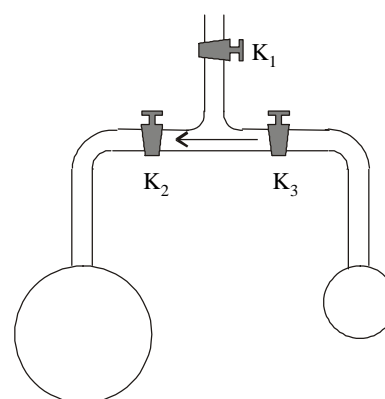
Toliau galima panagriniėti du muilo burbulus, išpūstus trišakiu vamzdžiu su vožtuvais K_i , $i = 1, 2, 3$ (5.3.7 pav.). Iš pradžių kiekvienas burbulas išpučiamas atskirai. Po to vožtuvas (K_1) užsukamas, o vožtuvai (K_2) ir (K_3) atsukami. Tada oras iš mažesnio burbulio teka į didesnį, kuris didėja tol, kol mažasis išnyksta. Vadinasi, muilo plėvelė sukuria dujų slėgį, ir tuo didesnį, kuo mažesnis jos kreivumo spindulys.

Galima išvesti formulę papildomam slėgiui, sukuriama skysčio sferinio paviršiaus, skaičiuoti. Tuo tikslu reikia nagrinėti sferinį muilo burbulą. Papildomą dujų slėgį p' atmosferos atžvilgiu sferos viduje atsveria burbulio sienelių slėgis, atsiradęs dėl paviršiaus įtempimo. Padidinus slėgį burbulio viduje, jo spindulys padidėja dydžiu dr ir tuo metu atliekamas darbas $dA = 4\pi r^2 p' dr$, kuris virsta burbulio paviršiaus laisvąja energija σdS . Čia dS yra vidinio ir išorinio muilo burbulų paviršiaus padidėjimų suma, t. y. $dS = 2 \cdot d(4\pi r^2) = 2 \cdot 8\pi r dr$. Atsižvelgiant į tai, kad slėgį burbulio viduje sukuria du išgaubti paviršiai, vienas paviršius sukuria du kartus mažesnę slėgį

$$p = p' / 2 = 2\sigma / r. \quad (5.3.6)$$



5.3.6 pav. Burbulų pūtimo prietaisas ir burbulų spindulio priklausomybė nuo slėgio (a, b, c, d)



5.3.7 pav. Muilo burbulai, išpūsti trišakiu vamzdžiu

Bet kokio (ne sferos) paviršiaus kreivumas apibūdinamas dviem pagrindiniais kreivumo spinduliais r_1 ir r_2 . Pagrindiniai spinduliai yra kreivumo spinduliai kreivių, kuriomis kerta paviršių dvi jam ir viena kitai statmenos plokštumos. Papildomas slėgis nusakomas lygybe.

$$p = \sigma(1/r_1 + 1/r_2), \quad (5.3.7)$$

kuri vadinama *Laplaso formule*. Iš formulės matyti, kad esant mažiems kreivumo spinduliams Laplaso slėgis gali būti didelis. Pavyzdžiui, kai spindulys yra $1 \mu\text{m}$, papildomas slėgis oro burbuliuke, esančiame vandenyje, lygus $1,42 \cdot 10^5 \text{ Pa} \approx 1,4 \text{ at}$.

5.3.4. Tirpalų paviršiaus įtempimas

Kuo paremta galimybė lengvai pūsti muilo burbulus ir kodėl niekada nepavyksta to padaryti su grynu vandeniu? Muilo tirpalo paviršiaus įtempimas labai mažas (klampumas didelis). Muilas priklauso vadinamųjų *paviršinio aktyvumo medžiagų*, kurios adsorbuojamos ant terpių skiriamosios ribos, klasei. Jų net nedidelės koncentracijos priemaiša labai sumažina paviršiaus įtempimą. Tokių medžiagų molekulės visų pirma patenka į paviršinį sluoksnį ir tik tada, kai jis tampa jomis pakankamai tankiai užpildytas, prasiskverbia į pagrindinį skysčio tūrį. Vandens atžvilgiu prie paviršinio aktyvumo medžiagų priskiriama nafta, spiritas, eteris, muilas ir kitos. Pavyzdžiui, vandenyje ištirpintas muilas sumažina jo paviršiaus įtempimą nuo $0,073$ iki $0,045 \text{ N/m}$. Paviršinė energija stengiasi įgyti minimalią reikšmę. Todėl muilino vandens paviršius susideda daugiausia iš muilo molekulių. Suplonėjus muilo plėvelei kurioje nors vietoje, į paviršių patenka vandens molekulės, ir paviršinė energija padidėja. Todėl atsiranda jėgos, besistengiančios vėl aptraukti tą skysčio vietą didesne muilo koncentracija. Gryno vandens paviršinė energija padidėja, kai plėvelė tiesiog sutrūksta. Yra ir tokių medžiagų (druska, cukrus), kurių priemaiša vandenyje padidina tirpalo

paviršiaus įtempimą. Tokios medžiagos, atvirkščiai, kaupiasi ne skysčio paviršiuje, o išstumia paviršinio aktyvumo medžiagas į paviršių ir yra vadinamos *vidinio aktyvumo medžiagomis*. Tai naudojama verdant muilą išskirti jį iš tirpalo „išsūdymo“ būdu.

Gamtoje ir technikoje dažnai pasitaiko ne atskirų plėvelių, o jų sankaupų – putų. Dažnai upeliuose, kur nedidelės vandens srovelės varva į stovintį vandenį, gausiai susidaro putų. Vandens gebėjimas putoti šiuo atveju susijęs su vandenyje esančiomis organinėmis medžiagomis (saponinu), išsiskiriančiomis iš augalų šaknų.

Biologinių skysčių paviršiaus įtempimo koeficiento pokyčiai kai kuriais atvejais gali būti naudojami diagnostikai. Pavyzdžiui, sergant gelta šlapimo paviršiaus įtempimas labai sumažėja dėl to, kad į jį patenka tulžies rūgštys. Sergant diabetu ir kitomis ligomis, padidėja lipazės kiekis kraujyje. Lipazės kiekis nustatomas matuojant tributileno tirpalo, pridėjus į jį kraują, paviršiaus įtempimą.

Paviršinio aktyvumo medžiagų veikimu pagrįstas vienas iš kovos su maliariniais uodais būdų, kai apkrėsti vandens telkiniai laistomi nafta. Uodo lerva gyvena vandenyje, bet kvėpuoja atmosferos oru, iškišdama į paviršių savo kvėpavimo organą. Nedideliais kiekiais į vandenį pilama nafta smarkiai sumažina paviršiaus įtempimą. Plėvelė jau neišlaiko lervos svorio, ji panyra giliau ir, negaudama atmosferos oro, žūsta.

Iš bendrų samprotavimų lengva suprasti, kad didėjant temperatūrai paviršiaus įtempimo koeficientas turi mažėti. Didėjant temperatūrai, padidėja vidutiniai nuotoliai tarp molekulių, o dėl to sumažėja jų sąveikos jėgos, lemiančios paviršiaus įtempimą. Be to, esant krizinei temperatūrai paviršiaus įtempimo koeficientas turi būti lygus nuliui, nes išnyksta skirtumas tarp skysčio ir garų, išnyksta ir paviršius, skiriantis abi būsenas. Tuo, kad paviršiaus įtempimas priklauso nuo temperatūros, lengva įsitikinti padarius tokį bandymą. Vandens paviršius pabarstomas kokiais nors milteliais, plaukiojančiais ant jo, pavyzdžiui, talku. Prikūsus prie vandens įkaitintą daiktą, kuris įkaitintų vandens paviršių prie to daikto, galima pamatyti, kaip talkas išsisklaido nuo įkaitintos vietos. Tai vaizdžiai rodo, kad, didėjant temperatūrai, vandens paviršiaus įtempimas mažėja. Tačiau tikslus paviršiaus įtempimo koeficiento priklausomybės nuo temperatūros pavidalas nustatomas tik eksperimentiškai.

5.3.5. Kapiliariniai reiškiniai

Jeigu indo, kuriame yra skystis, matmenys (arba bendresniu atveju – atstumas tarp skystį ribojančių paviršių) sulyginami su skysčio paviršiaus kreivumo spinduliu, tai tokie indai vadinami *kapiliariniais* (lot. *capillaris* – plaukinis). Buityje mes dažnai susiduriame su medžiagomis, kurios sudarytos iš daugybės mažų kanalėlių (popierius, audinys, oda, mediena, dirvožemis ir pan.). Susilietusios su vandeniu ar kitais skysčiais, tokios medžiagos labai dažnai juos sugeria į save. Tuo pagrįstas, pavyzdžiui, rankšluosčio naudojimas šluostantis rankas, sugeriamojo popieriaus naudojimas rašalui sugerti.

Galima išvesti formulę skysčio kapiliariniam pakilimui h siauru cilindrinio kapiliaru skaičiuoti (5.3.8 pav.). Vamzdelis laikomas tokiu siauru, kad jo spindulys r_0 sulyginamas su menisko kreivumo spinduliu r . Veikiamas paviršiaus įtempimo, skystis pakyla vamzdeliu iki tokio lygio h , kur skysčio stulpelio hidrostatinis slėgis ρgh atsveria Laplaso slėgį $2\sigma / r$. Iš čia išplaukia pusiausvyros sąlyga

$$2\sigma / r = \rho gh; \quad (5.3.8)$$

čia ρ – skysčio tankis, g – laisvojo kritimo pagreitis (žr. 5.3.8 pav.). Kadangi skysčio sąlyčio kampas lygus θ , tai iš brėžinio tiesiogiai matyti, kad kreivumo spindulys, susietas su kapiliaro spinduliu, yra

$r = r_0 / \cos \theta$. Iš čia gaunama skysčio pakilimo aukščio formulė:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r_0}. \quad (5.3.9)$$

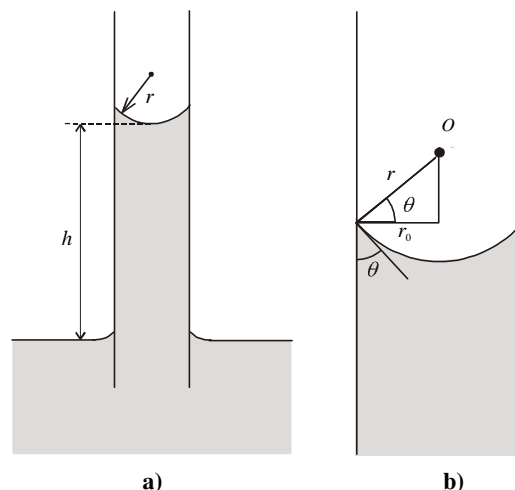
Esant visiškam drėkinimui, $\theta = 0$, tada $h = 2\sigma / \rho g r_0$.

Kapiliarinis pakilimas stebimas ne tik cilindriuose kapiliaruose. Skystis pakyla ir tarp dviejų plokštelių, kur yra siauras tarpelis. Jeigu plokštelės lygiagrečios, tai menisko forma cilindrinė. Šiuo atveju skysčio pakilimo aukštis kapiliaru nustatomas pagal (5.3.9) formulę, tik vietoje cilindrinio kapiliaro spindulio yra atstumas tarp plokštelių d .

Sudėjus kartu dvi nušifuotas sudrėkintas plokšteles, jos prisispaudžia viena prie kitos. Bet koks skysčio laisvojo paviršiaus elementas dėl drėkinimo turi įgaubto cilindro formą. Esant visiškam drėkinimui, menisko spindulys $r_1 = d/2$, o slėgis skysčio viduje žemesnis už atmosferos slėgį dydžiu, lygiu Laplaso slėgiui $p = \sigma / r_1 = 2\sigma / d$. Esant plokštelių plotui S , jų traukos jėga $f = pS = 2\sigma S / d$. Tokią gana didelę jėgą, nukreiptą statmenai plokštelėms, reikia panaudoti, norint jas atitraukti vieną nuo kitos. Tuo pačiu metu panaudojus netgi nedidelę jėgą, nukreiptą lygiagrečiai plokštelėms, jos lengvai atsiskiria.

Kapiliarinėmis savybėmis išsiskiria bet koks akytas kūnas, pavyzdžiui, filtravimo popierius, sausa kreida, išpurenta dirva ir kt. Akyti kūnai lengvai sugeria drėkinančius skysčius ir juos išlaiko. Atvirkščiai, šie kūnai yra nelaidūs nedrėkinantiems skysčiams. Kapiliariniai reiškiniai turi didelę reikšmę augalų vegetacijai, nes dėl jų vanduo ir maistiniai tirpalai iš dirvos kyla išilgai augalo stiebo.

Be to, biologijoje ir medicinoje labai svarbu, kad į drėkinantį skystį, tekantį siauru vamzdžiu (kapiliaru), nepatektų oro burbuliukų. Taip atsitikus, po skirtingo spindulio skysčio paviršiaus meniskais atsiranda papildomi slėgiai, kurių skirtumas priešinas skysties tekėjimui. Jeigu tokių burbuliukų atsiranda daug, tai kapiliaras gali visiškai užsikimšti. Kraujui tekant smulkiomis kraujagyslėmis ir kapiliarais gyvuosiuose organizmuose, stebimi panašūs reiškiniai. Tada, užsikimšus kraujo indams, organizmui iškyla rimtas pavojus. Tokie reiškiniai medicinoje vadinami *dujų embolija*. Todėl injekcijų, kraujo perpylimo ir kitų panašių procedūrų metu svarbu, kad į kraujo indus nepatektų oro burbuliukų.



5.3.8 pav. Skysčio pakilimas kapiliare (b – stambiu masteliu)

5.3.6. Paviršiaus įtempimo koeficiento matavimo būdai

Medicininėje praktikoje paviršiaus įtempimo koeficientui matuoti dažnai naudojamas lašų atitrūkimo būdas. Skysčiui lėtai tekant iš vertikalios vamzdelio, susidaro lašai ir įgauna formą, artimą rutuliui, nes sunkio jėgos įtaka lašo formai maža. Prieš lašo atitrūkimą susidaro sąsmauka, kurios spindulys r šiek tiek mažesnis už vamzdelio spindulį. Išilgai šios sąsmaukos apskritimo veikia paviršiaus įtempimo jėga $F = 2\pi r\sigma$, kuri atitrūkimo momentu turi būti lygi sunkio jėgai $P = \rho gV$; čia V – lašo tūris. Iš čia gaunamas paviršiaus įtempimo koeficientas

$$\sigma = \rho gV / 2\pi r. \quad (5.3.10)$$

Lašo svoris išmatuojamas analizinėmis svarstyklėmis. Matavimo tikslumui padidinti suskaičiuojamas tam tikras skaičius lašų ir matuojamas jų visas svoris. Sąsmaukos spinduliui išmatuoti atitrūkstantis lašas projektuojamas jį didinant ant ekrano, kur išmatuojamas jo skersmuo. Dažnai naudojamas supaprastintas lašų atitrūkimo metodas – palyginimo būdas. Jeigu žinomas kokio nors skysčio, pavyzdžiui, vandens, paviršiaus įtempimo koeficientas σ_0 ir tankis ρ_0 , tai paėmus vienodus vandens ir tiriamojo skysčio tūrius ir suskaičiavus lašų tuose tūriuose skaičių atitinkamai n_0 ir n , naudojantis (5.3.10) formule galima gauti

$$\sigma = \sigma_0 (\rho n_0 / \rho_0 n). \quad (5.3.11)$$

Žinant skysčio pakilimo kapiliariniais vamzdeliais aukščius, paviršiaus įtempimo koeficientą galima nustatyti naudojantis (5.3.9) pavidalo formulėmis. Tam tikslui, naudojant atskaitinį mikroskopą, tiksliai išmatuojami vidiniai vamzdelių skersmenys. Prieš matavimą kapiliariniai vamzdeliai turi būti švariai išplauti: iš pradžių dichromo rūgšties kalio druskos tirpalu, sieros rūgštimi, o po to distiliuotu vandeniu ir spiritu. Vamzdeliai išdžiovinami pučiant per juos įkaitintą orą.

Tikslesnis σ nustatymo būdas yra kapiliarinių bangų būdas. *Kapiliarinės bangos* – tai kitas visiems žinomo skysčio paviršiaus raibuliavimo reiškinių pavadinimas. Kapiliarinių bangų susidarymo mechanizmas yra toks. Jeigu veikiant išoriniams veiksniams, pavyzdžiui, vėjui, paviršius kurioje nors vietoje tapo įgaubtas, tai po tuo įgaubtu paviršiumi slėgis tampa mažesnis (dydžiu, lygiu Laplaso slėgiui (5.3.7)), negu gretimose srityse su plokščiu paviršiumi. Tokiu būdu atsiradęs slėgių skirtumas verčia skystį iš gretimų sluoksnių tekėti po įgaubtu paviršiumi, keldamas jį į buvusį lygį. Bet iš inercijos dėl sukauptos kinetinės energijos paviršius tampa išgaubtas ir slėgis nukreipiamas žemyn. Matuojant svyravimų dažnį ir bangų sklaidimo greitį, galima rasti paviršiaus įtempimo koeficientą.

LABORATORINIS DARBAS

Tirpalų paviršiaus įtempimo tyrimas*Darbo užduotis*

- Išstirkite tirpalo paviršiaus įtempimo koeficiento priklausomybę nuo koncentracijos.

Darbo priemonės ir prietaisai

Įrenginys tirpalo paviršiaus įtempimo koeficientui matuoti, kiuvetės su tirpalais ir vandeniu, stiklinės.

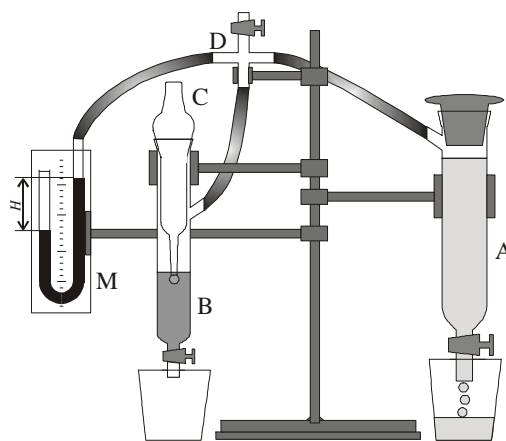
Darbo metodika

Tirpalo paviršiaus įtempimo koeficientas matuojamas maksimalaus slėgio burbuliuke būdu. Tam skirtas įrenginys (5.3.9 pav.) susideda iš vandens pripildyto aspiratoriaus (A), guminiiais vamzdeliais ir keturšakiu (D) sujungto su manometru (M), ir sandariai uždaryto indo (B) viršutine oro ertme, kur pripilama šiek tiek tiriamojo skysčio. Indas (B) uždarytas stikliniu vamzdeliu (C), kurio apatinis plonasis galas negiliai panardintas į tiriamą skystį, o viršutinis – sujungtas su atmosfera. Per šakotuvo vožtuvą visa sistema jungiasi su atmosfera.

Jeigu uždarius šakotuvo vožtuvą šiek tiek atsukamas aspiratoriaus vožtuvas, tai vanduo pradeda lėtai tekėti iš jo į specialų indą. Tada aspiratoriaus viršutinėje dalyje, kartu ir su juo sujungtose indo (B) viršutinėje dalyje ir manometro (M) dešiniojoje alkūnėje, susidaro oro išretėjimas. Pamažu ištekant vandeniui iš aspiratoriaus, slėgis inde (B) sumažėja. Dėl slėgių skirtumo Δp tarp indo (B) vidaus ir išorės apatiniame plonajame vamzdelio (C) gale susidaro oro burbuliukas, panašiai, kaip pučiant gumine kriaušė (5.3.6 pav.). Didinant Δp tas oro burbuliukas tolydžiai didėja, nors iš pradžių jo spindulys sumažėja, ir didėjantį slėgių skirtumą Δp atsveria paviršiaus įtempimas, randamas pagal (5.3.6) formulę. Burbulo spindulys r greitai nustoja mažėti, nes jis negali būti mažesnis už vamzdelio angos spindulį R . Burbuliukas atitrūksta tuo momentu, kai slėgių skirtumas, matuojamas manometru, viršija didžiausią galimą slėgio reikšmę, priklausančią nuo paviršiaus įtempimo

$$\Delta p_{\max} = 2\sigma / R. \quad (5.3.12)$$

Taigi σ išmatuoti galima naudojantis (5.3.6) ir (5.3.12) formulėmis. Tačiau burbuliuko spindulio negalima nustatyti tiesiog matuojant kapi-



5.3.9 pav. Tirpalo paviršiaus įtempimo koeficiento matavimo įrenginys

liaro spindulį, nes burbuliuko spindulys nesutampa nei su kapiliaro išoriniu, nei su vidiniu spinduliu. Be to, vamzdelis paprastai nebūna visiškai apvalus. Todėl paprasčiausia burbuliuko spindulį laikyti iš bandymo nustatomu parametru.

Taigi burbuliukas atitrūksta tada, kai atmosferos oro slėgio ir oro slėgio inde (B) skirtumas, matuojamas skysčio manometro alkūnėse aukščių skirtumu H , atsveria slėgį, sukuriama bandomojo skysčio paviršiaus įtempimo σ . Iš čia išplaukia, kad burbuliukui atitrūkstant tarp jų galioja sąryšis

$$\sigma = AH; \quad (5.3.13)$$

čia A – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo detalių matmenų, t. y. pastovus šiam įrenginiui dydis. Jam nustatyti būtina atlikti bandymą su koku nors skysčiu, kurio paviršiaus įtempimas gerai žinomas, pavyzdžiui, vandeniu. Įstačius atitinkamas H_0 ir σ_0 vertes į (5.3.13) formulę, nustatoma prietaiso konstanta

$$A = \frac{\sigma_0}{H_0}. \quad (5.3.14)$$

Tuomet tiriamojo skysčio paviršiaus įtempimo koeficientas randamas pagal formulę

$$\sigma = \sigma_0 \frac{H}{H_0}. \quad (5.3.15)$$

Darbo eiga

1. Į aspiratorių pripilama vandens, o į indą (B) distiliuoto vandens tiek, kad vamzdelio (C) galas tik šiek tiek liestų vandens paviršių (panirtų į vandenį ne giliau kaip 2 mm). Atsukus jungiamojo vamzdelio (D) vožtuvą, prietaiso viduje sudaromas atmosferos slėgis. Skysčių lygiai manometro alkūnėse turi susilyginti.
2. Po to, užsukus šakotuvo (D) vožtuvą, aspiratoriaus vožtuvas atsukamas tiek, kad slėgis kistų pakankamai lėtai ir būtų galima lengvai nustatyti lygių aukščius manometre burbuliuko atitrūkimo momentu. Kai burbuliukų susidarymo dažnis nusistovi, nustatoma manometro H rodmenų vertė. Matavimai atliekami ne mažiau kaip dešimčiai burbuliukų ir iš jų išvedamas vidurkis. Sumažinus arba padidinus burbuliukų susidarymo greitį, vėl išmatuojamas H . Jeigu gauta reikšmė sutampa su prieš tai buvusia, tai bandymo sąlygos parinktos gerai. Jeigu rezultatai priklauso nuo burbuliukų susidarymo greičio, tai reikia sureguliuoti vandens ištekėjimo iš aspiratoriaus greitį taip, kad tokios priklausomybės nebūtų.
3. Įstačius į (5.3.14) formulę gautą reikšmę H_0 ir paimtą iš lentelių arba grafiko σ_0 esamai temperatūrai, randama prietaiso konstanta A .
4. Išpylus vandenį iš indo (B) į specialią stiklinę, indas pripildomas tam tikros koncentracijos metilo spiritu. Prieš matavimą būtina kruopščiai praskalauti indo (C) galiuką tuo pačiu tirpalu.
5. Po to, kaip ir vandens atveju, nustatomas aukštis H ir pagal (5.3.15) formulę randama atitinkama σ reikšmė.

6. Pakartojus panašius matavimus su tam tikros koncentracijos tirpalais, matavimų rezultatai surašomi į lentelę:

$c, \%$	H, mm	$\sigma, \text{N/m}$

7. Nubraižomas paviršiaus įtempimo koeficiento σ priklausomybės ($\sigma = f(c)$) nuo spirito koncentracijos c grafikas. Įvertinamas matavimų tikslumas.

5.4. Garavimas ir kondensacija. Oro drėgmė. Virimas

- Žemės atmosfera.
- Skysčių garavimas ir kondensacija.
- Sotieji ir nesotieji vandens garai.
- Santykinė ir absoliučioji oro drėgmė.
- Oro drėgmės matavimo būdai ir prietaisai.
- Žmogaus organizmo termoreguliacija.
- Darbo vietos mikroklimatas.
- Skysčių virimas.
- Virimo temperatūros priklausomybė nuo išorės slėgio.

5.4.1. Žemės atmosfera

Žemės rutulį maždaug 1000 km storio sluoksniu dengia atmosfera. Ji, tarytum oro okeanas, ir elgiasi panašiai: juda, maišosi, slegia apatinius sluoksnius gana dideliu slėgiu. Jūros lygyje šis slėgis lygus 10^5 Pa. Taigi žmogaus kūno paviršių veikia suminė maždaug 10^5 N jėga. Oro tankis mažėja kylant į viršų – beveik 99 % oro masės yra 50 km storio apatiniame sluoksnyje.

Atmosferos orą sudaro dviejų tipų dujos ir garai. Pirmajam tipui priklauso dujos, kurių koncentracija ore nekinta arba kinta labai nežymiai: azotas – 78,084 %, deguonis – 20,964 %, argonas – 0,934 %, kitos tauriosios dujos – apie 0,01 %. Antrajam tipui priklauso dujos ir garai, kurių koncentracija atmosferoje nuolat kinta ir kurie geografiškai pasiskirstę labai netolygiai: vandens garai, anglies dioksidas, ozonas ir kitos. Šiam tipui priklauso ir vienos iš tauriųjų dujų – radonas, kurio kiekis kinta dėl radioaktyviųjų virsmų, taip pat ozonas, susidarantis iš oro deguonies viršutiniuose atmosferos sluoksniuose veikiant jonizuojančioms dalelėms. Ozonas, kurio koncentracija yra didžiausia atmosferos sluoksnyje nuo 40 iki 80 km aukštyje, apsaugo gyvūnus, taip pat ir žmogų nuo kenksmingos ultravioletinės Saulės spinduliuotės.

Vandens garų vaidmuo formuojant atskirų vietovių orus ir klimatą apskritai yra labai svarbus. Iš viso Žemės atmosferoje yra $1,24 \cdot 10^{16}$ kg vandens garų. Nors vandens garų kilmė Žemėje iki šiol nėra

visiškai aiški, vidutiniškai atmosferoje yra tiek vandens garų, kad visiems susikondensavus Žemės paviršius pasidengtų maždaug 2,4 cm storio ištisiniu vandens sluoksniu. Kylant aukštyn, vandens garų koncentracija mažėja. Beveik visi vandens garai yra sutelkti apatiniame maždaug 10 km storio atmosferos sluoksnyje. Virš tropopauzės atmosferos oras yra labai sausas. Tik stratosferoje kartais susidaro perlamutriniai debesys, taigi ten taip pat gali susidaryti sotiieji vandens garai. Įvairių geografinių platumų atmosferoje vandens garų koncentracija irgi labai nevienoda – ekvatoriaus srityse ties Žemės paviršiumi vandens garų koncentracija yra 2,6 %, o ties ašigaliais – tik 0,2 %.

Vanduo iš vandens telkinių nuolat garuoja, oro srautai nuneša vandens garus kartais už tūkstančių kilometrų, susidarius reikiamoms sąlygoms garai kondensuojasi ir lietaus ar sniego pavidalu iškrenta ant Žemės paviršiaus. Drėgmė dirvoje yra būtina augalams augti, o vandens garai ore būtini ir gyvūnams. Žmogus jaučiasi gerai, kai oro drėgmė yra nuo 50 iki 70 %.

Vandens garavimas Žemės paviršiuje bei vandens garų susidarymas atmosferoje yra labai svarbus fizikinis ir biologinis procesas, nes paslėptoji garavimo šiluma yra didelė, palyginus su savitąja oro šiluma. Garavimas yra tas procesas, kuris padeda išgyventi žmogui ir žinduoliams tropikuose. Šiluma, išsiskyrusi kondensuojantis 1 g vandens garų, yra pakankama 1 kg oro temperatūrai pakelti 2,5 K. Vandens garai dėl jų svarbaus vaidmens pernešant šilumą vadinami atmosferos šilumos variklio darbine medžiaga. Vandens garų koncentracija ore priklauso nuo įvairių veiksnių: atmosferos slėgio, temperatūros, vėjo stiprumo ir krypties, aukščio.

Klimato sąlygos darbo vietoje dažniausiai nusakomos šiais pagrindiniais parametrais: oro temperatūra, slėgiu, drėgme ir oro srauto (vėjo) greičiu. Yra iširta klimato sąlygų įtaka darbingumui, savijautai, nustatytos higieninės palankiausios žmogui klimato parametrų normos. Aišku, geras darbo sąlygas nusako ne tik atskiri minėti parametrai, bet jų derinys. Dažniausiai net uždaroje patalpose visų klimato parametrų optimizuoti nepavyksta. Iki šiol daugumos patalpų oras neaklimatizuotas. Suprantama, oro slėgis beveik visuomet (išskyrus lėktuvų salonus) nereguliuojamas.

5.4.2. Barometrinė formulė. Bolcmano pasiskirstymas

Atmosferos slėgis tam tikrame aukštyje h virš Žemės paviršiaus priklauso nuo to, koks yra virš jo esančio oro stulpo sunkis. Oro slėgio priklausomybė nuo aukščio virš Žemės paviršiaus išreiškiama taip:

$$p = p_0 e^{-mgh/kT}, \quad (5.4.1)$$

čia $e \approx 2,72$ – natūraliojo logaritmo pagrindas, g – laisvojo kritimo pagreitis, m – vienos molekulės masė, h – aukštis virš Žemės paviršiaus, k – Bolcmano konstanta, T – absoliučioji temperatūra. Kai $h = 0$, tai slėgis $p = p_0$. Lygybė (5.4.1) vadinama *barometrine formule*. Ja naudojantis galima rasti aukštį virš Žemės paviršiaus, kai žinomas atmosferos slėgis aukštyje h ir jūros lygyje. Barometrai, kurių skalės sugraduotos metrais ir yra skirti aukščiui matuoti, vadinami *altimetrais*. Graduojant įvedamos temperatūrinės ir laisvojo kritimo pagreičio pataisos, nes (5.4.1) formulėje laikoma $T = \text{const}$ ir $g = \text{const}$, o tai teisinga tik nedideliame aukštyje (kelių dešimčių km), kitais atvejais reikia atsižvelgti į T ir g priklausomybę nuo aukščio.

Kita vertus, slėgis p proporcingas molekulių tankiui n : $p = nkT$. Vadinasi, (5.4.1) formulė išreiškia molekulių tankio, kylant virš Žemės paviršiaus, mažėjimą:

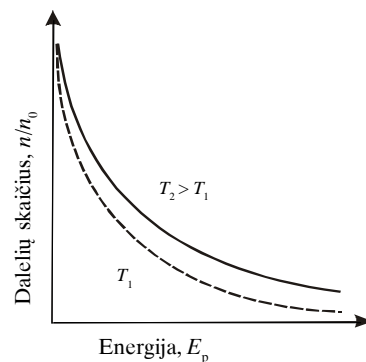
$$n = n_0 e^{-mgh/kT}; \quad (5.4.2)$$

čia n ir n_0 – molekulių skaičius tūrio vienetė taškuose, kurių aukščių skirtumas yra h .

Barometrinė formulė galioja tada, kai dalelė yra gravitacijos lauke. Sandauga mgh yra molekulės potencinė energija aukštyje h . Vadinasi, molekulių pasiskirstymo pagal aukštį formulė kartu išreiškia ir molekulių pasiskirstymą pagal jų potencines energijas:

$$n = n_0 e^{-E_p/kT}; \quad (5.4.3)$$

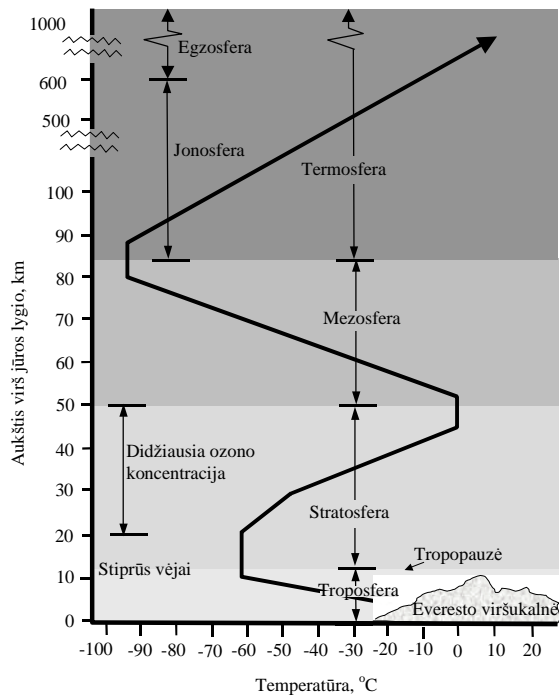
čia n_0 – molekulių skaičius tūrio vienetė erdvės dalyje, kurioje jų potencinė energija laikoma lygia nuliui, n – molekulių skaičius tūrio vienetė toje erdvės dalyje, kurioje jų potencinė energija yra E_p . Iš (5.4.3) formulės matome, kad molekulės pasiskirsto taip, kad jų potencinė energija būtų mažiausia, ir atvirkščiai – molekulių tankis mažesnis ten, kur jų potencinė energija didesnė. L. Bolcmanas (*L. Boltzmann*) įrodė, kad šis pasiskirstymas galioja ne tik Žemės gravitacijos lauke, bet ir kiekviename potencialiniame lauke, kuriame vyksta chaotiškasis šiluminis dalelių judėjimas. Todėl dalelių (5.4.3) pasiskirstymas vadinamas *Bolcmano pasiskirstymu* (5.4.1 pav.).



5.4.1 pav. Dalelių pasiskirstymas pagal potencinę energiją (Bolcmano)

5.4.3. Atmosferos sandara

5.4.2 paveiksle pateikta atmosferos temperatūros priklausomybė nuo aukščio virš Žemės paviršiaus. Kaip matyti, temperatūros kitimo kreivė yra sudėtinga, t. y. temperatūra iš pradžių mažėja, vėliau tam tikrame aukščių ruože ji yra pastovi, vėliau vėl pradeda didėti, po to vėl yra pastovi dar didesnių aukščių ruože, po to vėl mažėja, yra pastovi ir vėl didėja. Pagal temperatūros pokyčius atmosferoje ji yra skirstoma į *keturis sluoksnius*. Atskirų sluoksnių ribos yra pastovios temperatūros ruožuose, tačiau kadangi tokie ruožai tęsiasi ~10 km, tai ribos nustatymas yra sąlyginis ir jis šiek tiek skirtingas įvairių autorių darbuose. *Troposfera* (gr. *tropos* – posūkis, gr. *sphaira* – rutulys) yra artimiausias Žemei sluoksnis, kuriame yra 75 % visų atmosferos dujų, dulkių ir vandens garų. Ji tęsiasi nuo Žemės paviršiaus iki 10–16 km aukščio virš Žemės. Troposferos storis virš Žemės paviršiaus kinta priklausomai nuo Saulės energijos srauto, pasiekiančio Žemę, jis didžiausias pusiaujuje, o mažiausias ašigaliuose. Troposferoje temperatūra vidutiniškai sumažėja 7 °C pakilus 1 km. Jei Žemės paviršiaus temperatūra yra 15 °C, tai minimali troposferos temperatūra 11 km aukštyje yra apie minus 60 °C. Meteorologiniu požiūriu troposfera yra svarbiausias atmosferos sluoksnis, nes 99 % mūsų orų formuojasi čia. Arti šio sluoksnio viršaus egzistuoja riba, vadinama *tropopauze* (gr. *tropos* – posūkis, gr. *pausis* – sustojimas), kuri yra tarytum lubos orų zonai.



5.4.2 pav. Atmosferos dalijimas į keturis sluoksnius temperatūros pokyčių pagrindu

vidutinis, vidurinis, gr. *sphaira* – rutulys), virš jos 85–1000 km aukštyje yra *termosfera* (gr. *thermos* – šiltas, karštas, gr. *sphaira* – rutulys). Mezosferoje temperatūra mažėja vėl net iki minus 90 °C, o termosferoje gali pakilti net iki 1480 °C. Termosfera yra dalijama į dvi dalis. *Jonosfera* (gr. *ion* – einantis, gr. *sphaira* – rutulys) yra sluoksnis įelektrintų dalelių, kuris prasideda tarp 80 ir 85 km virš Žemės paviršiaus. Saulės spinduliuojama Rentgeno ir UV spinduliuotė, patekusi į termosferą, jonizuoja sluoksnio molekules, sukurdama teigiamus jonus ir laisvus elektronus. Šie jonai ir elektronai atspindi ilgąsias radijo bangas, išspinduliuotas nuo Žemės paviršiaus atgal į Žemę. Jonosferos sluoksnis yra jautrus įelektrintų dalelių, atlekiančių iš Saulės, poveikiui ir tai daro įtaką radijo bangų atspindžiui. Kitas termosferos sluoksnis vadinamas *egzosfera* (gr. *exo* – išorėje, gr. *sphaira* – rutulys). Jis prasideda 500–700 km aukštyje virš Žemės paviršiaus ir išsiplečia į tarpplanetinę erdvę. Egzosferoje yra tik nedidelio tankio įvairių dujų, o temperatūra čia gali kisti nuo 300 iki 1650 °C. Dėl silpnos Žemės traukos šios dujos lengvai išlekia į tarpplanetinę erdvę. Termosfera mus papildomai apsaugo nuo meteoritų, nustojusių veikti palydovų ir kitų nuolaužų, nes jos sudega aukštoje temperatūroje.

5.4.4. Oro masių judėjimas atmosferoje

Vertindami oro masių (tam tikrų diskrečių oro porcijų) pernašą vertikalia arba horizontalia kryptimi veikiant vėjui arba turbulentiškumui meteorologai taiko termodinamikos principus. Laikant procesą adiabatiniu, t. y. kad diskreti oro porcija nei gauna šilumos, nei atiduoda aplinkai, galima nustatyti

Tropopauzėje vyrauja stiprūs vėjai, jų greitis gali siekti 120–450 km/h. Jų kryptis ir greitis nuolat kinta.

Kad atmosferos temperatūra mažėja didėjant aukščiui, buvo įsitikinta dar XIX amžiuje, kai atsirado karšto oro balionai. Tam tikru laikotarpiu egzistavo nuomonė, kad atmosferos temperatūra mažėja visą laiką tolstant nuo Žemės paviršiaus. Tačiau jau 1899 m. buvo įsitikinta, kad atmosferos temperatūros mažėjimas sustoja maždaug 10–16 km aukštyje, kur baigiasi troposfera ir prasideda naujas sluoksnis, vadinamas *stratosfera* (lot. *stratum* – posūkis, gr. *sphaira* – rutulys), besidriekiantis aukštyje maždaug iki 50 km. Stratosferoje temperatūra vėl pakyla iki ~0 °C. Ozono sluoksnis, sugeriantis daugumą žalingų UV spindulių, yra stratosferoje maždaug 24 km aukštyje. Virš stratosferos 50–85 km aukštyje yra *mezosfera* (gr. *mesos* –

temperatūros, slėgio ir aukščio sąryšius. Tegu diskreti oro porcija, turinti vienetinę masę, truputį pakyla ir išsiplečia, nes išorinis slėgis, kylant aukštyn, sumažėja dydžiu dp . Jei nėra šilumos įtekėjimo, tokiam plėtimuisi naudojama vidinė energija ir dėl to diskrečios oro porcijos temperatūra sumažėja dydžiu dT .

Šį vyksmą patogiu išskaidyti į dvi pakopas:

1) esant pastoviam slėgiui ir tūriui, diskreti oro porcija pakyla ir atšąla, atiduodama šilumos kiekį $C_v dT$,

2) nugalėdama išorinį slėgį p , diskreti oro porcija plečiasi, sunaudodama energiją $p dV$.

Adiabatiniam vyksmui šių šilumos kiekių suma turi būti lygi 0. Papildomai pasinaudojant tobulųjų dujų būsenos lygtimi bei sąryšiu tarp izochorinės (esant pastoviam tūriui) molinės šiluminės talpos C_v ir izobarinės (esant pastoviam slėgiui) molinės šiluminės talpos C_p bei suintegrovus galima gauti temperatūros ir slėgio sąryšį adiabatiniam kilimui

$$T = p^{(C_p - C_v)/C_p}.$$

Oroi santykis $(C_p - C_v)/C_p = 0,29$. Žinant slėgio priklausomybę nuo aukščio (žr. 5.4.2 skyrelį) iš paskutiniosios lygties galima gauti temperatūros priklausomybę nuo aukščio. Dydis

$$dT/dh = -g/C_p$$

vadinamas *sausa adiabatine mažėjimo sparta*; čia h – aukštis virš Žemės paviršiaus, T – temperatūra, g – laisvojo kritimo pagreitis. Jis lygus $\approx 0,098 \text{ K/m}$ ir reiškia, kad temperatūra sumažėja apytikriai $9,8 \text{ K}$ diskrečiai oro porcijai pakilus 1 km . Šiuo atveju „sausas“ reiškia, kad diskrečios oro porcijoje nėra kondensacijos ar garavimo. Diskreti oro porcija kils aukštyn tol, kol jos temperatūra bus didesnė už supančio oro temperatūrą. Tačiau procesas gali būti *nuostovus* ir *nenustovus*, ir tai priklauso nuo konkrečios atmosferos temperatūros aukštesniuose sluoksniuose. Sąlygos yra nuostovios, kai diskreti oro porcija greitai pasiekia aplinkos oro temperatūrą. Tai įmanoma esant mažesniai troposferos temperatūros gradientui, tai būdinga vakarui ir nakčiai. Esant didesniai troposferos temperatūros gradientui kilimo procesas yra ilgesnis ir tai sąlygoja proceso nenuostovumą ir turbulentiškumą. Tokios sąlygos paprastai susidaro dienos metu, kai šviečia Saulė. Žinant kylančios oro porcijos temperatūrą prie Žemės paviršiaus galima apskaičiuoti aukštį, iki kurio jis galės pakilti. Pavyzdžiui, imant diskrečios oro porcijos pradinę $16,7 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrą, kuri pakilo dėl Saulės išildyto Žemės paviršiaus, galima teigti, kad tomis sąlygomis, kai vidutinė oro temperatūra Žemės paviršiuje yra $15,6 \text{ }^\circ\text{C}$, o temperatūra 1 km aukštyje yra $5,4 \text{ }^\circ\text{C}$, nuginėjama oro porcija kils iki $\sim 1,1 \text{ km}$. Oro masės kur kas greičiau ir aukščiau kyla prie apšviestų ir labiau išildytų stačių paviršių, nes kilimui ir plėtimuisi eikvojama vidinė energija gali būti papildyta šiluminio laidumo būdu ją paimant iš išildytų paviršių.

Jei kylančiame ore yra pakankamai daug vandens garų, tai jiems pakilus iki aukščio, kuriame temperatūra yra lygi ar žemesnė už rasos tašką, prasideda vandens garų kondensacija ir formuojasi debesys. Šiuo atveju pasireiškia *šlapias adiabatinis temperatūros mažėjimas*, nes čia dėl kondensacijos išlaisvinama paslėptoji garavimo šiluma. Ji šildo orą ir didina atmosferos nenuostovumą, sąlygojanti

tolesnį oro porcijos kilimą. Todėl tokio oro porcijų kilimo metu temperatūra krinta lėčiau. Vandens garų paslėptoji garavimo šiluma yra labai svarbi formuojantis audroms.

Turbulentiškumas atmosferoje yra visur, išskyrus sluoksnį gana arti Žemės paviršiaus labai ramiomis naktimis, o turbulentinis vandens garų ir CO₂ pernešimas yra labai svarbus visoms aukštesnėms gyvybės formoms. Fotosintezei reikalingą CO₂ augalai ima iš aplinkos. Turbulentiškumo matas gali būti CO₂ kiekis, sugeriamas sveikų žalių pasėlių per vieną dieną. Jis yra ekvivalentus visam CO₂ kiekiui tarp pakloto ir 30 m aukščio. Praktiškai nors CO₂ koncentracija, kaip fotosintezeje naudojamo elemento, tarp aušros ir saulėlydžio sumažėja, šis sumažėjimas retai pranoksta 15 % vidutinės koncentracijos Žemės paviršiuje. Šie skaičiai rodo, kad dėl turbulentiškumo augmenija gali paimti CO₂ bent iš žemiausių 200 m atmosferos, o galbūt ir iš daug didesnių aukščių. Mažas dieninis CO₂ pokytis stebėtas net 500 m aukštyje.

5.4.5. Garavimas ir kondensacija. Sotieji ir nesotieji garai

Kadangi skysčio molekulės išsidėsčiusios gana arti viena kitos, tai, įgijusios pakankamai kinetinės energijos, jos gali nugalėti savo kaimynių trauką ir palikti jų poveikio sferą. Tačiau tokios molekulės tuoj patenka į kitų kaimynių poveikio sferą ir atsiduria naujoje laikinosios pusiausvyros padėtyje (plačiau žr. 5.1 skyrių). Tikrai laisvajame skysčio paviršiuje esančios molekulės gali išeiti už skysčio ribų (tuo paaiškinamas skysčių garavimas nuo paviršiaus).

Skysčiuose, esant bet kokiai temperatūrai, visada yra tam tikras skaičius molekulių, kurios turi pakankamai energijos kitų molekulių traukai nugalėti ir skysčio paviršiui palikti. Tokiu būdu jos pereina į dujinę būseną. Skysčio perėjimas į dujinę būseną vadinamas *garavimu*. Vykstant garavimui, skystį palieka pačios greičiausios molekulės, todėl vidutinė likusių molekulių energija mažėja ir skystis vėsta. O garams kondensuojantis (jiems virstant skysčiu), garavimui sunaudota šiluma atiduodama atgal: kondensacijos metu skystis sušyla. Jei skysčio paviršius yra šaltesnis (mažesnės temperatūros) nei oras virš jo, tai galimas greitesnis molekulių pagavimas nei jų netekimas

Kai oras ir vanduo yra uždaramame inde, vandens molekulės nuolatos išlekia iš skysčio į orą, sudarydamos vandens garus, bet kartu vyksta ir atvirkščias procesas, *kondensacija*, – vandens garų molekulės pereina į skystį. Kai vandens garų dalinis slėgis p didėja, garavimo sparta mažėja ir tampa lygi nuliui, kai išlekiančių per tam tikrą laiko tarpą molekulių skaičius yra tiksliai lygus grįžtančių per tokį pat laiko tarpą į skystį skaičiui. Tada oras laikomas prisotintu vandens garais ir dalinis slėgis yra *sočiųjų garų slėgis*, žymimas p_s . Jis stipriai priklauso nuo temperatūros.

Prisiminus tobulųjų dujų slėgio sąryšį su temperatūra (5.2.8), galima pažymėti, kad sočiųjų garų atveju slėgis ne tik priklauso nuo temperatūros tiesiogiai, bet ir per molekulių tankį n , kuris didėja, didėjant temperatūrai. Tiksliai priklausomybė gaunama iš Klauzijaus ir Klapeirono lygties

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_1 - V_2)}, \quad (5.4.4)$$

kuri sieja dvifazės sistemos (skysčio ir jo sočiųjų garų) pusiausvyros slėgį p ir temperatūrą T . Čia L – savitoji garavimo šiluma, V_1 ir V_2 atitinkamai dujinės ir skystos fazės tūriai.

Praktikoje naudojama sočiųjų garų slėgio priklausomybės nuo temperatūros formulė:

$$p_s(T) = p_s(T_n) e^{A(T-T_n)/T};$$

čia $A = LM_v / RT_n$, $T_n = 273 \text{ K}(0^\circ\text{C})$, L – savitoji garavimo šiluma (žr. priedų 10 lentelę), M_v – vandens molio masė. Mikrometeorologijoje svarbus parametras – $p_s(T)$ kitimo sparta kintant temperatūrai. Nuo 0 iki 30°C intervale, $p_s(T)$ didėja apie 6,5 %/K, tuo tarpu tobulųjų dujų slėgis didėja tik 0,4 %/K.

Oro su vandens garais *rasos tašku* (T_r) vadinama temperatūra, iki kurios jis turi būti atšaldytas, kad vandens garai taptų sočiais, apibrėžiama iš sąryšio $p = p_s(T_r)$; čia p – vandens garų dalinis slėgis. Kai vandens garų slėgis žinomas, rasos taškas randamas iš lentelių arba iš formulės

$$T_r = \frac{T_n}{1 - (\ln p / p_s(T_n)) / A}.$$

Rasos taškas labai svarbus rasos susidarymui, kai paviršiaus temperatūra yra žemesnė už aplinkos oro rasos tašką.

Oro sočiųjų garų slėgio deficitas, vadinamasis *sotinimo deficitas*, yra skirtumas tarp sočiųjų garų dalinio slėgio $p_s(T)$ ir esančio ore vandens garų dalinio slėgio p , t. y. $p_s(T) - p$. Ekologijoje tai dažnai vadinama oro sausinančios galios matu, nes jis iš dalies nustato augalų augimo ir vandens išgaravimo spartą. Mikrometeorologijoje sotinimo deficito gradientas yra pusiausvyros nebuvimas tarp šlapio paviršiaus ir šalia jo praeinančio oro.

5.4.6. Santykinė ir absoliučioji drėgmė

Oro temperatūrą, drėgmę ir srautus galima dirbtinai reguliuoti. Oro drėgmė charakterizuojama dviem dydžiais: absoliučiąja ir santykinę oro drėgmę.

Viename kubiniame metre oro esančių vandens garų masė vadinama *absoliučiąja oro drėgme*. Esant 0°C temperatūrai ir 760 mm Hg slėgiui, 1 m^3 sauso oro masė lygi 1,293 kg. Drėgnas oras, palyginti su sausu oru, yra santykinai lengvesnis, todėl laikosi paviršiuje. Tai paaiškinama tuo, kad drėgno oro tankis yra sauso oro ir vandens garų tankių suma. Kadangi vandens molio masė $M_v = 18 \text{ g mol}^{-1}$, o sauso oro molio masė $M_o = 29 \text{ g mol}^{-1}$, tai drėgno oro tankis tuo mažesnis kuo didesnis yra vandens garų tankis. Todėl žemės paviršiuje susidaręs drėgnas oras būdamas lengvesnis kyla aukštyn. Nagrinėjant šilumos pernašą, svarbu žinoti, kokiai temperatūrai esant drėgno oro tankis bus toks pat kaip sauso oro.

Absoliučioji drėgmė nenusako oro įsotinimo vandens garais laipsnio. Tam įvedamas dydis, vadinamas santykinę drėgmę. *Oro santykinę drėgmę* yra vadinamas absoliučiosios oro drėgmės masės g ir 1 m^3 esančios tokios garų masės G , kuris sotintų tos pačios temperatūros orą, santykis:

$$r = g/G. \quad (5.4.5)$$

Šis dydis dažnai naudojamas klimato statistikoje ir kartu nusako oro džiovinančią poveikį, tačiau jis svarbiausias nusakant termodinaminę pusiausvyrą tarp vandens ir vandens garų. Gryno vandens

paviršiuje termodinaminė pusiausvyra nusistovi, kai $r = 1$. Tačiau kai vandenyje yra ištirpusios druskos (pvz., augalų ląstelėse) arba kai vanduo kapiliarumo jėgų yra laikomas porėtose medžiagose (kaip dirvožemyje), pusiausvyroji santykinė drėgmė yra mažesnė už vienetą.

Pavyzdžiui, pyrago gabalai ir sausainiai išlaiko savyje vandenį, kuris yra pusiausvyroje su konkrečia santykinė drėgmė. Būdami ore, kur r didesnė, šie daiktai sugeria vandenį, bet jį praranda atiduodami orui, jei oro drėgmė r yra mažesnė. Kadangi sausainių poros daug mažesnės negu pyrago, tai jų pusiausvyroji santykinė drėgmė yra žemesnė. Santykinė oro drėgmė virtuvėse yra tokia, kad palikti ant stalo sausainiai paprastai sugeria vandenį ir tampa minkšti, o pyragas praranda vandenį ir tampa trapus.

Dažnai absoliučioji drėgmė išreiškiama vandens garų dalinio slėgio vienetais. Tuomet santykinė oro drėgmė skaičiuojama kaip santykis absoliučiosios drėgmės ir sočiųjų garų dalinio slėgio vertės, esant tai pačiai temperatūrai.

Bet kurioje pastovioje temperatūroje vandens garų slėgis yra proporcingas vandens garų masei. Tai išplaukia iš Klauzijaus ir Klapeirono lygties

$$pV = \frac{m}{M} \cdot RT; \quad (5.4.6)$$

čia p – dujų (vandens garų) dalinis slėgis, V – jų tūris, m – masė, M – dujų vieno molio masė, R – universalioji dujų konstanta, T – temperatūra (Kelvino laipsniais). Abi (5.4.6) lygties puses padalijus iš V ir žinant, kad $m/V = \rho$ yra dujų (garų) tankis, gaunama

$$p = \frac{\rho}{M} RT, \text{ arba } p \sim \rho.$$

Vandens garų dalinį slėgį pažymėjus p , o sočiųjų garų slėgį pažymėjus p_s , galima užrašyti

$$r = p(T)/p_s(T). \quad (5.4.7)$$

Santykinė oro drėgmė išreiškiama procentais, todėl (5.4.7) formulę galima užrašyti taip:

$$r = p(T)/p_s(T) \cdot 100 \%. \quad (5.4.8)$$

5.4.7. Šlapių paviršių šilumos balansas

Šlapiais laikomi tokie paviršiai, kurie yra padengti grynu vandeniu arba druskų tirpalu. Laisvoje atmosferoje temperatūra ir garų slėgis atitinkamai yra T ir p , o vandens paviršiuje yra T_0 ir $p_s(T_0)$. Šiluma perduodama iš atmosferos į paviršių dėl konvekcijos, o atiduodama iš paviršiaus į atmosferą dėl garavimo. Jei paviršius gauna papildomos šilumos iš Saulės spinduliuotės, į tai reikia atsižvelgti, nes nuo šio proceso spartos taip pat priklauso paviršiaus temperatūra.

Taigi šlapias paviršius yra šiltesnis arba šaltesnis negu virš jo judantis oras priklausomai nuo to, ar gauta iš Saulės šiluma yra didesnė, ar mažesnė už paviršiaus atiduodamą šilumą atmosferai.

Pavyzdžiui, norint apskaičiuoti, kiek vandens išgaruoja iš atviro vandens baseino per kelias savaites ar mėnesius, būtina įvertinti vandens baseino šiluminę talpą. Kuo gilesnis ežeras, tuo

ilgesnis turi būti laikotarpis vidurkiui rasti. Kartais jis gali siekti metus. Todėl realiai maksimalus garavimo laikotarpis dėl tokio vidurkinimo gali ženkliai pasikeisti.

Garavimo nuo vandens paviršių sparta tiesiškai didėja didėjant spinduliuotės sugerties spartai ir sotinimo deficitui $p_s(T) - p$. Jis didėja kartu su vėjo greičiu.

Lapų ar augmenijos šilumos balansas daugiausia priklauso nuo aplinkos ir biologinių audinių. Jų temperatūra negali būti kontroliuojama ištisomis valandomis ir labiausiai priklauso nuo Saulės spinduliuotės srauto. Aprašytasis šlapių paviršių pavyzdys tinka ir augalų lapams. Vandens nuo lapo ir šlapio paviršiaus garavimo pagrindiniai skirtumai yra tokie:

1. *Garavimo spartos priklausomybė nuo spinduliuotės sugerties spartos ir sotinimo deficito.* Vandens paviršiaus garavimo sparta yra baigtinė, net kai spinduliuotės sugertis ir sotinimo deficitas yra lygūs nuliui. Ji tiesiškai didėja didėjant šiems dydžiams, kai kiti yra pastovūs. Natūralioje aplinkoje lapų šiluminė varža labai priklauso nuo Saulės spinduliuotės sugerties spartos. Nesant šviesos, jų žiotelės yra uždarytos taip, kad garavimas yra nulinis. (Garavimas vyksta tik per vaškuotus paviršius.) Be to, pastebėta, kad lapai žiotelės uždaro, kai sotinimo deficitas sparčiai didėja, taip taupomas vanduo. Taigi lape vyksta nevisiškai dar suprasti savisaugos procesai, iš dalies keičiantys garavimo, palyginti su vandens paviršiais, pobūdį.

2. *Garavimo spartos ir temperatūros priklausomybė nuo vėjo greičio.* Didėjant vėjo greičiui, garavimo nuo šlapių paviršių sparta didėja, o paviršiaus temperatūra mažėja. Teoriškai lapų šilumos nuostoliai dėl garavimo turėtų nepriklausyti nuo vėjo greičio, tačiau kai šilumos nuostoliai pranoksta tam tikrą krizinę vertę, dėl didėjančio vėjo greičio garavimo šilumos nuostoliai didėja.

Atsiradęs ant lapų lietaus vanduo yra išgarinamas greičiau, nes jam nereikia pereiti pasienio lapo sluoksnio (žr. 5.1 skyrių), kaip esančiam lape vandeniui. Tokiu būdu yra išgarinama gana daug vandens, ypač tose zonose, kur dažni lietūs.

3. *Lapo ir oro temperatūros ryšys.* Saulės atokaitoje esančių lapų temperatūra kur kas didesnė už oro temperatūrą šalto klimato kraštuose ir mažai skiriasi nuo oro temperatūros arba net yra mažesnė nei oro karšto klimato zonoje. Tai svarbu arktiniams augalams šiaurėje išlikti. Antras aspektas yra tas, kad sotinimo deficitas šiltuose kraštuose yra daug didesnis. Tropikuose medis gali išlaikyti lapų temperatūrą, artimą oro temperatūrai (30–40°C), kai jo šaknys gali pakankamai paimti bei išgarinti vandens ir jis atveria lapų žiotelės.

4. Didėjant lapų šiluminei varžai, mažėja išgarinamo vandens masė, bet dėl konvekcijos didėja lapo šilumos nuostoliai. Tada lapo temperatūra Saulės atokaitoje paprastai yra tik 1–2°C aukštesnė nei aplinkos oro.

Nakties metu, kai nėra Saulės spinduliuotės poveikio, lapų temperatūra yra visuomet mažesnė už oro temperatūrą, tada prasideda kondensacija ant lapo. Rasos formavimosi sparta yra apie 0,06–0,07 mm/h, kai oras yra prisotintas vandens garų, bet gali būti daug mažesnis neprisotintame ore. Todėl per naktį ant augalų lapų gali susidaryti apie 0,2–0,4 mm storio rasos sluoksnis.

5.4.8. Gyvų organizmų termoreguliacija. Darbo vietos mikroklimatas

Skirtingai nuo augmenijos, šiltakraujų gyvūnų vidinė temperatūra gali būti palaikoma gana siaurame intervale derinant spartą, kuria šiluma yra gaminama dėl metabolizmo arba prarandama dėl garavimo. Šiltakraujai gyvūnai dar vadinami *homojoterminiais*. Šaltakraujai, arba *poikiloterminiai*, gyvūnai sudaro tarpinę tarp šiltakraujų gyvūnų ir augmenijos klasę. Jų metabolizmo sparta yra gana maža, jie didelių karščių ir šalčių stengiasi išvengti pasislėpdami šešėlyje arba rasdami pastogę. Pavyzdžiui, driežai, sausumos vėžliai, bitės stengiasi pasirinkti aplinką, kurioje Saulės spinduliuotė pakelia jų kūno temperatūrą iki 30–35°C, t. y. iki įprastos šaltakraujams gyvūnams temperatūros.

Bet kurio gyvūno šilumos balansą galima apibrėžti lygtimi

$$M + R = C + \lambda E + G,$$

kurios kiekvienas narys nurodo šilumos įtekį arba nuostolius per vienetinį kūno paviršiaus plotą. M yra šilumos gaminimo sparta dėl metabolizmo; G – laidumas per pagrindą, ant kurio gyvūnas stovi ar guli; garavimą apibūdinantis narys λE susideda iš dviejų dalių – šilumos nuostolių per kvėpavimo sistemą ir prakaitavimo per odą; dydis R apibūdina šilumą, gaunamą ar prarandamą dėl spinduliavimo, o C – dėl konvekcijos.

Čia plačiau apžvelgiami šilumos nuostoliai dėl garavimo.

Neprakaituojant ir ramiai kvėpuojant, gyvūno šilumos nuostoliai dėl kvėpavimo sudaro tik mažą dalį metabolizmo gaminamos šilumos. Pavyzdžiui, žmogui įkvėpiant sausą orą $\lambda E_r/M \approx 10\%$. Įskaitant garavimą per odą, bendri garavimo nuostoliai yra apie 25–30% metabolizmo šilumos. Tačiau kai žmogus prakaituoja, jis gali prarasti iki 1,5 kg skysčių per valandą, o tai atitinka 600 W/m².

Santykio $\lambda E/M$ kitimas rodo gyvūnų adaptaciją sausame ore. Pavyzdžiui, dykumų roplių $\lambda E/M$ dažniausiai yra mažas; jie net iškvėpiamą iš plaučių vandenį stengiasi sulaikyti nosies tarpuose, kur temperatūra yra žemesnė (+25°C) ir vandens garai kondensuojasi. Išgarinama vandens masė priklauso nuo gyvūno kūno tūrio, o išgarinimo sparta – nuo paviršiaus ploto. Vabzdžiai turi didelį ploto ir tūrio santykį, todėl šaldymas garinant vandenį yra prabanga. Žmogus ir kiti didesni gyvūnai gali tik tam tikrą laiką naudoti vandenį, kad sumažintų kūno temperatūrą. Kuo didesnis gyvūnas, tuo ilgiau jis gali išlikti be išorinio vandens šaltinio.

Šiltakraujų gyvūnų kūno temperatūra išlieka pastovi, kai

$$\Delta Q_p = \Delta Q_n; \quad (5.4.9)$$

čia ΔQ_p – organizmo sukurtas, o ΔQ_n – aplinkai perduotas šilumos kiekis per vienodą laiko tarpą. ΔQ_n sąlygojamas trijų pagrindinių vyksmų: spinduliavimo, konvekcijos (žr. 5.5 skyrių) ir garavimo. Normaliomis sąlygomis daugiausia šilumos kūnas praranda dėl spinduliavimo. Vandens garinimas, įskaitant prakaitavimą ir kvėpavimą (iškvėpiamame ore yra vandens garų), sudaro iki 15% organizmo šilumos nuostolių. Prakaituojant prarandamas šilumos kiekis priklauso nuo aplinkos temperatūros ir oro drėgmės, taip pat nuo kūno paviršinio sluoksnio būsenos. Mat,

esant žemai aplinkos temperatūrai, poodinio sluoksnio venos subliūkšta, ir kraujas į širdį teka gilesniuose sluoksniuose šalia arterijų esančiomis venomis. Tuomet grįžtančiam venomis kraujui perduodamas šilumos kiekis iš arterinio kraujo. Dėl šių priežasčių galūnės šaltyje atvėsta greičiau, tačiau vidinė kūno temperatūra nepakinta. Ir atvirkščiai, šiltoje aplinkoje paviršinės venos išsiplečia, jomis teka daugiau kraujo, pakyla odos temperatūra, todėl efektyviau atiduodama šiluma aplinkai.

Šilumos netekimo prakaituojant sparta išreiškiama taip:

$$\frac{\Delta Q_{pr}}{\Delta t} = kS(p_o - p_a); \quad (5.4.10)$$

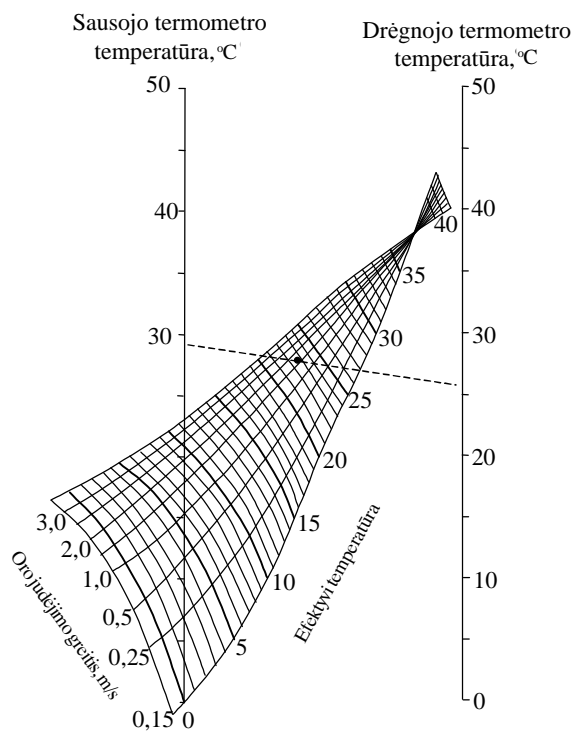
čia k – koeficientas, S – kūno paviršiaus plotas (priklauso nuo rūbų), p_o – odos paviršiuje esantis garų slėgis, p_a – aplinkos oro vandens garų slėgis. Kambario temperatūroje ir nesant vėjo, prakitodamas žmogus netenka apie 7% organizmo sukurto šilumos kiekio.

Suprantama, šilumos apykaitos kitimas labai priklauso nuo rūbų izoliacinių savybių. Pavyzdžiui, lengvas vasarinis kostiumas, laikant jį izoliaciniu vienetu, praleidžia šilumą 4 kartus lengviau negu šiltas žiemos aprėdas, o lapės kailis yra net 6 kartus geresnis šilumos izoliatorius.

Kitas parametras, turintis didelės įtakos šilumos mainų spartai, yra vėjo greitis. Jei vėjo greitis mažesnis nei 2 m/s, tai oro sluoksnis, esantis šalia kūno paviršiaus, sudaro tam tikrą 1–2 cm storio izoliacinį sluoksnį. Stipresnis vėjas sumažina šį sluoksnį, todėl šilumos mainai labai paspartėja. Tada, esant tai pačiai aplinkos temperatūrai, jaučiamas atšalimas. Pavyzdžiui, 20°C aplinkos temperatūra, esant 5 m/s vėjo greičiui, juntama kaip 17°C, o 20 m/s vėjyje – tik 13°C.

Gerai savijautai svarbūs visi aplinkos oro parametrai: temperatūra, oro drėgmė, slėgis ir vėjo greitis. Norint atsižvelgti į visus minėtus aplinkos oro parametrus, apibrėžiama *efektyviosios temperatūros* sąvoka (5.4.3 pav.), iš kurios galima spręsti apie optimalius aplinkos oro parametrus mikroklimatui.

Iš paveikslu matyti, kad efektyviosios temperatūros vertė bus skirtinga keičiantis oro judėjimo greičiui ar oro drėgmei.



5.4.3 pav. Efektyviosios temperatūros kreivės [pagal 9]

5.4.9. Oro drėgmės matavimo prietaisai

Oro drėgmei nustatyti naudojami įvairių konstrukcijų *drėgmėmačiai*. Nustatant oro drėgmę *higrometrais* (gr. *hygros* – drėgnas), pasinaudojama kai kurių medžiagų pailgėjimu brinkstant arba pagal užregistruotą rasos tašką. Paprasčiausiame higrometre panaudota žmogaus švaraus plauko savybė ilgėti didėjant oro drėgmei. Rasos tašku T_r (žr. 5.4.5 skyrelį) vadinama temperatūra, kai ore esantys vandens garai tampa sočiaisiais. Iš higrometrinės lentelės (žr. priedų 14 lentelę) randamas ore esančių garų slėgis p (jis lygus T_r temperatūros sočiųjų garų slėgiui) ir aplinkos oro temperatūros sočiųjų garų slėgis p_s . Pagal (5.4.8) formulę randama santykinė drėgmė. Kita grupė prietaisų, kuriais nustatoma drėgmė ir kurie dažniausiai naudojami, vadinami *psichrometrais* (gr. *psychros* – šaltis). Paprastai juos sudaro du vienodi termometrai. Vieno iš jų galas būna apvyniotas higroskopine medžiaga ir įleistas į indą su vandeniu (plačiau žr. darbo „Oro drėgmės nustatymas Asmano psichrometru“ metodiką).

5.4.10. Virimas

Skysčiui suteikus didesnę šilumos kiekį, negu suvartojama garavimui pastovioje temperatūroje, skysčio temperatūra didėja ir garavimas spartėja. Suteikiant vis didesnę šilumos kiekį, galima skystį užvirinti. *Virimas – tai garavimas ne tik iš paviršiaus, bet ir iš viso skysčio tūrio. Verdantis skystis garuoja taip sparčiai, kad skysčio temperatūra nebedidėja*, nes, kad ir kiek šilumos būtų suteikiama skysčiui, ji visada suvartojama garavimui. Virimui esminės reikšmės turi dujų burbulėliai, kurių visada yra skystyje; ypač daug jų būna prilipusių prie indo sienelių ir skystyje esančių smulkių kietų dalelių.

Kad prasidėtų virimas, skystyje turi būti oro ar kitų dujų burbuliukų, t. y. sistema turi būti dvifazė, nes priešingu atveju virimas negali prasidėti. Jeigu skystis būtų homogeninis, tai jam virti (garuoti iš viso tūrio) reikėtų, kad visame tūryje susidarytų gausybė sočiųjų garų burbuliukų. Kitais žodžiais tariant, didžiausią energiją turinčios skysčio molekulės turėtų kažkaip susirinkti kartu ir sudaryti mažytį sočiųjų garų burbuliuką. Vien dėl jo mažo skersmens jis būtų sugniuždytas milžiniško papildomo slėgio po kreivu skysčio paviršiumi, kuris pagal Laplaso dėsnį lygus

$$p = \frac{2\sigma}{r}; \quad (5.4.11)$$

čia σ – skysčio paviršiaus įtempimo koeficientas, r – burbuliuko spindulys.

Jeigu skystyje yra nedideli oro burbuliukai, prilipę prie indo sienelių ar kitų skystyje esančių daiktų, tai jie gali tapti garavimo centrais. Į tuos burbuliukus garuoja skystis, juose susidaro sotieji skysčio garai, o burbuliukai, kaitinant skystį, tolydžio didėja. Prilipusius burbuliukus prie sienelių veikia dvi priešingų kryptų jėgos: vertikaliai aukštyn nukreipta Archimedo jėga ir žemyn – burbuliuko sunkio jėga. Jų atstojamoji

$$F_A = \frac{4}{3} \pi (\rho_{sk} - \rho_0) g r^3; \quad (5.4.12)$$

čia ρ_{sk} ir ρ_0 – atitinkamai skysčio ir oro tankiai, g – laisvojo kritimo pagreitis. Burbuliukus laiko prilipusius prie sienelių tam tikra molekulinės prigimties prilipimo jėga F_p , tiesiog proporcinga burbuliukų paviršiaus plotui:

$$F_p = k r^2; \quad (5.4.13)$$

čia k – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo molekulių jėgų didumo ir prilipusios prie sienelės burbuliuko ploto dalies. Didėjant burbuliukų matmenims, šis koeficientas nekinta.

Stebint virimą stikliniame inde, matyti, kad burbuliukai tam tikrą laiką yra prilipę prie indo dugno ir sienelių. Vadinasi, šiuo metu $F_p > F_A$.

Didėjant burbuliukų spinduliui r , jėga F_A didėja greičiau negu F_p , kol jos susilygina. Tuo momentu burbuliukai atitrūksta nuo sienelių ir iškyla į skysčio paviršių. Kad sotieji garai iš iškilusių į paviršių burbuliukų galėtų išeiti į aplinką, jie turi paviršiuje sprogti ir atsiverti. Tai gali įvykti tik tada, kai slėgis burbuliukų viduje tampa lygus išoriniam jį veikiančiam slėgiui. Bet kuriame skysčio gylyje h ir bet kokiam burbuliuko spinduliui r turi galioti burbuliukų pusiausvyros sąlyga

$$p_s + \frac{m_0}{M_o} \frac{rT}{\frac{4}{3}\pi r^3} = p + \rho_{\text{sk}} gh + \frac{2\sigma}{r}; \quad (5.4.14)$$

čia $p_s = f(T)$ – sočiųjų garų slėgis, netiesiškai priklausantis nuo temperatūros, lygybės kairiosios pusės antrasis dėmuo – oro slėgis burbuliuko viduje, M_o – oro molio masė, p – išorinis (dažniausiai atmosferos) slėgis į skysčio paviršių, $2\sigma/r$ – Laplaso slėgis pagal (5.4.11) dėsnį. Lygties kairioji pusė yra slėgis burbuliukų viduje, o dešinioji – jų išorėje. Kai jie susilygina (mažėjant h , didėjant r ir p_s), burbuliukai sprogsta ir skystis užverda. Atmetus (5.5.14) lygybėje nykstamai mažus dydžius, virimo pradžios sąlyga galima suformuluoti taip: *kai sočiųjų garų slėgis pasidaro lygus išoriniam slėgiui, pakilę į skysčio paviršių burbulėliai sprogsta ir garai išeina į aplinką – skystis pradeda virti*. Vadinasi, šildomas skystis, esant normaliam slėgiui, pradeda virti tokioje temperatūroje, kurioje jo sočiųjų garų slėgis lygus 760 mm Hg stulpelio. Pavyzdžiui, vandens virimo temperatūra yra 100°C. Iš čia aišku, kodėl virimo temperatūra priklauso nuo išorinio slėgio: slėgiui didėjant, virimo temperatūra didėja, ir atvirkščiai. Vandens virimo temperatūra sumažėja 1 laipsniu, slėgiui sumažėjus 27 mm Hg (pavyzdžiui, pakilus vertikaliai aukšty n virš horizonto 297 m).

Skystį, kuriame nėra dujų burbulėlių, galima perkaitinti, t. y. galima išildyti iki virimo temperatūros, tačiau jis nevirs. Perkaitinto skysčio būseną yra nestabili, ir virimas gali prasidėti labai staigiai. Skystį galima perkaitinti ir staigiai sumažinus išorinį slėgį, kad jis liktų mažesnis už sočiųjų garų slėgį toje temperatūroje. Perkaitintas skystis naudojamas didelės energijos dalelėms registruoti burbulinėje kameroje.

LABORATORINIS DARBAS

Oro drėgmės nustatymas Asmano psichrometru**Darbo užduotys**

- Nustatykite:
 - absoliučiąją ir santykinę oro drėgmę;
 - įvertinkite efektyviają patalpos temperatūrą.

Darbo priemonės ir prietaisai

Asmano psichrometras, pipetė, stovas.

Darbo metodika

Šiame darbe reikia nustatyti oro drėgmę ir, atsižvelgiant į gautą jos vertę, rasti efektyviają patalpos temperatūrą, įvertinti, ar patalpoje sudaromos optimalios žmogaus savijautai sąlygos.

Oro drėgmė nustatoma Asmano psichrometru (5.4.4 pav.). Jį sudaro du termometrai (T_1 ir T_2). Termometro (T_2) rutuliukas apvyniojamas drobiniu arba kitokios higroskopinės medžiagos gabalėliu. Jis sudrėkinamas vandeniu, kuris garuodamas reikiamą šilumos kiekį paima iš paties termometro bei jo artimiausios aplinkos oro, todėl termometro (T_2) temperatūra mažėja. Norint išvengti garų šalia šlapio termometro koncentracijos padidėjimo, įjungiamas ventiliatorius (V), kuris nupučia garų perteklių. Todėl greta abiejų termometrų visą matavimo laiką išlieka aplinkoje esančių vandens garų koncentracija.

Sudrėkinto termometro temperatūra mažėja tol, kol nusistovi šilumos nuostolių dėl vandens garavimo ir šilumos kiekio, gautamo dėl laidumo ir konvekcijos, pusiausvyra.

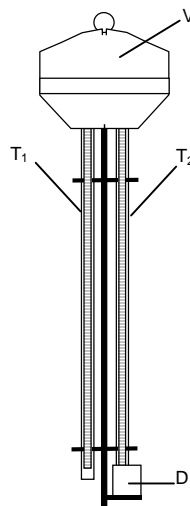
Kai drėgnojo termometro temperatūra nustoja kristi, sausasis (T_1) ir šlapisis (T_2) termometrai rodo skirtingas temperatūras t_1 ir t_2 . Garavimas vyksta tuo sparčiau, taigi ir abiejų termometrų temperatūrų skirtumas tuo didesnis, kuo ore esančių vandens garų slėgis p mažesnis už slėgį p_s garų, sotinančių aplinkos orą.

Temperatūrų skirtumas $t_1 - t_2$ yra atvirkščiai proporcingas psichrometriniam koeficientui k , kuris priklauso nuo ventiliatoriaus galios, ir P – atmosferos slėgiui:

$$t_1 - t_2 = \frac{1}{k} \frac{p_s(t_2) - p}{P}. \quad (5.4.15)$$

Tuomet

$$p = p_s(t_2) - kP(t_1 - t_2). \quad (5.4.16)$$



5.4.4 pav. Psichrometro struktūrinė schema

LABORATORINIS DARBAS

Vandens virimo temperatūros priklausomybės nuo išorinio slėgio tyrimas*Darbo užduotis*

- Nustatykite vandens virimo priklausomybę nuo išorinio slėgio.

Darbo priemonės ir prietaisai

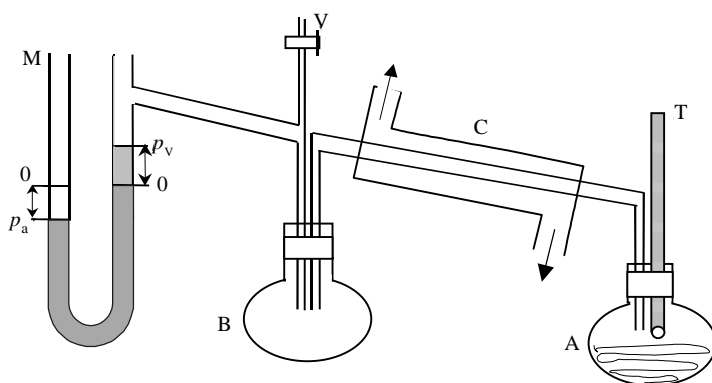
Dvi karščiui atsparios kolbos, aušintuvas, gyvsidabrio manometras, oro siurblys, termometras.

Darbo metodika

Vandens virimo temperatūros priklausomybė nuo išorinio slėgio tiriama įrenginiu, pavaizduotu 5.4.5 paveiksle. Kolba (A), kurioje yra kaitinamas vanduo, sujungta su aušintuvu (C), o jo antrasis galas – su kolba (B), kuri savo ruožtu sujungta su gyvsidabrio manometru (M). Jungiamajame vamzdyje įtaisyta sklendė (V), blokuojanti sistemą nuo atmosferos. Į kolbą (A) yra įstatytas spiritinis termometras (T). Jo apatinis galas yra aukščiau skysčio paviršiaus.

Darbo eiga

1. Atsukama šaldymo sistemos sklendė.
2. Užsukama sklendė (V), ir oro siurbliu iš kolbų išsiurbiamas dalis oro (iki manometro viršutinio stulpelio aukščio $p_v = 300 \text{ mm Hg}$, bet ne daugiau).
3. Pasižymėjus ir apatinio manometro stulpelio rodmenį p_a , apskaičiuojamas atmosferos slėgis ir slėgio sistemoje skirtumas (t. y. užfiksuojamas manometro rodmuo $p_m = p_a + p_v$).
4. Užrašomas barometro rodmuo, t. y. atmosferos slėgis p_{atm} .
5. Po kolba (A) atsargiai pastatoma elektrinė plytelė (plytelės kaitinimo spiralė neturi liestis su kolbos dugnu) ir įjungiama.



5.4.5 pav. Įrenginys vandens virimo temperatūros priklausomybei nuo išorinio slėgio tirti

6. Užvirus kolboje (A) vandeniui, užrašoma virimo temperatūros vertė.
7. Atsukus sklendę (V) ir tokiu būdu padidinus slėgį kolboje (A) (t. y. sumažinus manometro viršutinio stulpelio aukštį 50 mm Hg), vanduo nustos virti.
8. Kartojami darbo eigos 3, 4, 6 ir 7 punktai (šiuos punktus reikia atlikti gana greitai ir jokių būdu nesitraukiant nuo įrenginio), didinant slėgį kolboje (A) tol, kol jis bus lygus atmosferos slėgiui.
9. Duomenys surašomi į lentelę:

p_m , mm Hg	$p_i = p_{\text{atm}} - p_m$, mm Hg	t , °C

10. Nubraižomas vandens virimo temperatūros priklausomybės nuo išorinio slėgio grafikas.

5.5. Šilumos perdavimo būdai

- Kūnų vidinės energijos ir šilumos sąvokos.
- Šilumos perdavimo būdai: laidumas, konvekcija, spinduliavimas.
- Šilumos srauto ir kiekio sąvokos.
- Savitoji šiluminė talpa.
- Šilumos laidumo lygtis (Furjė dėsnis).
- Šilumos laidumo koeficientas. Jo fizikinė prasmė ir matavimo vienetai.

5.5.1. Kūnų vidinės energijos ir šilumos sąvokos

Kiekvieną kūną ar kūnų sistemą sudaro daugybė dalelių (atomų, molekulių ir kt.), kurios dalyvauja netvarkiamame šiluminiame judėjime ir nuolat sąveikauja viena su kita. Visų šių dalelių pilnutinė energija, sąlygota jų netvarkingo judėjimo bei tarpusavio sąveikos, vadinama *kūno vidine energija*. Ją sudaro atomų ir molekulių slenkamojo ir sukamojo judėjimo kinetinė energija, jų virpesių energija, atomų bei molekulių tarpusavio sąveikos potencinė energija, potencinė ir kinetinė elektronų energija ir branduolinė energija.

Tarpusavyje sąveikaudami, kūnai gali keistis tiek mechanine, tiek vidine energija. *Šiluma* vadinama sklindanti vidinė energija, t. y. vidinės energijos dalis, kuri pereina iš vieno kūno į kitą arba iš vienos kūno vietos į kitą. Todėl fizikiniu požiūriu negalima sakyti, kad įkaitęs kūnas turi daug šilumos. Jis turi daug vidinės energijos.

5.5.2. Šilumos perdavimo būdai

Patirtis rodo: jeigu izoliuotame kūne esantis temperatūrų skirtumas koku nors būdu nepalaikomas, tai jis per kurį laiką išnyksta ir visų kūno dalių temperatūra pasidaro ta pati. Tokia būseną vadinama *šilumine pusiausvyra*. Tai įvyksta todėl, kad kūnuose šiluma sklinda iš aukštesnės temperatūros

vietai į žemesnės temperatūros vietas. Tik kūnui esant šiluminėje pusiausvyroje, yra prasmė kalbėti apie jo temperatūrą. Norint išmatuoti kūno temperatūrą termometru, būtina, kad nusistovėtų termometro ir matuojamojo kūno šiluminė pusiausvyra. Štai kodėl šio dydžio matavimas užtrunka ilgesnį laiką.

Šilumos perdavimas yra labai sudėtingas fizikinis procesas, nes susideda iš hidrodinaminių ir šiluminių procesų. Tačiau jau pirmieji stebėjimai parodė, kad šilumos kiekis, kurį gauna ir atiduoda per laiko vienetą paviršius, apiplaunamas fluideo (šia sąvoka apibendrinamas tekantis skystis ar dujos, dalyvaujantys šilumos mainuose), proporcingas paviršiaus ir fluideo temperatūrų skirtumui. Šį dėsningumą Niutonas apibendrino tokia lygtimi:

$$Q = kS\Delta T; \quad (5.5.1)$$

čia S – paviršiaus plotas; ΔT – fluideo ir paviršiaus temperatūrų skirtumas. Jei fluideo šiltesnis už paviršių, tai $\Delta T = T - T_p$; čia T ir T_p – fluideo ir paviršiaus vidutinės temperatūros.

Lygtyje esantis proporcingumo koeficientas k vadinamas *šilumos perdavimo koeficientu*. Jis apibūdina šilumos kiekį, atiduodamą paviršiaus ploto vienetui arba gaunamą nuo jo ploto vieneto per laiko vienetą, kai paviršiaus ir fluideo temperatūrų skirtumas lygus vienam laipsniui. Jis matuojamas $W/(m^2 \cdot K)$.

Šilumos perdavimo koeficientas yra sudėtinga daugelio kintamųjų funkcija. Šį koeficientą galima nustatyti teoriškai ir eksperimentiškai. Pirmuoju atveju jis apskaičiuojamas sprendžiant diferencialines lygtis, aprašančias hidrodinaminius ir šiluminius procesus, kurie vyksta aptekant fluidui paviršių. Tačiau šios lygtys sudėtingos, jas sprendžiant paprastai daroma daug prielaidų, todėl dažniausiai jis nustatomas atliekant eksperimentinius šilumos perdavimo tyrimus.

Šiluma gali būti perduodama įvairiais būdais. Svarbiausi augalų ir gyvų organizmų aplinkoje yra trys šilumos perdavimo būdai: *spinduliavimas, konvekcija ir šilumos laidumas*.

5.5.3. Spinduliavimas

Nutolę vienas nuo kito kūnai šilumą vienas kitam perduoda *spinduliavimo būdu*. Priešingai negu kiti šilumos perdavimo būdai, spinduliavimas gali vykti ir vakuume. Bet koks kūnas (tarp jų ir žmogus), kurio temperatūra aukštesnė kaip 0 K, skleidžia spinduliuotę. Ji yra tos pačios prigimties, kaip ir regimoji šviesa, tik ilgesnio bangos ilgio, t. y. jos sritis yra už raudonųjų spindulių, todėl ji vadinama *infraraudonąja spinduliuote* (lot. *infra* – po). Pavyzdžiui, žmogaus kūno paviršius spinduliuoja (bangos ilgis yra 5–50 μm ; maksimalus intensyvumas tenka bangos ilgiui 9,5 μm). Priklausomai nuo kūno temperatūros, keičiasi spinduliuotės intensyvumas ir spektrinė sudėtis, todėl dažnai mūsų akys jos nepriima kaip *regimosios spinduliuotės*.

Įvairūs paviršiai geba nevienodai spinduliuoti ir sugerti šiluminę energiją. Kūnas, visiškai sugeriantis visų dažnių spinduliuotę, vadinamas *absoliučiai juodu kūnu*. Realiai tokių kūnų gamtoje nėra, ši sąvoka yra tik modelis. Kūnai, kurie turi mažesnę už vienetą sugerties faktorių ir jis nepriklauso nuo šviesos bangos ilgio, vadinami *pilkaisiais*. Gamtoje pilkų kūnų taip pat nėra, tačiau

kai kurie kūnai tam tikrame bangos ilgių intervale spinduliuoja ir sugeria kaip pilkieji kūnai. Pavyzdžiui, kartais žmogaus kūnas laikomas pilkuoju.

Absoliučiai juodo kūno energinį šviesį (kuriame nors paviršiaus taške paviršiaus elemento skleidžiamą spinduliuotės (energijos) srautą, padalytą iš to elemento ploto) aprašo *Stefano ir Bolcmano dėsnis*:

$$R_e = \sigma T^4 \text{ (juodojo kūno)}, \quad R_e = \alpha \sigma T^4 \text{ (pilkojo kūno)}, \quad (5.5.2)$$

iš kurio matyti, kad energinis šviesis proporcingas termodinaminei temperatūrai ketvirtuoju laipsniu. Vadinas, daugiau įkaitęs kūnas intensyviau spinduliuoja. Čia σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, α – sugerties faktorius. Kitas šiuos procesus aprašantis yra *Vyno dėsnis*:

$$\lambda_{\max} = b/T; \quad (5.5.3)$$

čia λ_{\max} – bangos ilgis, kuriam tenka maksimalus spektrinis energinės apšvietos tankis, b – Vyno konstanta. Tai iliustruoja toks pavyzdys: kambario temperatūroje kūnų šilumos spinduliavimas vyksta infraraudonojoje srityje ir žmogaus akis jo nefiksuoja. Pakilus temperatūrai, kūnai pradeda šviesti tamsiai raudonai, o esant dar aukštesnei temperatūrai – baltai su melsvu atspalviu. Pagal Stefano ir Bolcmano bei Vyno dėsnius galima matuojant kūnų spinduliavimą nustatyti jų temperatūrą.

Geriausiai spinduliuotę sugeria matinis juodas paviršius, o blogiausiai – poliruotas metalinis paviršius. Kai spinduliuotė sugeriama uždaroje erdvėje, pavyzdžiui, šiltnamyje, tuomet kūnai sugeria Saulės spinduliuotę ir išspinduliuoja jau mažesnės energijos spinduliuotę, kuri negali prasiskverbti pro stiklą. Panašų barjerą atmosferoje suformuoja anglies dioksidas. Pastaruoju metu šis barjeras didėja, todėl oras pamažu šiltėja.

Vienas iš galingiausių šiluminio spinduliavimo šaltinių yra Saulė. Saulės spinduliuotės srautas, tenkantis vienam kvadratiniam metrui Žemės atmosferos ribos plotui, yra 1350 W. Šis dydis vadinamas *Saulės pastoviaja*. Tačiau realiai šis dydis būna mažesnis, nes priklauso nuo Saulės aukščio virš horizonto ir spinduliuotės silpnėjimo dėl atmosferos, be to, kartu keičiasi ir spektrinė spinduliuotės sudėtis.

Galia, kurios netenka žmogus, sąveikaudamas su jį supančia aplinka (jei jos temperatūra yra žemesnė už žmogaus), gali būti apskaičiuota taip:

$$P = P_1 - P_0 = S\delta (T_1^4 - T_0^4);$$

čia T_0 ir T_1 – atitinkamai aplinkos ir žmogaus kūno paviršiaus temperatūra, $\delta = a\sigma$ (žr. (5.5.2)) – spinduliavimo koeficientas, S – kūno paviršiaus plotas. Apsirengusio žmogaus T_1 suprantama kaip rūbų paviršiaus temperatūra. Pavyzdžiui, nusirengęs žmogus, esant 18°C aplinkos temperatūrai ir 33°C odos temperatūrai, kiekvieną sekundę nuo 1,5 m² paviršiaus (toks vidutiniškai žmogaus kūno paviršiaus plotas) spinduliuodamas netenka 122 J energijos, kai apsirengęs medvilniniais drabužiais (paviršiaus temperatūra 24°C) – tik 37 J.

5.5.4. Konvekcija

Skysčiuose bei dujose šiluma daugiausia perduodama *konvekcijos būdu*. Skysčius ir dujas šildant, kinta jų tankis. Šiltesnis skystis (arba dujos) yra lengvesnis (mažesnio tankio) ir kyla aukštyn, o šaltesnis, būdamas sunkesnis, slenka žemyn. Skysčiuose ir dujose susidaro konvekcinės srovės, kurios, nešdamos šiltesnio (mažesnio tankio) skysčio arba dujų mases, perneša ir jų turimą vidinę energiją. Dėl šios priežasties vanduo ežero dugne yra šaltesnis negu paviršiuje. Milžiniškus šilumos kiekius konvekcijos būdu gamtoje perneša vėjai ir jūrų srovės, todėl šis procesas lemia ir orus Žemėje: išilę prie Žemės paviršiaus oro sluoksniai kyla į viršų, maišosi su šaltesnėmis oro masėmis – taip formuojasi ciklonai ir anticiklonai. Su šiuo šilumos perdavimu susiduriama buityje. Dėl konvekcijos greičiau išsilygina temperatūra patalpose, greičiau sušyla vanduo virdulyje ir pan.

Yra dviejų tipų konvekcija: *laisvoji* ir *priverstinė*.

Esant laisvajai konvekcijai, šilumos pernaša priklauso nuo oro cirkuliacijos aplink ir virš įkaitinto ar atšaldyto objekto. Ją lemia oro tankio skirtumų, atsirandančių dėl temperatūros gradiento, dėl vandens garų koncentracijos gradiento arba dėl abiejų efektų, kombinacijos.

Priverstinė konvekcija vyksta tada, kai pernaša per ribinį sluoksnį (žr. 5.1 skyrių) vyksta pučiant oro srovei ir nuo srovės greičio priklauso šilumos pernašos greitis.

Kai T_s temperatūros paviršius yra kitos temperatūros T dujose (arba skystyje), šilumos nuostoliai per vienetinio ploto laminarųjį pasienio sluoksnį, kurio storis δ , yra

$$C = k(T_s - T) / \delta ; \quad (5.5.4)$$

čia k – dujų (skysčio) šilumos laidumo koeficientas. Ši lygtis gali būti naudojama tiek laisvajai, tiek priverstinei konvekcijai. Patogesnė išraiška, kurioje papildomai įtraukiamas charakteringas kūno matmuo d (sferai ar cilindriui d yra skersmuo, o stačiakampei plokštei – matmuo vėjo kryptimi). Šiuo atveju lygtis yra tokia:

$$C = \left(\frac{d}{\delta}\right)k(T_s - T) / d = Nu k(T_s - T) / d ; \quad (5.5.5)$$

čia $Nu = d / \delta$ – Niuselto kriterijus. Panašiai kaip Reinoldso skaičius, jis tinka įvertinti jėgas, sąlygotas panašių kūnų, panardintų į judantį orą ar skystį. Niuselto kriterijus leidžia sulyginti panašių, tačiau skirtingų matmenų kūnų konvekcinius šilumos nuostolius esant įvairiems vėjo greičiams. Naudojant difuzijos procesų nulemtos šiluminės varžos r_H išraišką

$$r_H = \frac{\rho C_p d}{k Nu} , \quad (5.5.6)$$

(5.5.5) lygtis išreiškiama taip:

$$C = \rho C_p (T_s - T) / r_H . \quad (5.5.7)$$

Elektros kurse nagrinėjant elektrines grandines, plačiai vartojama elektrinės varžos sąvoka. (žr. 6.1 skyrių). Ji apibūdina medžiagos pasipriešinimą srovės tekėjimui ir pagal Omo dėsnį išreiškiama įtampos ir srovės santykiu. Elektrinės grandinės srovės galima lengvai suskaičiuoti pakeičiant jos atšakas atitinkamomis varžomis ir įskaitant jų nuoseklųjį arba lygiagrečiųjį jungimą.

Tokiu metodu galima nesunkiai įvertinti įvairių atšakų, kurios iš esmės gali aprašyti įvairius laidumo mechanizmus, indėlį į bendrąją grandinės srovę. Pasirodo, *apibendrinta varžos sąvoka* yra patogi aprašant ne tik elektros srovės tekėjimą, bet ir įvertinant šilumos, judesio kiekio ir masės pernašos greičius ir srautus. Vartojant reiškinį aprašančios varžos sąvoką, šį reiškinį galima aprašyti kelių lygiagrečiai sujungtų varžų suma, jei atitinkami procesai vyksta lygiagrečiai vienu metu iš tos pačios tiriamo objekto dalies; arba nuosekliai sujungtų varžų suma, jei jie vyksta nuosekliai iš vienos dalies link kitos, o iš šios į tolimesnę. Sudėtingi procesai aprašomi lygiagrečiai ir nuosekliai sujungtomis varžomis, tik jau apibūdinančiomis atitinkamai šilumos, judesio kiekio ar masės pernašos reiškiniais.

Apibendrintos varžos sąvoka jau daug metų yra vartojama biologų ir meteriologų. Ji reiškia faktorių, kontroliuojantį pernašos reiškinio greitį. Bendru atveju varža yra išreiškiama panašiai kaip Omo dėsnis:

$$\text{parametro pernašos greitis} = \frac{\text{potencialų skirtumas}}{\text{varža}}.$$

Ši išraiška pernašos reiškiniams gaunama integruojant išilgai pernašos kelio, todėl bendru atveju priklauso nuo paviršiaus, kuriuo vyksta šilumos, judesio kiekio ar masės pernaša, geometrijos. Pernašos reiškinio varžos matavimo vienetas yra sm^{-1} . Kuo didesnė atitinkamo pernašos reiškinio varža, tuo silpnesnis pernašos procesas.

Priverstinė konvekcija. Priverstinės konvekcijos sąlygomis Nu kriterijus priklauso nuo šilumos pernašos greičio per pasienio sluoksnį tarp šiltesnio ar šaltesnio paviršiaus ir oro, einančio virš jo, t. y. proceso, analogiško judesio momento pernašai dėl paviršiaus trinties. Todėl Niuselto kriterijus yra Reinoldso kriterijaus funkcija. Nagrinėjant šilumos pernašą ore, naudojamas toks Nu ir Re kriterijų sąryšis:

$$Nu = ARe^n; \quad (5.5.8)$$

čia A ir n yra konstantos, tačiau jų vertės priklauso nuo kūno geometrijos. Oro srauto greitį V šiuo atveju įskaito Reinoldso skaičius Re ir būtent per jį yra įskaitoma priverstinė konvekcija. Taigi priverstinės konvekcijos būdu per vienetinį plotą perduodamas šilumos kiekis C yra proporcingas Niuselto kriterijui, šiuo atveju proporcingam Reinoldso kriterijui ir kartu proporcingam aptekancio oro srauto greičiui. Tačiau ši prieklausa yra sudėtingesnė negu tiesinė ir, be to, priklauso nuo to, srautas yra laminarusis ar turbulentinis.

Laisvoji konvekcija. Laisvosios konvekcijos sąlygomis šilumos pernaša priklauso nuo oro cirkuliacijos apie karštesnį ar šaltesnį, lyginant su oro temperatūra, objektą dėl temperatūros gradiento, kuris sukuria tankio gradientus. Šiuo atveju Niuselto kriterijus gali būti išreiškiamas Grashofio Gr kriterijumi:

$$Nu = BGr^m; \quad (5.5.9)$$

čia A ir n yra konstantos, kurių vertės taip pat priklauso nuo kūno geometrijos. Grashofio kriterijus priklauso nuo paviršiaus ir jį gaubiančio oro temperatūrų skirtumo ($T_s - T$), charakteringo objekto matmens d , oro šiluminio plėtimosi koeficiento α , oro kinematinės klampos ν ir laisvojo kritimo pagreičio. Fizikine prasme *Grashofio kriterijus* yra lygus keliamosios jėgos ir inercinės jėgos sandaugos santykiui su kinematinės klampos kvadratu. Jo skaitinė išraiška tokia:

$$Gr = agd^3(T_s - T) / \nu^2. \quad (5.5.10)$$

Dideliu Gr kriterijumi pasižyminčiose sistemose laisvoji konvekcija yra stipri, nes šiuo atveju keliamosios ir inercinės jėgos, kurios sukelia oro cirkuliaciją, yra daug didesnės už klampumo jėgas, kurios priešinasi cirkuliacijos radimuisi. Imant a ir ν vertes 20°C temperatūros orui, Grashofo kriterijus

$$Gr = 158d^3(T_s - T), \quad (5.5.11)$$

kai d išreiškiamas centimetrais. Laminariosios laisvosios konvekcijos sąlygomis (5.5.9) išraiškoje $m = 1/4$ nepriklausomai nuo šilumą prarandančio objekto geometrinės formos. Šiuo atveju

$$Nu = BGr^{1/4} \sim (T_s - T)^{1/4},$$

ir visas šilumos praradimo greitis C dėl laisvosios konvekcijos yra proporcingas

$$C \sim Nu(T_s - T) \sim (T_s - T)^{1/4} (T_s - T) \sim (T_s - T)^{5/4}. \quad (5.5.12)$$

Tai vadinamasis *penkių ketvirtųjų aušimo dėsnis*.

Mišrioji konvekcija. Dėl nuolat kintančio vėjo greičio, jo krypties ir kartais dėl šilumą prarandančio paviršiaus judėjimo daugumoje gamtinių sistemų konvekcija yra labai sudėtinga. Pučiant stipriems oro gūsiams, lapas ar gyvūnas netenka šilumos daugiausia dėl priverstinės konvekcijos, bet vėjui laikinai aprimus pagrindinė yra laisvoji konvekcija. Todėl konvekcijos veika gali būti apibūdinama kaip mišri ta prasme, kad abu konvekcijos būdai dalyvauja šilumos pernašoje, tačiau jų santykinis indėlis laikui bėgant kinta. Šią situaciją yra labai sudėtinga nagrinėti tiek teoriškai, tiek eksperimentiškai, todėl šilumos pernaša aplinkoje apskaičiuojama iš vidutinio vėjo greičio, kai priverstinė konvekcija laikoma vyraujančia, arba iš temperatūros skirtumo, jei vėjas yra labai silpnas.

Paprastai šiuos du konvekcijos būdus galima atskirti naudojantis keliamosios jėgos ir inercinės jėgos santykiu, kuris proporcingas kriterijų Gr ir Re^2 santykiui Gr / Re^2 . Kai $Gr \gg Re^2$, keliamoji jėga yra daug didesnė už inercines jėgas, šilumos pernaša vyksta dėl laisvosios konvekcijos. Kai $Gr \ll Re^2$, keliamoji jėga yra labai maža, tuomet svarbi priverstinė konvekcija. Pavyzdžiui, jei 5 cm skersmens lapas yra 5°C šiltesnis už aplinkos orą ($Gr = 10^5$), priverstinė konvekcija yra svarbi, kai $V > 1 \text{ m/s}$ ($Re^2 = 10^7$), tačiau kai $0,1 < V < 0,5 \text{ m/s}$ (toks vėjo greitis gana dažnas javų lauke ir tada $Re^2 = 10^5 - 2,5 \times 10^6$), šilumos pernaša vyksta tiek dėl laisvosios, tiek dėl priverstinės konvekcijos.

Šilumos pernaša augaluose. Nagrinėjant šilumos pernašą technikoje, paprastai kūno temperatūra laikoma vienoda visame kūno paviršiuje. Tačiau realiai tokia situacija galima tik didelio šilumos laidumo metaliniams paviršiams. Gamtoje objektai yra mažai laidūs šilumai, todėl šiuo atveju tariama, kad bet kuris vienetinis kūno paviršius atiduoda vienodą šilumos kiekį. Toks pavyzdys yra augalo lapas Saulės apšviestoje vietoje. Esant vienodiems šilumos nuostoliams iš bet kurio lapo ploto vieneto, jo temperatūra lapo paviršiuje jau tampa nevienoda.

Daug eksperimentinių darbų atlikta lapų šilumos nuostoliams dėl konvekcijos įvertinti. Tam buvo naudojamos tiek lapų replikos, tiek realūs lapai. Šie eksperimentai parodė, kad čia yra tam

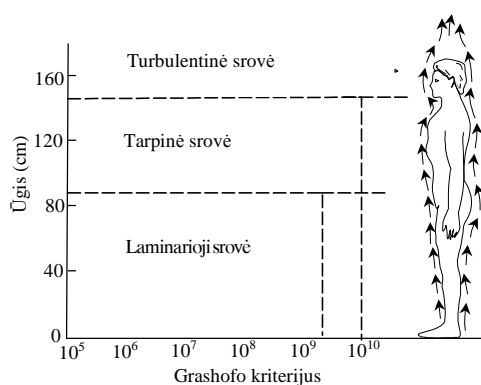
tikras skirtumas, bet tiek temperatūros kitimas išilgai lapo, tiek temperatūros kitimo ribos yra beveik vienodos. Šie matavimai taip pat patvirtino teorines išvadas, kad einant tolyn nuo lapo krašto, į kurį pučia vėjas, temperatūra didėja. Realus lapo sudėtingesnis temperatūros kitimas yra susijęs su tuo, kad šiuo atveju dėl lapo paviršiaus reljefo kinta ribinio sluoksnio storis.

Atlikti eksperimentai su įvairios formos varinėmis skirtingos orientacijos plokštelėmis, jas šildant ir stebint šilumos praradimą esant vėjo greičiui nuo 0 iki 0,3 m/s, leido nustatyti svarbius dėsningumus. Plokštelės buvo vienodo ploto, bet skirtingos formos: apskritimo, šešiakampės žvaigždės ir net ažuolo lapo su charakteringais įkirpimais. Buvo matuojama elektros energija, kuri būtina išlaikyti lapo temperatūrą 15°C didesnę negu aplinkos oro. Ši energija yra atvirkščiai proporcinga šiluminei varžai (žr. 5.5.5.1 skyrelį). Gautos tokios išvados:

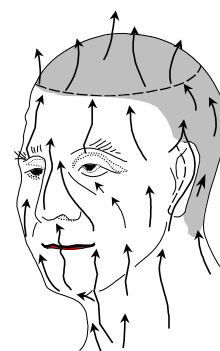
- Padidinus vėjo greitį nuo 0 iki 0,3 m/s, šiluminė varža sumažėjo nuo 30 iki 95 %;
- įvairių formų plokštelių varža mažesnė, palyginti su apskritos formos plokštele, ir ji mažiau priklauso nuo savo orientacijos;
- su giliais įkirpimais modelis, atitinkantis saulėje esantį ažuolo lapą, visuomet turi mažesnę šiluminę varžą negu lapai, esantys pavėsyje su mažesniais įkirpimais;
- lapų modelių šiluminė varža mažiausia, kai paviršius pakrypęs (nestatus) vėjo krypties atžvilgiu.

Šie matavimai patvirtina kai kurių ekologų hipotezę, kad lapų forma gali rodyti augalų adaptaciją prie šiluminės aplinkos.

Šilumos pernaša žinduolių organizmuose. Norint nustatyti žinduolių šilumos pernašą, daromi įvairūs jų modeliai naudojant atitinkamų matmenų cilindrus ar sferas. Tokio modeliavimo pavyzdys gali būti avies šilumos pernaša, tam naudojant 0,33 m skersmens elektriškai kaitinamą horizontalų cilindrą. Kituose eksperimentuose cilindras buvo uždengtas avies vilna. Toks modeliavimas gana gerai atskleidžia šilumos mainus ant tikrų žinduolių kailio. Esant nestipriam vėjui, pasienio sluoksnio storis yra didesnis, kai paviršius padengtas plaukais, bet kai $Re > 10^5$ (Reinoldso skaičius; žr. 5.1.6 skyrelį), tokio paviršiaus pasienio sluoksnio storis buvo mažesnis. Antruoju atveju, matyt, vėjas kedena plaukus ir sukelia turbulentiškumą.



5.5.1 pav. Grashofio kriterijaus priklausomybė nuo aukščio (žmogui) [pagal 48]



5.5.2 pav. Laisvoji konvekcija apie žmogaus galvą [pagal 48]

Laisvoji konvekcija ypač svarbi tada, kai yra didelis paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumas. Pavyzdžiui, esant avies kailio temperatūrai $T_s = 85^\circ\text{C}$, o oro $T = 40^\circ\text{C}$ (tai realu Australijoje), Grashofo kriterijus $Gr \sim 2 \cdot 10^8$ (vienas iš šilumos mainų kriterijų) ir laisvoji konvekcija susilygina su priverstine, kai vėjo greitis yra 0,7 m/s.

Žmogaus atveju laisvoji konvekcija yra gana sudėtinga, nes Grashofo kriterijus priklauso nuo aukščio trečiuoju laipsniu (d^3), t. y. kinta kartu su aukščiu, kaip parodyta 5.5.1 paveiksle. Eksperimentiškai toks oro judėjimas dėl laisvosios konvekcijos buvo patvirtintas Šlireno (*Schlieren*) fotografijos metodu tiriant oro judėjimą apie galvas (5.5.2 pav.). Oro kilimas apie galvą ir atsilenkimas prie nosies šnervių yra svarbus organizmui apsaugoti nuo bakterijų. Panašios fotografijos gautos tiriant laisvąją konvekciją nuo kviečio varpos ir triušio.

Atliekant eksperimentus su paukščių ir vabzdžių metalinėmis kopijomis, sudarytomis iš cilindru ir sferų, gauti rezultatai gana artimi teoriniams. Pavyzdžiui, tiriant negyvų vabzdžių temperatūrą, apšvietus juos lempa ir pučiant oro srautą greičiu v , gautas temperatūrų skirtumas $T_s - T$ yra proporcingas krantinčiai spinduliuotės energijai ir atvirkščiai proporcingas \sqrt{v} . Taip turėtų būti su cilindrais tam tikroje Re verčių srityje.

5.5.5. Šilumos laidumas

Šiluma iš vieno kūno į kitą arba iš vienos kūno dalies į kitą gali sklirti tiesiogiai jiems liečiantis. Toks šilumos perdavimo būdas vadinamas *šilumos laidumu*. Įvairių kietųjų kūnų šilumos laidumas yra nevienodas. Vieni iš jų, pavyzdžiui, metalai ir įvairūs kristalai, yra geri *šilumos laidininkai*, o kiti, pavyzdžiui, oras, medis, stiklas, įvairios plastmasės, yra blogi šilumos laidininkai (jie vadinami *šilumos izoliatoriais*). Vadinasi, šilumos laidumas priklauso nuo medžiagos sandaros. Kristalų gardelėse atomai yra glaudžiai susieti tarpusavyje ir vidinė energija čia pasireiškia kaip gardelės mazgų virpėjimas apie pusiausvirąją padėtį: tuo didesnė kristalo temperatūra, tuo didesnė gardelės mazgų virpesių amplitudė, t. y. jų kinetinė energija. Kiekvieno kristalo gardelės sandara yra savita, t. y. būdinga tik šiam kristalui (atomų tarpusavio išsidėstymas, atstumai tarp gardelės mazgų, jų tarpusavio orientacija, gardelės mazgų ryšio energija). Ir aišku, kad bet koks vieno gardelės mazgo virpėjimas pusiausvirošios padėties atžvilgiu priverčia virpėti ir kitus kristalinės gardelės mazgus, t. y. vieno iš atomų virpėjimo kinetinė energija (kaip šiluma) perduodama kitiems kristalinės gardelės mazgams. Metalų šilumos laidumo priežastis yra kita. Kaip žinoma, metaluose yra daug laisvųjų krūvininkų – elektronų ir tuo didesnė kūno temperatūra, tuo didesnė laisvųjų elektronų kinetinė energija. Pastarieji savo kinetinę energiją susidurdami perduoda metalo jonams ir kitiems elektronams.

Įvairių medžiagų šilumos laidumas yra skirtingas. Dujos yra blogi šilumos laidininkai, todėl visos medžiagos, turinčios didesnę oro kiekį (vilna, šiaudai, sniegas), yra vadinamos *termoizoliacinėmis medžiagomis*. Blogai praleidžia šilumą purus sniegas; sniego danga sumažina dirvos šiluminius nuostolius, o tai teigiamai veikia augalus. Dirvos temperatūrai miške didelę įtaką daro miško kraikas, susidaręs iš negyvų augalų organinių liekanų, tarp kurių yra oro. Jis reguliuoja šiluminį dirvos režimą miške. Pati dirva yra blogas šilumos laidininkas, tačiau jos šilumos laidumas priklausomai nuo drėgmės gali skirtis. Dirvos šilumos laidumo savybės didelę įtaką daro garavimui, šaknų susidarymui ir pan.

Šilumos laidumas mikrometeorologijoje svarbus nagrinėjant šilumos pernašą dirvožemyje ir per gyvūnų odą arba kailį. Laisvoje atmosferoje laidumas nėra svarbus, nes jo indėlis daug mažesnis negu konvekcijos.

Nejudantis oras yra geras izoliatorius ir, jei apie objektą galima sukurti nejudantį sluoksnį, tai jo šilumos nuostoliai yra labai maži. Taip yra daugelio žinduolių kailinėje dangoje, kuri padeda išlaikyti storą nejudančio oro sluoksnį. Tą patį naudoja žmogus, konstruodamas šiltus drabužius iš kailių ar kitų medžiagų, galinčių išlaikyti nejudantį orą. Didinant šiluminę varžą, šilumos nuostoliai mažėja. Taigi turintys ilgesnio plauko kailius žvėrys yra labiau atsparūs šalčiams.

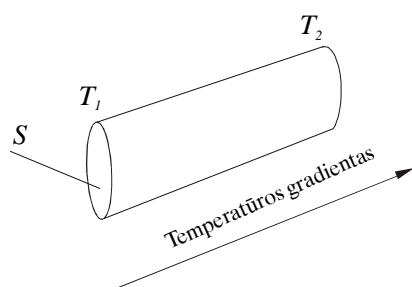
Šilumos laidumo lygtis. Tegu vienalyčio metalinio strypo, kurio skerspjūvio plotas yra S , ilgis yra x (5.5.3 pav.), galų temperatūros yra skirtingos ir atitinkamai lygios T_1 ir T_2 . Tada šilumos, pernešamos per tam tikrą laiko tarpą dt , kiekis išreiškiamas Furjė formule

$$dQ = \lambda \frac{T_1 - T_2}{x} S dt. \quad (5.5.13)$$

Šioje lygtyje proporcingumo koeficientas λ yra *šilumos laidumo koeficientas*, o santykis $(T_1 - T_2)/x$ – parodo ilgio vieneto temperatūros pokytį šilumos perdavimo kryptimi ir vadinamas *temperatūros gradientu*. Šilumos laidumo koeficientas parodo, koks šilumos kiekis pereina per 1 m^2 skerspjūvį per laiko vienetą, kai temperatūros gradientas yra 1 K/m . Žinant tam tikros medžiagos šilumos laidumo koeficientą, galima pasakyti, ar ši medžiaga yra geras, ar blogas šilumos laidininkas. Įvairių medžiagų šilumos laidumo koeficientai labai skirtingi (žr. priedų 11 lentelę). Šilumos laidumo koeficientas priklauso ir nuo medžiagos temperatūros, ir nuo savitosios šiluminės talpos. Esant skirtingoms kūno temperatūroms, šis koeficientas yra skirtingas. Dydis $R_s = x/\lambda S$ vadinamas *šilumine varža*.

Kitas dydis, nusakantis medžiagos gebėjimą kaupti, išlaikyti ir perduoti šilumą, yra *savitoji šiluminė talpa*. Kiekvienos medžiagos ji yra skirtinga (žr. priedų 9 lentelę) ir nusako, koks šilumos kiekis reikalingas masės vieneto kūno temperatūrą pakeisti vienu Kelvino laipsniu.

Šilumos pernešimo intensyvumas apibūdinamas *šilumos srauto tankiu*. Jeigu laidininku, kurio skerspjūvio plotas yra S , per laiką dt pernešamas šilumos kiekis dQ , tai šilumos srauto tankis



5.5.3 pav. Brėžinys
Furjė formulei aiškinti

$$q = \frac{dQ}{S dt}. \quad (5.5.14)$$

Jis parodo, koks šilumos kiekis pernešamas per laidininko skerspjūvio ploto vienetą per laiko vienetą. Šilumos srauto tankis proporcingas temperatūros gradientui ir nukreiptas jos mažėjimo kryptimi. Temperatūros gradientas parodo jos kitimo spartą ir nukreiptas sparčiausio didėjimo kryptimi. Didesnis temperatūros gradientas reiškia didesnį temperatūrų skirtumą, esant tam

pačiam atstumui, taigi ir spartesnę šilumos laidumą. Jeigu ilgio intervale Δx temperatūros pokytis yra $\Delta T = T_1 - T_2$, tai šilumos srauto tankis

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (5.5.15)$$

Paprastai šiluma dažniausiai perduodama visais trimis – spinduliavimo, konvekcijos ir šilumos laidumo – būdais, ir griežtai atskirti vieną nuo kito beveik neįmanoma. Tačiau kai kuriais atvejais vienu iš šių būdų šiluma visai nesklinda arba sklinda tiek mažai, kad jos galima ir nepaisyti. Pavyzdžiui, kietuosiuose kūnuose nėra konvekcijos.

Gyvūnų kailyje paprastai pasireiškia ir laidumas, ir spinduliavimas, ir laisvoji bei priverstinė konvekcijos. Kailių šiluminės varžos matavimai rodo, kad ji yra artima stovinčio oro šiluminei varžai. Didėjant kailio storiui, paprastai sunku išvengti konvekcijos atsiradimo, nes kailio ribose gali būti didelis temperatūrų gradientas. Tai šiek tiek turi įtakos oro judėjimui, ir jis nutolsta nuo nejudančio oro artinio. Storo kailio šiluminė varža yra mažesnė už nejudančio oro maždaug 1,6 karto ir tai susiję su spinduliavimo nuostoliais ir laisvąja konvekcija. Priverstinė konvekcija taip pat svarbi kailių laidumui.

Visi išvardyti šilumos pernašos būdai panaudojami namų šildymo sistemoms. Ventilatorinis šildytuvai paskirsto šiltą orą priverstinės konvekcijos būdu; šiluma iš vandenių šildomų radiatorių pernešama dėl laisvosios konvekcijos; esant išvedžiotiems po grindimis šildytuvams, šiluma perduodama laidumo būdu; kaitinami strypo tipo šildytuvai praranda šilumą tiek dėl laisvosios konvekcijos, tiek dėl spinduliavimo.

Žmogaus organizmo audinių šilumos laidumas. Skystųjų organizmo dalių (tarpląstelinio skysčio, kraujo plazmos ir kt.) šilumos laidumas artimas vandens šilumos laidumui. Tankiųjų audinių, ypač riebalinio audinio ir odos raginio sluoksnio, šilumos laidumas yra daug mažesnis. Pati oda ir poodinis riebalinis audinys atlieka organizmo šilumos izoliacijos funkciją, nes riebalinio sluoksnio šilumos laidumo koeficientas yra tik 12 kartų didesnis už nejudančio oro. Giluminių žmogaus organizmo audinių temperatūra yra aukštesnė negu kūno paviršiaus temperatūra. Be to, audinio izoliacija labai priklauso nuo kraujagyslių tinklo tankumo ir kraujo tekėjimo greičio. Reguluojant kraujo apytaką, galima keisti organizmo šilumos nuostolius, t. y. galima teigti: jei nebūtų skystos ir judrios vidinės terpės, vieni organai perkaistų, o kiti – per daug atvėstų. Judri, labai vandeninga, greitai sušylanti ir greitai atšalanti vidinė terpė kažkuo panaši į tobulą centrinio šildymo sistemą. Apskritai žmogaus kūnas yra blogas šilumos laidininkas. Vidutinis žmogaus kūno šilumos laidumo koeficientas (0,2–0,3 W/(m·K)) yra apie dešimt kartų didesnis už stovinčio oro ir didėja spartėjant kraujo apytakai.

5.5.6. Temperatūros matavimas, termostatai, termoterapija

Biologinės sistemos gali ilgiau ar trumpiau būti aplinkose, kur temperatūros intervalas nedidelis (~ nuo 0 iki 90°C). Medicininei diagnostikai labai svarbus temperatūros matavimas.

Termometrija nagrinėja ir kuria temperatūrų matavimo metodus. Temperatūros matavimui reikia pasirinkti temperatūros skalę, t. y. parinkti tam tikrą termometrines medžiagas ir tam tikro reiškinio

fizines savybes, priklausančias nuo temperatūros. Dažniausiai parenkamos dvi temperatūros, kurias atitinka fazinių virsmų temperatūros, pavyzdžiui, ledo tirpimo (0°C) ir vandens virimo (100°C), esant tam tikroms apibrėžtomis išorinėms sąlygoms. Intervalas tarp šių dviejų temperatūrų dalijamas į 100 dalių, taigi 1°C (temperatūros vienetas) sudaro 0,01 intervalo dalį.

Nepriklausanti nuo termometrinių savybių ir medžiagos II termodinamikos dėsnio pagrindu sukurta skalė vadinama *termodinamine*. Čia pagrindiniu tašku laikoma trigubo vandens H_2O taško temperatūra: 273,16 K. Šios skalės vienetas yra kelvinas (K) – 1/273,16-oji termodinaminės temperatūros (trigubo H_2O taško). Dviejų minėtų skalių ryšys $T = t^{\circ}\text{C} + 273 \text{ K}$.

Kūno temperatūra yra jo įkaitimo matas ir apibūdina energiją, kurią įgyja kūną sudarančios dalelės. Ji matuojama *termometrais* (skysčio, dujiniais), termoporomis (žr. 6.5 skyrių), pirometrais.

Skysčio termometrų veikimas pagrįstas tūrio, keičiantis temperatūrai, kitimu, pirometrų – spinduliuotės intensyvumo matavimu (jie taikomi aukštomis temperatūroms matuoti). Labai žemoms temperatūroms matuoti naudojami paramagnetikai. Buityje naudojami gyvsidabriniai, spiritiniai, skystų kristalų termometrai.

Dauguma vykstančių biologiniuose objektuose procesų priklauso nuo temperatūros, todėl svarbu mokėti gauti tam tikras temperatūras ir reikiamą laiką jas išlaikyti pastovias. Šiam reikalui naudojami *termostatai* – prietaisai, kuriuose palaikoma pastovi temperatūra. Jie gali turėti elektrinį šildytuvą ir termoregulatorių, kurie užtikrina norimą pastovią temperatūrą ir yra plačiai taikomi klinikinėse medicinos įstaigų laboratorijose. Čia dažniausiai palaikoma žmogaus kūno temperatūra ($\sim 37^{\circ}\text{C}$). Termostatai be išorinio šildytuvo vadinami *termosu* (arba *Diuario indu*) ir yra plačiai naudojami buitėje. Tai dvigubų blizgančių sienelių indas, tam tikrą laiką išlaikantis pastovią jo turinio temperatūrą. Sienelės yra perskirtos vakuumo tarpu (vakuumas stabdo energijos perdavimą šilumos laidumo ir konvekcijos būdais, o blizgantis paviršius – spinduliavimo būdu).

Kūnų šilumos laidumas, fazinių virsmų šilumos kiekiai, cheminių reakcijų ir radioaktyvių skilimų metu atsiradusį spinduliavimą lydintys šilumos kiekiai matuojami kalorimetriniais metodais. Šie matavimai atliekami *kalorimetrais*, kurie gali būti dviejų tipų:

- 1) pagal jų nusistovėjusią temperatūrą nustatomas perneštas šilumos kiekis Q ;
- 2) $T = \text{const}$, o šilumos kiekis Q nustatomas pagal medžiagos kiekį, perėjusį į kitą fazinę būseną (pvz., ledas $\rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ garai).

Tokiu būdu galima nustatyti medžiagą ir jos kiekį, o toliau galima rasti, kiek yra medžiagoje molekulių ir pan. Tai yra svarbu molekulinėje biologijoje, medicininiais tyrimams ir kitur.

Medicininėje terapijoje ir chirurgijoje naudojami karštis (*termoterapija*) ir šaltis (*krioterapija*). Dažniausiai naudojami karšti ir šalti kūnai arba medžiagos tam tikroms kūno vietoms sušildyti arba atšaldyti.

Termoterapijos metodai skirstomi į tris grupes:

- 1) šilta medžiaga tiesiogiai kontaktuoja su reikiama kūno vieta;
- 2) šiluma perduodama šiluminio spinduliavimo būdu;
- 3) panaudojama šiluma, atsirandanti audiniuose per juos tekant aukšto dažnio kintamai elektros srovei (pavyzdžiui, prideginimai);
- 4) panaudojama mikrobangų energija.

Taikant pirmąjį metodą turi būti naudojamos tokios medžiagos, kurios ilgą laiką savyje gali išlaikyti šilumą, t. y. turi didelę šiluminę talpą ir mažą šilumos laidumo koeficientą. Dažniausiai procedūroms naudojamas vanduo, purvas, parafinas, smėlis. Šios medžiagos tiesiogiai liečiasi su oda, todėl, kad nesukeltų skausmingų pojūčių, pasirenkama atitinkama jų temperatūra: $H_2O \sim 45^\circ C$, purvo iki $50^\circ C$, parafino $60\text{--}65^\circ C$.

Medicinoje dažnai naudojamos žemos temperatūros:

- 1) atskiriems organams ar audiniams konservuoti (prieš atliekant transplantaciją);
- 2) šaltis turi ir anestezuojančių savybių, todėl žmogaus smegenyse gali suardyti ląstelių branduolius, kurie sukelia nervinius susirgimus (pavyzdžiui, Parkinsono ligą);
- 3) užšaldant ir po to staigiai atšildant suardomi nepageidaujami audiniai ar dariniai;
- 4) mikrochirurgijoje audiniams paimti ir pernešti naudojamas drėgnų audinių „prišaldymas“ prie šalto metalinio instrumento;
- 5) kosmetikoje.

Šaldoma dažniausiai ledu, skystu azotu arba labai lakiais skysčiais (eteriu, chloretilu ir pan.).

LABORATORINIS DARBAS

Kietojo kūno šilumos laidumo koeficiento nustatymas

Darbo užduotis

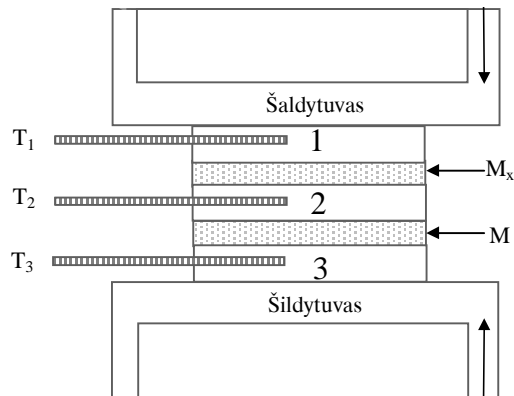
- Nustatykite nurodyto kietojo kūno šilumos laidumo koeficientą.

Darbo priemonės ir prietaisai

Šilumos laidumo koeficientui nustatyti skirtas prietaisas, elektrinė plytelė, stovas ir stiklinės kolbos.

Darbo metodika

Medžiagų šilumos laidumo koeficientai nustatomi įvairiais būdais. Vienas iš jų – palyginimo būdas: nežinomos medžiagos šilumos laidumo koeficientas λ_x nustatomas jį lyginant su žinomos medžiagos šilumos laidumo koeficientu λ . Prietaisas (5.5.4 pav.) šilumos laidumo koeficientui nustatyti sudarytas iš trijų 1 cm storio varinių plokštelių. Tarp pirmosios ir antrosios plokštelių dedama tiriamoji medžiaga (M_x), o tarp antrosios ir trečiosios – žinoma medžiaga (M). Pirmoji plokštelė yra šaldoma leidžiant joje padarytais kanalais šaltą



5.5.4 pav. Prietaiso šilumos laidumo koeficientui nustatyti struktūrinė schema

5.6. Kietųjų kūnų tamprumas

- Kietųjų kūnų tamprumo savybės. Vidinis įtempis.
- Deformacijų rūšys.
- Huko dėsnis.
- Tampros (Jungo) modulis.
- Tamprumo atominė ir molekulinė prigimtis.
- Garso sklidimas tampriojoje terpėje.
- Mechaninės kietųjų medžiagų savybės

5.6.1. Kietųjų kūnų tamprumas

Kietaisiais kūnais vadinamos medžiagos, kurios turi apibrėžtą tūrį bei formą ir priešinasi jėgai, bandančiai juos pakeisti. Kūnų tūrį bei formą sąlygoja veikiančios kūno sudedamąsias daleles (molekules bei atomus) elektromagnetinės prigimties sąveikos jėgos (žr. 5.1 skyrių). Stacionarios būsenos medžiagoje tos jėgos yra pusiausvyroje. Veikiant kūną bet kokia išorine jėga, ši pusiausvyra suyra, pakinta nuotolis tarp kūną sudarančių dalelių. Šiam nuotolio kitimui priešinasi dalelių sąveikos jėgos, todėl kūne atsiranda vidinės tamprumo jėgos, atsveriančios kūną veikiančias išorines jėgas. Taigi kūne atsiranda *vidinis statmenasis įtempis* σ (toliau vadinamas tiesiog įtempiu). Jis skaitine verte yra lygus tamprumo jėgai F (arba išorinei, nes esant pusiausvyrai išorinių ir tamprumo jėgų absoliučiosios vertės yra lygios), veikiančiai deformuojamo kūno skerspjūvio ploto S vieneta:

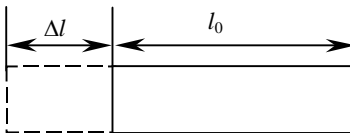
$$\sigma = \frac{F_{\text{tampr}}}{S}. \quad (5.6.1)$$

Esant pastoviai išorinei jėgai, nusistovi nauja veikiančių jėgų pusiausvyra, todėl kūno tūris bei forma pasikeičia.

5.6.2. Kietųjų kūnų deformacija

Kiekvienas kietasis kūnas, veikiamas išorinių jėgų (mechaninių, elektrinių ar magnetinių), keičia savo formą, t. y. *deformuojasi* (lot. *deformatio* – pakitimas, pakeitimas). Kūnui deformuojantis, pakinta nuotoliai tarp jį sudarančių dalelių. *Santykinė ilginė deformacija* apibrėžiama kaip kūno ilgio pokytis, tenkantis pradinio ilgio vienetai (5.6.1 pav.):

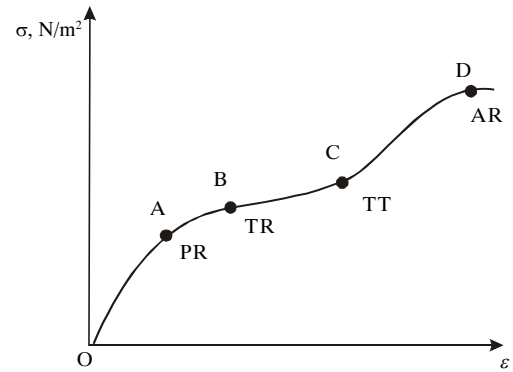
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad (5.6.2)$$



5.6.1 pav. Kietojo kūno ilginė deformacija

čia ε – santykinė ilginė deformacija, Δl – ilgio pokytis, l_0 – pradinis ilgis. Medžiagos gebėjimas atgauti pradinę formą, kai nustoja veikti deformacijos jėgos, vadinamas *tamprumu*, o grįžtamoji deformacija – *tampriąja*, arba *elastiškąja*, *deformacija*, priešingu atveju – *netampriąja*, arba *plastine*.

Medžiagų įtempio priklausomybė nuo santykinės deformacijos pavaizduota 5.6.2 paveiksle. Kreivės atkarpoje OA medžiagų deformacija yra tiesiogiai proporcinga įtempimui. Ši sritis vadinama *proporcingumo sritimi*, o riba – *proporcingumo*, arba *tiesiškumo*, riba (PR, taškas). Esant mažoms deformacijoms, pašalinus deformuojančią jėgą, kūnų vidinis įtempis tuojau pat arba po kurio laiko atstato pirminę kūno formą. Deformacijos sritis OB vadinama *tamprumo sritimi*, o jos riba – *tamprumo riba* (TR, taškas). Šiuo atveju deformuotas kūnas tik po kurio laiko įgyja pradinę savo formą. Proporcingumo (PR) ir tamprumo (TR) ribos nesutampa, bet yra arti viena kitos.

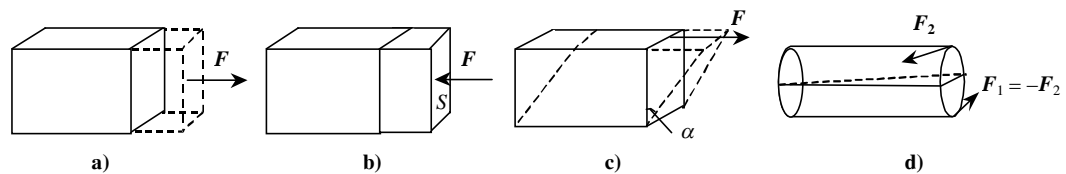


5.6.2 pav. Tempimo diagrama

Už tamprumo ribos kūnas nustoja būti tamprus (pašalinus išorinę jėgą, jis neatgauna pradinės formos bei dydžio). Jis įgyja naują formą bei dydį ir esant šioms naujiems matmenims jis jau vėl tamprus. Jo įtempis yra pastovus, nustojus veikti išorinėms jėgoms, atsistato nauja kūno forma. Šią sritį vaizduoja kreivės dalis BC. Esantis už tamprumo ribos taškas C vadinamas *takumo tašku* (TT). Toliau veikiant deformacijos jėgai sukeliama esminiai medžiagos pokyčiai: nutrūksta molekulių ryšiai ir medžiagos sluoksniai teka vienas virš kito. Toks kitimas vadinama *plastine deformacija* (medžiaga tampa plastiška). Šią sritį vaizduoja kreivės dalis CD. Dar didėjant išorinei jėgai, deformacija didėja ir galiausiai medžiaga suyra (taškas D vadinamas *ardymo riba* AR).

Plastiškieji kūnai yra mažai tamprūs, jų tamprumo riba yra daug kartų mažesnė už takumo ribą. Traپیųjų medžiagų (stiklo, kvarco ir kt.) takumo taškas yra mažesnis už tamprumo ribą, todėl šios medžiagos lieka elastingos iki jų suardymo. Kai kurių elastingųjų medžiagų deformacijos kitimas didinant įtempį skiriasi nuo jo kitimo mažinant įtempį. Taigi, esant vienodiems įtempimams, tam tikros deformacijos yra nevienodos.

Kūnų deformacijos būna įvairios. Pagrindinėmis laikomos – *tempimo* (5.6.3 pav., a) bei *gniuždymo* (5.6.3 pav., b), *lenkimo* (5.6.4 pav., a, b, c), *šlyties* (5.6.3 pav., c) ir *sukimo* (5.6.3 pav., d) deformacijos.



5.6.3 pav. Deformacijų rūšys: tempimo (a), gniuždymo (b), šlyties (c) ir sukimo (d)

5.6.3. Huko dėsnis. Tampros, arba Jungo, modulis

Kūno vidinio įtempio ir santykinės deformacijos ryšį 1660 metais bandymais nustatė anglų fizikas R. Hukas (*R. Hooke*). Ši priklausomybė teigia, kad deformacijos jėgos veikiamo kūno santykinė ilginė deformacija yra tiesiog proporcinga įtempiui:

$$\sigma = \varepsilon E; \quad (5.6.3)$$

čia E – proporcingumo koeficientas, vadinamas medžiagos *tampros, arba Jungo, moduli*. Įrašius ε ir σ reikšmes, gaunama

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S},$$

arba

$$E = \frac{F}{S} \frac{l_0}{\Delta l}. \quad (5.6.4)$$

Ši formulė parodo tampros modulio fizikinę prasmę. Jei $\frac{\Delta l}{l_0} = 1$ (medžiaga pailgėja dvigubai), tai

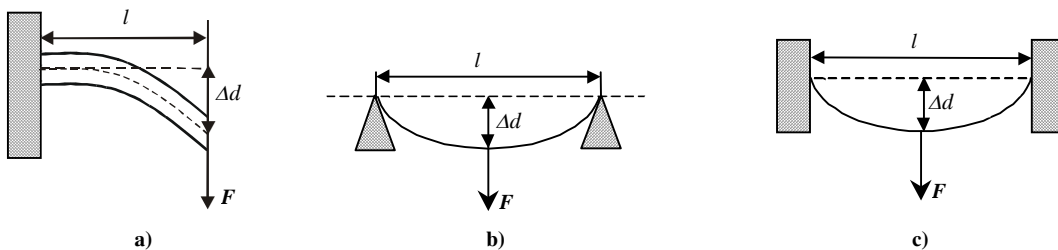
$$E = F/S = \sigma, \quad (5.6.5)$$

t. y. skaitine verte tampros modulis lygus tokiam vidiniam įtempiui, atsirandančiam kūne, kai jo ilgis padidėja du kartus. Didelės tampros medžiagos realiai tiek nepailgėja, todėl tampros modulis apibrėžtas tik formaliai. Be to, Huko dėsnis galioja tik mažoms deformacijoms.

Įvairių medžiagų tampros moduliai yra skirtingi (žr. priedų 8 lentelę). Jų didumas priklauso nuo medžiagos tamprumo savybių. Izotropinių kūnų tampros modulis visomis kryptimis yra vienodas. Anizotropinių kūnų, ypač kristalų, tampros modulio vertė priklauso nuo tempimo arba slėgimo krypties.

5.6.4. Lenkimo deformacija

Kūno deformaciją galima sukelti jį lenkiant. Keturkampio strypo vieną galą įtvirtinus, o antrąjį lenkiant tam tikra jėga F (5.6.4 pav., a), strypas išsilenkia. Išorinė išlenkta strypo dalis tempiama, o



5.6.4 pav. Lenkimo deformacija: veikiant vieną galą (a), abu galus laisvai padėjus ant atramų (b) ir įtvirtinus (c)

įlenkta vidun – slegiama (gniuždoma). Dvi strypo dalis skiria deformacijos nepaliekta *neutralusis sluoksnis*. Išlenkto strypo vidinės tamprumo jėgos stengiasi grąžinti strypą į pradinę padėtį, t. y. jos priešinasi deformuojančios jėgos poveikiui. Labiausiai priešinasi deformuotų sluoksnių vidinės tamprumo jėgos. Neutralusis sluoksnis yra visai nedeformuotas, todėl jis visai nesipriešina deformuojančių jėgų poveikiui, t. y. neturi įtakos medžiagos atsparumui. Dėl šios priežasties technikoje įvairios konstrukcijos, kurias veikia lenkimo deformacijos, dažnai daromos tuščiavidurės, vamzdžių pavidalo. Taip sutaupoma daug metalo, detalės esti lengvesnės, nors atsparumas lenkimui pasikeičia nežymiai.

Strypo įlinkis Δd (jo laisvojo galo arba vidutinio taško poslinkis) yra tiesiog proporcingas lenkimo deformacijos jėgai F , strypo ilgiui l , atvirkščiai proporcingas jo pločiui b ir storiui a :

$$\Delta d = k \frac{Fl^3}{Eba^3}; \quad (5.6.6)$$

čia k – skaitinis koeficientas, kurio vertė priklauso nuo strypo įtvirtinimo būdo. Šiuo atveju $k = 4$. Kai abu strypų galai laisvai padėti ant atramų ir pats strypas lenkiamas per vidurį, $k = 1/4$ (5.6.4 pav., b), o kai abu strypo galai įtvirtinti, $k = 1/16$ (5.6.4 pav., c). Išmatavus strypo įlinkį, galima rasti tos medžiagos tampros modulį.

Įdomu tai, kad ir gamtoje daugelio augalų stiebai, paukščių sparnų bei gyvūnų kaulai, kuriems tenka atlaikyti lenkimo deformacijas, taip pat tuščiaviduriai. Jei jie nebūtų tuščiaviduriai, atsparumas lenkimui būtų mažesnis, nes pilnavidurį stiebą ar kaulą, be išorinės jėgos, veikėtų dar ir jo paties sunkis, kuris visada didesnis už tuščiavidurio stiebo sunkį.

5.6.5. Šlytis. Šlyties modulis

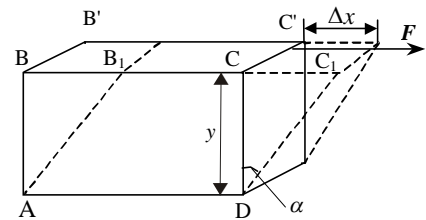
Gretasienio ABCD paviršius, kurio pagrindas AD įtvirtintas (5.6.5 pav.), veikiamas jėgos F deformuojasi ir įgauna pavidalą AB₁C₁D. Jėgos veikiami kūno sluoksniai pasislenka nevienodai: daugiausiai pasislenka viršutinis sluoksnis (atstumu Δx), o apatinis pasilieka vietoje. Toks poslinkis vadinamas *šlyties deformacija*. Tada deformuoto kūno vidinis įtempis lygus tamprumo jėgos ir kūno viršutinio paviršiaus (BB'₁CC') ploto S santykiui ir vadinamas *šlyties įtempiu* τ :

$$\tau = F/S. \quad (5.6.7)$$

Pasinaudojus Huko dėsniumi, galima užrašyti

$$\tau = G \frac{\Delta x}{y}; \quad (5.6.8)$$

čia G – *šlyties modulis*, priklausantis nuo medžiagos atsparumo šlyties deformacijai, $y = CD$.



5.6.5 pav. Šlyties deformacija

Huko dėsnis galioja tik mažoms deformacijoms, todėl šlyties deformacijos atveju jis galioja tik tada, kai kampas α , kuriuo viršutinis sluoksnius pasilenka pagrindo atžvilgiu, yra nedidelis:

$$\Delta x/y = \operatorname{tg} \alpha \cong \alpha.$$

Ištačius τ ir $\Delta x/x$ reikšmes į Huko dėsnio išraišką,

$$\tau = G\alpha. \quad (5.6.9)$$

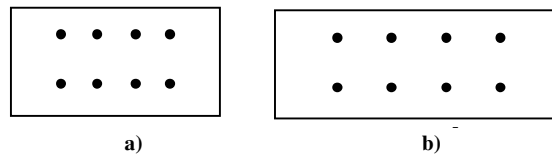
Jeigu $\alpha = 1$ rad, $G = \tau$. Taigi šlyties modulis savo skaitine verte lygus vidiniam šlyties įtempiui, kai šlyties kampas lygus 1 rad. Kaip ir tampros modulis ((5.6.5) formulė), šlyties modulis apibrėžtas formaliai, nes tokiems dideliems šlyties kampams negalioja Huko dėsnis.

5.6.6. Tamprumo atominė ir molekulinė prigimtis

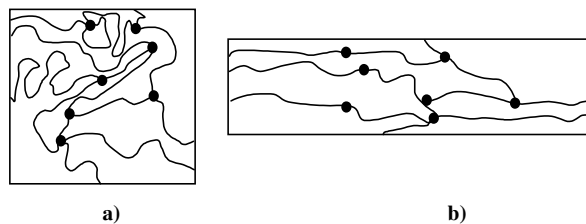
Lyginant plieno ir gumos deformacijas, matyti didelis jų skirtumas. Pirmiausia jų Jungo moduliai skiriasi beveik 100 000 kartų (žr. priedų 8 lentelę), o santykinė deformacija ε iki atsparumo ribos plieno yra tik kelių procentų eilės, tuo tarpu gumos gali siekti $\sim 200\text{--}300\%$. Šis skirtumas yra dėl molekulinės tamprumo prigimties. Metalas – polikristalinė medžiaga, kurios nedidelėse dalyse (kristaluose) yra griežta tvarka. Esant tam tikrai temperatūrai, atstumas tarp atomų (jonų) yra toks, kad traukos jėgos būtų kompensuotos stūmos jėgų (5.6.6 pav., a). Deformavus kūną, pakinta atstumai tarp atomų (5.6.6 pav., b) ir tai sukelia elastinių atstatomųjų jėgų atsiradimą.

Guma sudaryta iš nereguliariai išsidėsčiusių ilgų molekulių, kurios per jų ilgį yra kryžmiškai sujungtos įvairiuose taškuose. Neištemptoje būsenoje molekulės yra netvarkingai sulankstytos (5.6.7 pav., a) ir dėl Brauno (šiluminio) judėjimo nuolat kinta. Ištempiant gumą, molekulės išsirikiuoja tvarkingiau (5.6.7 pav., b) ir tik kryžminės jungtys išlaiko molekules nuo išslydimo viena iš po kitos. Kai jėgos nebeveikia, chaotiškas molekulių judėjimas stengiasi išardyti tvarką ir sutrumpinti gumą. Gumos elastingumas yra būdingas ir daugumai biologinių audinių, kurie sudaryti iš kryžmiškai sujungtų ilgų polimerų molekulių, pavyzdžiui, kraujagyslių sienelės ir kiti organai sudaryti iš elastino, abdikino ir kt.

Kryžminių jungčių skaičius gumos tipo medžiagoje veikia deformacijos



5.6.6 pav. Atstumai tarp atomų nedeformuotame (a) ir deformuotame (b) metale



5.6.7 pav. Ilgųjų molekulių išsidėstymas nedeformuotuose (a) ir deformuotuose (b) polimeruose

didumą ir tampros modulį. Kai atstumas tarp kryžminių jungčių mažas, tokia polimero molekulė pailgėja mažiau negu esant dideliui atstumui tarp jungčių. Tarp šlyties modulio G ir vidutinės molio masės M_l tarp kryžminių jungčių yra sąryšis

$$G = \rho RT / M_l;$$

čia ρ – medžiagos tankis, R – universalioji dujų konstanta, T – temperatūra (K).

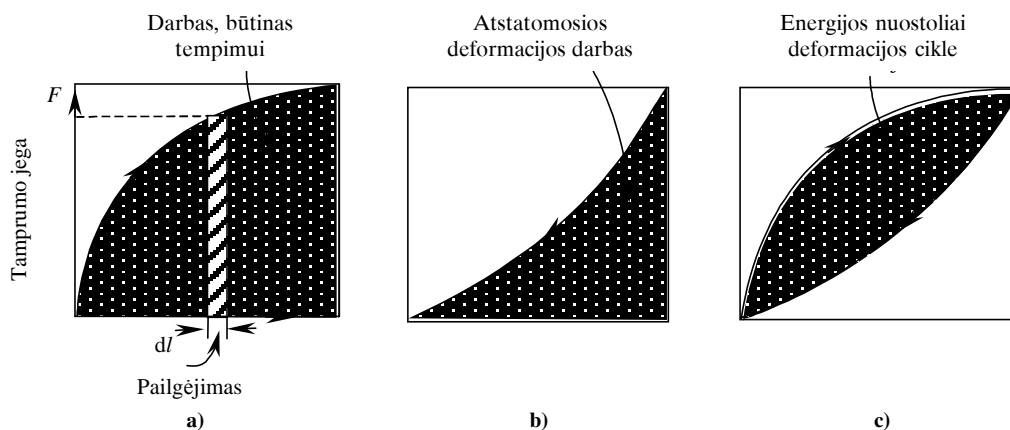
5.6.7. Energija, sukaupta tamprose medžiagose

Medžiagai ištempti būtina atlikti darbą. Kai jėga, dėl kurios poveikio medžiaga buvo ištempta, sumažinama arba panaikinama, medžiaga stengiasi sugrįžti į pirminę būseną. Aišku, tai vyksta, jei panaudota ne per didelė jėga, kad medžiaga trūktų. Deformacijai atlikti būtinas darbas randamas dauginant tamprumo atstatomąją jėgą (kuri deformacijos metu kinta) iš atstumo, kuriuo deformuojamas kūnas pasislenka. Paprastai tai gali būti išreikšta jėgos priklausomybės nuo išsiplėtimo diagrama (5.6.8 pav.). Darbas dA dėl deformuojamo kūno pailgėjimo dl lygus Fdl . Visas atliktas darbas yra

$$A = \int_{l_1}^{l_2} Fdl.$$

Biologiniams objektams Huko dėsnis negalioja, todėl darbas didinant įtempimą ir jį mažinant yra skirtingas. Ciklinės deformacijos kreivės sudaro kilpas. Šis reiškinys vadinamas *elastingąja histereze* (gr. *hysteresis* – trūkumas, stoka, atsilikimas). Mažinant įtempimą, darbas atliekamas mažesnis. Energijos nuostoliai išsitempimo-susitraukimo ciklo metu virsta medžiagoje šiluma.

Deformuota medžiaga turi potencinės energijos, kuri lygi darbui, reikalingam šiai deformacijai atlikti, iš jos atėmus darbą, būtiną pasipriešinimo jėgoms nugalėti. Tačiau ne visa energija gali



5.6.8 pav. Tamprumo jėgos priklausomybės nuo išsiplėtimo diagrama: tempimas (a), atstatymas (b), elastingoji histerezė (c)

būti atiduota, kai medžiaga susitraukia. Atiduotos energijos susitraukiant ir darbo, panaudoto deformacijai, santykis

$$\eta = \frac{A_{\text{at}}}{A_{\text{pan}}}$$

priklauso nuo ciklo trukmės ir geriausiai atveju yra 97 % baltymui resilinui, 91 % abducinui. Susitraukiant sukuriamas darbas (atiduodama energija) gali būti panaudotas naudingai. Deformuoto resilino energija naudojama vabzdžių skrydžiui ir leidžia taip toli nušokti blusai. Skėrys šuoliams irgi panaudoja deformuoto raumens elastinę energiją.

5.6.8. Garso sklidimas tampriojoje terpėje

Medžiaga, kurios dalelės riša tamprumo jėgos, vadinama *tampriąja*. Jei tampriosios terpės vienoje vietoje yra sukeliama dalelių virpesiai, tai dėl dalelių sąveikos šie virpesiai sklinda terpe tam tikru greičiu v . Virpesių sklidimas terpėje vadinamas *bangą*. Sklindant bangai, kiekviena atskira dalelė, kurią pasiekė banga, pradeda virpėti aplink savo pusiausvyros padėtį. Atsižvelgiant į dalelės virpesių kryptį bangos sklidimo atžvilgiu, bangos skirstomos į išilgines ir skersines (5.6.9 pav.).

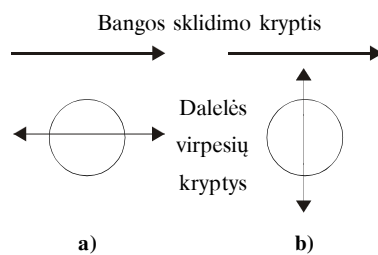
Išilginės (5.6.9 pav., a) – tai tokios bangos, kai dalelės virpa išilgai bangos sklidimo krypties, pavyzdžiui, garso banga dujose ir skysčiuose (daugiau žr. 4.3 skyrių). Visos jos yra mechaninės prigimties, t. y. jose virpa dalelės.

Skersinės bangos (5.6.9 pav., b) yra tokios, kai dalelės virpa statmenai bangos sklidimo kryptiai, pavyzdžiui, bangos vandens paviršiuje. Mechaninės skersinės bangos gali skliti tik medžiagose, kuriose galima šlyties deformacija. Skysčiuose ir dujose sklinda tik išilginės bangos. Kietuosiuose kūnuose galimos tempimo bei gniuždymo ir šlyties deformacijos, todėl juose gali skliti abiejų rūšių bangos.

Kiekvieną bangą galima charakterizuoti periodu, arba dažniu, bangos ilgiu, bangos sklidimo greičiu.

Periodas T – tai vieno virpesio trukmė. *Dažnis* ν – virpesių skaičius per laiko vienetą. *Bangos paviršius* – tai paviršius, jungiantis tos pačios fazės sklindančios bangos taškus. *Bangos frontas* – tai bangos paviršius, skiriantis erdvę, kurioje virpesiai vyksta, nuo erdvės, kurioje jie dar neprasisidėjo. Bangos frontas visada statmenas bangos sklidimo kryptiai ir gali būti įvairios formos. *Bangos ilgis* λ – mažiausias atstumas tarp dviejų vienoda faze virpančių bangos taškų. Bangos ilgiu galima vadinti ir nuotolį, kuriuo nusklinda banga per vieną virpesių periodą. Ryšys tarp bangos ilgio, svyravimo periodo T ir jos sklidimo greičio v išreiškiamas lygybe

$$\lambda = \nu T. \quad (5.6.10)$$



5.6.9 pav. Dalelių virpesiai išilginėje (a) ir skersinėje (b) bangoje

Virpesių dažnis $\nu = 1/T$, todėl

$$v = \lambda \nu. \quad (5.6.11)$$

Sklindant įvairiose terpėse vienodo periodo bangoms, jų ilgis ir sklidimo greitis yra skirtingi. Bangų sklidimo greitis v priklauso tik nuo terpės savybių: tankio ir medžiagos tamprumo. Išilginių bangų sklidimo greičio v kvadratas yra atvirkščiai proporcingas terpės tampros moduliui ir jos tankiui:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (5.6.12)$$

čia E – medžiagos tampros modulis, ρ – jos tankis.

Skersinių bangų sklidimo greitis priklauso nuo šlyties modulio G :

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Kietųjų kūnų tampros modulis yra didesnis už šlyties modulį, todėl išilginės bangos juose sklinda greičiau nei skersinės. Plačiau apie garso sklidimą įvairiose terpėse galima rasti 4.4 skyriuje.

5.6.9. Pulso bangos sklidimas kraujagyslėse

Medžiagų tamprumo savybės sąlygoja pulso bangos atsiradimą kraujagyslėse ir jos sklidimo dėsningumus. Arterijų sienelių deformacijos metu išsiskirianti energija panaudojama kraujo tekėjimui. Kraujo tūris, kurį širdis išstumia į aortą sistolės metu, sukelia pulso bangą, išplintančią arterinėje sistemoje nuo aortos iki arteriolių. Sistolinis kraujo tūris ištempia elastingas aortos sienes, kadangi iš širdies į arterinę sistemą sistolės metu išstumiamo kraujo tūris yra didesnis už tūrį, kuris tuo pat metu nuteka į audinius. Aortos ištempimo metu kinetinė energija virsta deformacijos potencine energija ir apie 50 % į aortą išstumto kraujo susikaupia ištemptuose elastingų arterijų segmentuose. Širdies diastolės metu, sumažėjus spaudimui skilvelyje, ištemptos elastingos aortos sienelės sugrįžta į pradinę padėtį, pastumdamos kraują į periferiją, t. y. potencinė energija virsta kinetine. Kraujui sugrįžti atgal į širdį neleidžia užsidarę pusmėnuliniai vožtuvai. Šis efektas, kurį nulemia aortos ir stambių arterijų elastingos savybės, sąlygoja netolygios sistolinės kraujo tėkmės aortoje vartimą tolygiu tekėjimu periferinėse arterijose. Tai iliustruoja ir eksperimentinis modelis, kuriame, tuo pačiu metu ritmiškai spaudžiant skystį į stiklinį vamzdį ir tokio pat skersmens guminę žarną, pastebima, kad tampria gumine žarna skystis teka daug tolygiau negu standžiu stikliniu vamzdžiu.

Kraujagyslių elastingoms savybėms įvertinti medicinoje naudojamas standumo rodiklis E' , kuris priklauso nuo slėgio ir tūrio kraujagyslėje pokyčių:

$$E' = \frac{\Delta p}{\Delta V};$$

čia ΔV – kraujagyslės tūrio pokytis, Δp – slėgio kraujagyslėje pokytis. Dydis, atvirkščias kraujagyslės standumui, vadinamas jos *tįsumu*. Pavyzdžiui, arterijų standumas E' daug kartų viršija šį rodiklį

venose, kuriose kraujo tūrio padidėjimas sukelia labai nežymius slėgio pokyčius. Venos išsiskiria dideliu tūsumu ir gali sutalpinti didelį kraujo tūrį, todėl pagal atliekamą funkciją jos vadinamos talpuminėmis kraujagyslėmis.

Pulso bangos plitimas panašus į bangos plitimą gumine žarna. Jos greitis priklauso nuo kraujagyslės sienelės tamprumo E' : kuo tamprumas didesnis, tuo greičiau plinta banga (5.6.12 formulė). Pavyzdžiui, jaunų žmonių aortoje pulso bangos greitis lygus 5–6 m/s, o raumeninio tipo arterijose – 8–12 m/s, nes periferinių kraujagyslių standumas didesnis. Vyresnio amžiaus žmonių kraujagyslių standumas didėja ir tai sąlygoja pulso bangos greičio padidėjimą. Padidėjus arteriniam kraujo spaudimui, pulso bangos greitis papildomai padidėja, kadangi mažėja kraujagyslių tūsumas. Pulso bangos greitis yra daug didesnis už kraujo srovės tekėjimo greitį, kuris stambiose arterijose vidutiniškai būna lygus 20–50 cm/s.

5.6.10. Kietųjų medžiagų savybės

Beveik visi mus supantys daiktai kiekvieną dieną nuolat ar trumpai yra veikiami tam tikrų apkrovų. Pavyzdžiui, kėdė ant kurios mes sėdime, pastato pamatas, knygų lentyna ir kt.

Šiuolaikinėje technikoje pagrindinės konstrukcinės medžiagos yra metalai, jų lydiniai ir plastikas. Daugiau kaip 99 % gaminamų metalų naudojami technikoje tik todėl, kad turi tam tikrą fizinių savybių derinį ir puikias atsparumo apkrovoms savybes. Likusieji 1 % naudojami įvairiose technikos srityse dėl kitų jų fizinių savybių (elektrinių, magnetinių ir kt.). Veikiamos apkrovos, medžiagos deformuojasi, t. y. keičia savo matmenis ir formą. Technikoje dažniausiai iš anksto yra žinoma apkrova, kuri veiks iš tam tikros medžiagos pagamintą detalę, ir įtempis, kuris tai detalei gali būti pavojingas. Todėl konstruktorius uždavinys – parinkti tokius detalės matmenis ir formą, kad įtempis neviršytų leidžiamų ribų. Kuo didesnis medžiagos įtempis, prie kurio pasireiškia plastiškumas (5.6.2 pav., taškas C), tuo patikimesnė medžiaga ją eksploatuojant, tuo mažesnė nelauktų medžiagos trūkių tikimybė, kurie gali baigtis katastrofa.

Mechaninės medžiagų savybės gali keistis labai plačiose ribose. Netgi to paties lydinio atsparumas ir plastiškumas gali labai smarkiai skirtis priklausomai nuo lydinio apdirbimo, jo temperatūros ir kt. Įvairių konstrukcinių medžiagų – metalinių ir nemetalinių – visuma apima labai platų mechaninių charakteristikų diapazoną.

5.6.11. Judėjimo organų sistema

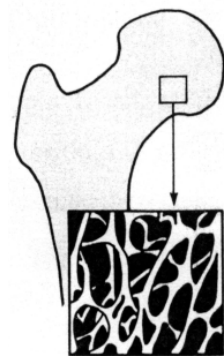
Viena iš būdingų gyvajam organizmui savybių yra judėjimas. Judėjimo organais galima persikelti iš vienos erdvės vietos į kitą, pakeisti atskirų kūno dalių padėtį, maitintis, kvėpuoti ir pan. Judėjimo organų sistemą sudaro pasyvieji ir aktyvieji judėjimo organai. Prie pasyviųjų judėjimo organų priskiriami kaulai, kremzlės, raiščiai, o prie aktyviųjų – raumenys ir jų pagalbinės dalys.

Kaulai (lot. *ossa* – kaulas) yra kieti ir standūs organai, sudarantys organizmo griaučius. Jie palaiko pastovią kūno formą ir proporcijas, gaubia pažeidžiamus organus (pavyzdžiui, smegenis, plaučius, širdį, akis, ausis). Evoliucijos procese gamta sumažino žmogaus ir gyvulių kaulų masę,

išsaugodama griaučių tvirtumą. Akivaizdus pavyzdys – paukščiai, kurie daugiau nei kiti gyviai suinteresuoti sumažinti savo svorį. Į tai 1679 metais pirmasis atkreipė dėmesį italų fizikas Dž. Borelis (*D. Borell*), pažymėdamas, kad „paukščio kūnas neproporcingai lengvesnis nei žmogaus ar kito kurio keturkojo...“ Pavyzdžiui, paukščio fregato, kurio sparnų ilgis yra 2 m, griaučiai sveria tik 110 g.

5.6.12. Mechaninės kaulinio audinio savybės

Kaulai sudaryti iš kaulinės medžiagos: paviršiuje tankios, kompaktiškos, viduje – akytos, susidedančios iš kaulinių sijelių (5.6.10 pav.). Kaulinė medžiaga susideda iš kaulinio audinio, kraujagyslių ir nervų. Kaulinis audinys yra viena iš audinio rūšių. Jis išsiskiria tvirtumu bei kietumu ir sudarytas iš dviejų skirtingų sandų: kolageno ir mineralinių medžiagų. *Kolagenas* – tai pagrindinė organinio jungiamojo audinio sudedamoji dalis. Kaulo mineralinių medžiagų pagrindinis sandas yra kalcio druskos. Kaulo sudėtyje yra ~ 99 % organizme esančio kalcio ir ~ 75 % fosfatų. Tokia sudėtis suteikia kaului geras mechanines savybes: jungiamasis audinys garantuoja *tamprumą*, mineralinės medžiagos – *kietumą*, o abu kartu – *tvirtumą*. Pašalinus vieną iš dviejų dalių, kaulo formos praktiškai nepasikeičia. Ilgai laikant kaulą 5 % acto rūgšties tirpale, visi neorganiniai komponentai (tarp jų ir kalcio druskos) ištirpsta. Tada kaulas, kuriame praktiškai likęs tik kolagenas, tampa elastingas kaip guma ir jį galima susukti į žiedą. Kaulą sudeginus, visas kolagenas sudega, o lieka tik neorganiniai komponentai.

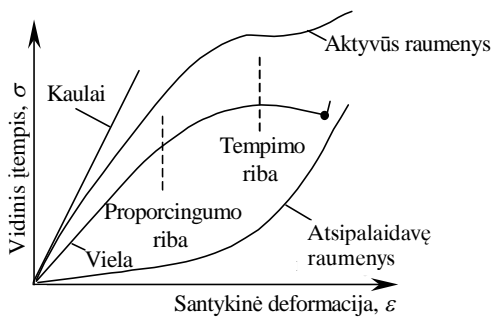


5.6.10 pav. Kaulo sandara [pagal 52]

Kaulinis audinys yra vienas iš labai diferencijuotų jungiamųjų audinių, išsiskiriančių atsistatymo potencialu: ir osteocitai, ir tarpląstelinė medžiaga gali visiškai atsistatyti. Pakartotinas kaulinio audinio atsistatymas artimai atkartoja kaulo vystymosi ir augimo procesus. Ši kaulinio audinio savybė svarbi klinicinei praktikai (traumatologijai, ortopedijai, stomatologijai), ypač esant dideliems defektams (nuo 10 cm), kai subrendęs kaulinis audinys nepajėgia užpildyti kaulo defekto. Norint patobulinti kaulinio audinio regeneraciją, per pastaruosius 20 metų tyrinėjamos implantacinės medžiagos, kurios, sudarydamos kaulo defekto ertmėje karkasą, padeda ir skatina kaulinių ląstelių mitotinę dauginimąsi ir paplitimą visame defekte. Taip užtikrinamas kaulo struktūros ir funkcijos atsistatymas.

Kaulų sandara evoliucijos eigoje prisitaikė prie įvairių krūvių, tenkančių tam tikram kaului. Pavyzdžiui, ilgieji, arba vamzdiniai, kaulai be išimties yra galūnėse. Jie lengviau pasiduoda lenkimui (bet nelūžta), nes yra vamzdžio formos. Tai leidžia ekonomiškai taikyti kaulo audinį, kadangi lenkiant audinio sluoksniai, esantys prie išilginės kūno ašies, beveik nedalyvauja pasipriešinimo apkrovai procese.

Ypač didelė ir įvairi žmogaus kaulų ir raiščių mechaninė apkrova susidaro ne tik dėl kūno svorio, bet taip pat ir dėl raumenų jėgos, atsirandančios pradėjus kokią nors fizinę veiklą. Čia gali būti įvairių rūšių jėgų, veikiančių atramos aparatą, sąveikos. Dažniausiai tai spaudimo (stuburo

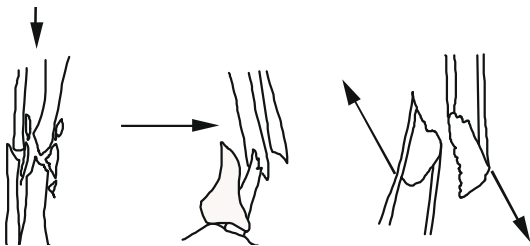


5.6.11 pav. Vielos ir kai kurių audinių vidinio įtempio priklausomybė nuo deformacijos

baltymų, pagal savo prigimtį priskiriamų prie polimerų. Raumenys yra aktyvios vestibulinio aparato dalys – veikiant nerviniams impulsams jie keičia savo ilgį ir išvysto tam tikrą jėgą. Susitraukiantis raumenų elementas yra mioskaidulos (miofibrilos). Mioskaidulos sudarytos iš didelio skaičiaus protofibrilų, ištemptų molekulių (siūlų) aktino ir miozino baltymų, išsidėsčiusių besikeičiančiomis sritimis ir sujungtų tarpusavyje taip, kad vieno siūlų galai įeina į tarpus kitų siūlų, panašiai kaip gali būti sunerti rankų pirštai.

5.6.13. Kaulų lūžis. Kaulų tvirtumas

Kaulo lūžis – tai kaulo vientisumo pažeidimas. Dažniausiai kaulai lūžta darbingo amžiaus (20–50 m.) žmonėms; vyrams lūžta dažniau nei moterims. Kaulas gali įškilti arba įlūžti ir visiškai nulūžti (5.6.12 pav.). Vaiko kaulai lūžta kaip žalia vytelė: žievinis kaulo sluoksniu lūžta, o antkaulis išlieka sveikas. Kaulas gali lūžti skersai, išilgai (labai retai), įstrižai, spirališkai, skeveldriškai (suyra į įvairaus dydžio skeveldras). Lūžus kaului vienoje vietoje, būna 2 lūžgaliai, lūžus keliose – daugiau lūžgalių. Dažnai lūžimas būna dėl traumos, kai kaulą veikia staigi išorinė jėga, didesnė už jo atsparumą. Kaulas gali lūžti ir sergant kai kuriomis ligomis (pavyzdžiui, kaulų ir sąnarių tuberkuliozėmis, osteomelitu), dėl kaulo naviko, senatvėje (dėl kalcio stokos seno žmogaus kaulai pasidaro trapūs).



5.6.12 pav. Kaulų lūžiai [pagal 52]

kamienui, apatinėms galūnėms), tempimo (viršutinėms galūnėms, raiščiams, raumenims) ir lenkimo (stuburui, dubens kaulams, galūnių kaulams ir kt.) jėgos. Jei apkrova viršija leistiną tam tikrų elementų tamprumo ribą, tai tie elementai suyra. Tai gali būti kaulų lūžimai ir sausgyslių patempimai. Taip pat galimi kaulų išnirimai, raumenų trūkiai, odos paviršiaus pažeidimai ir kt. Tam tikrų audinių deformacijos priklausomybė nuo įtempio pateikta 5.6.11 paveiksle.

Minkštieji audiniai (raumenys), jungiamieji audiniai (raiščiai ir kiti) daugiausia sudaryti iš

Šios knygos priedų 7, 8 lentelėse pateikti kritinio įtempio duomenys, kuriems esant medžiagos suyra, Jungo moduliai ir kiti duomenys, iš kurių matyti, kad kaulas savo tvirtumu nusileidžia tik plienui, bet yra daug tvirtesnis nei granitas ar betonas.

Žmogaus peties vidurinės dalies kaulo skerspjūvio plotas yra apie 3,3 cm². Pasinaudojus lentelių duomenimis, galima apskai-

čiuoti maksimalų krūvio svorį, kokį gali išlaikyti šis gniuždomas kaulas, būdamas vertikaloje padėtyje. Šis svoris lygus 600 kN. Taip pat galima apskaičiuoti ir maksimalią jėgą, kurią gali išlaikyti tie patys kaulai, jei ši jėga pridėta prie jo laisvojo galo: išilgai statmenosios ašies ji lygi 5500 N, žinant, kad kaulo išorinis skersmuo yra 28 mm, vidinis – 17 mm ir ilgis lygus 200 mm.

LABORATORINIS DARBAS

Tampros modulio nustatymas dinaminiu Šliūpo būdu

Darbo užduotys

- Nustatykite tiriamosios vielos tampros modulį.
- Raskite garso sklaidimo greitį medžiagoje, iš kurios pagaminta viela.

Darbo prietaisai ir priemonės

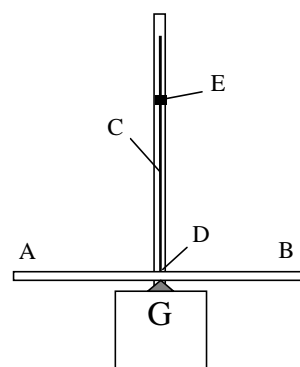
Prietaisas, sudarytas iš stovo (G), keturkampio strypo (AB) ir tiriamosios vielelės, liniuotė, mikrometras, sekundmatis.

Darbo metodika

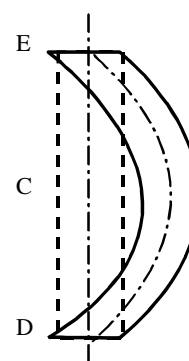
Fiziko K. Šliūpo palikimas nors ir nedidelis, bet vertingas, skirtas jo pamėgtiems laboratoriniams eksperimentams, taip pat kai kurioms technikos problemoms. K. Šliūpas Lietuvos universiteto Fizikos katedroje pradėjo dirbti docentu 1922 metais. Čia jis skaitė termodinamikos, taip pat kelis kitus fizikos kursus, vadovavo fizikos laboratoriniams darbams. Be to, 1926–1931 metais vadovavo Fizikos katedrai, 1929 metais išrinktas jos ekstraordinariu profesoriumi.

K. Šliūpas tvarkė mechanikos laboratorinius darbus, papildė juos naujais eksperimentais, konstravo aparatūrą, ruošė aprašus, ieškojo būdų darbams tobulinti, naujų laboratorinių darbų metodikų. Jis 1927 metais paskelbė naują dinaminį būdą Jungo moduliui nustatyti. Šis būdas remiasi sistemos virpesių periodo matavimu ir iki šiol naudojamas.

Šliūpo prietaiso schema pavaizduota 5.6.13 paveiksle. Keturkampis strypas (AB) svyruoja ant stovo (G) atramų. Tiriamoji viela (C) yra perverta per viršuje (taške E) pritvirtintą siaurą paslankų įtvirtinimą. Išjudintas strypas (AB) pradeda svyruoti, o viela išsilenkia – deformuojasi (5.6.14 pav.). Viena jos pusė yra gniuždoma, kita – tempiama. Atsiradusios tamprumo jėgos sukelia joms proporcingą kreipimo momentą D , kuris verčia strypą svyruoti. Virpesių periodas



5.6.13 pav. Šliūpo prietaiso schema



5.6.14 pav. Vielos išlinkimas

LABORATORINIS DARBAS

Medžiagų tamprumo savybių tyrimas**Darbo užduotis**

- Iš lenkimo deformacijos nustatykite tampros modulį:
 - įvairių metalų ir medžio plokštelių;
 - įvairių kaulų bandinių.

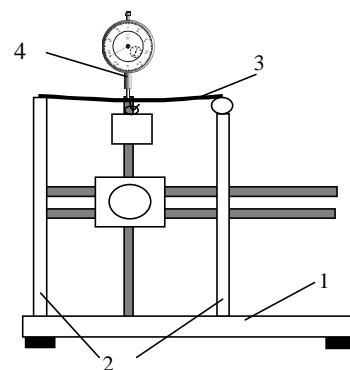
Darbo priemonės ir prietaisai

Prietaisas tampros moduliui nustatyti, liniuotė, slankmatis, mikrometras, tiriamieji pavyzdžiai.

Darbo metodika

Šiame darbe tampros modulis nustatomas iš lenkimo deformacijos. Prietaisą tampros moduliui nustatyti (5.6.16 pav.) sudaro pagrindas (1) su dviem vertikaliomis atramomis (2), ant kurių dedamas tiriamasis pavyzdys (3) – metalinė plokštelė arba kaulo audinio pavyzdys. Ant nejudamos atramos yra pritvirtinta atraminė prizmė, o ant judamosios – besisukantis guolis, kuris sumažina trintį. Tarp atramų yra strypas, prie kurio pritvirtintas rodyklinis mikrometras (4).

Prie kiekvieno tiriamojo pavyzdžio yra pritvirtintas kabliukas svoriams prikabinti.



5.6.15 pav. Prietaiso tampros moduliui nustatyti struktūrinė schema

Darbo eiga

1. Liniuote išmatuojamas tiriamojo pavyzdžio ilgis l , o slankmačiu ir mikrometru – jo plotis b ir storis a . Pavyzdžio ilgis suprantamas kaip jo atstumas tarp atramų. Kiekvieno dydžio matavimai atliekami bent tris kartus įvairiose pavyzdžio vietose ir apskaičiuojamos jų vidutinės vertės.
2. Pavyzdys padedamas ant atramų, prie jo vidurio priartinamas rodyklinis mikrometras ir pasistengiama nustatyti jo rodyklę ties nuline padala.
3. Po to prie pavyzdžio centre esančio kabliuko kabinami įvairios masės m kroviniai ir kiekvienu atveju užfiksuojami mikrometro rodmenys; nustatomas įlinkis Δd .
4. Randama kiekvieno krovinio deformacijos jėga $F = mg$ (čia – g laisvojo kritimo pagreitis) ir apskaičiuojamas santykis $F/\Delta d$. Randama šio santykio vidutinė vertė.
5. Apskaičiuojamas tiriamojo pavyzdžio tampros modulis E (iš 5.6.6 formulės išreiškiamas E ir vietoje koeficiento įrašoma $1/4$, kadangi abu pavyzdžio galai laisvai padėti ant atramų):

$$E = \frac{Fl^3}{4\Delta d b a^3}.$$

6. Visi matavimai ir skaičiavimai kartojami imant kitus pavyzdžius.
7. Matavimų ir skaičiavimų rezultatai surašomi į 1 ir 2 lenteles.

1 lentelė

Pavyzdžio Nr. ir pavadinimas	a_i , m	a_{vid} , m	b_i , m	b_{vid} , m	l_i , m	l_{vid} , m

2 lentelė

Pavyzdžio Nr. ir pavadinimas	m , kg	F , N	Δd , m	$F/\Delta d$, N/m	$(F/\Delta d)_{vid}$, N/m	E , Pa

8. Kiekvienam pavyzdžiui nubraižomas priklausomybės $\Delta d = \Delta d(F)$ grafikas.

5.7. Masės pernaša

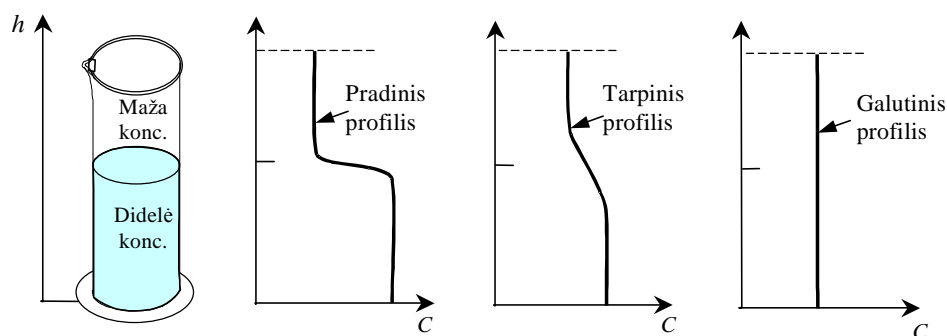
- Pernašos reiškiniai. Difuzija.
- Fiko dėsnis. Difuzijos lygtis.
- Difuzijos koeficientas ir jo ryšys su dinamine klampa.
- Difuzijos pasireiškimo pavyzdžiai. Difuzija aplinkos fizikoje. Masės pernaša per poras. Dujų ir vandens pernaša gyvūnų kailyje ir per žmogaus odą.
- Osmosas. Dializė. Hemodializė.

5.7.1. Pernašos reiškiniai

Daugelis fizikinių procesų, vykstančių atmosferoje, gyvosiose ir negyvosiose sistemose, susiję su *masės, judesio kiekio ir energijos pernaša*. Šių dydžių pernaša vyksta pagal panašius dėsnius, todėl gana dažnai šie dėsniai fizikos kurse nagrinėjami greta. Tačiau šiame vadovėlyje, grupuojant medžiagą pagal temas, judesio kiekio pernaša buvo nagrinėta aptariant skysčių ir dujų klampumą (5.1 skyrius), o energijos pernaša – nagrinėjant šilumos laidumą (5.5 skyrius). Šiame paragrafe nagrinėjama masės pernaša dėl difuzijos reiškinio. Visi čia minimi pernašos reiškiniai yra panašūs tuo, kad vyksta dėl medžiagos molekulių ar dalelių judėjimo ir pasireiškia sistemose, turinčiose tam tikro dydžio gradientą.

5.7.2. Difuzija

Difuzija – savaiminis vienos medžiagos molekulių išsiskverbimas į kitą medžiagą neveikiant išorinėms jėgoms. Gana paprasta šį reiškinį stebėti ant spalvoto tam tikros medžiagos tirpalo (pavyzdžiui, vario sulfato ar jodo) atsargiai užpylus gryno vandens taip, kad susidarytų ryški skiriamoji tirpalų



5.7.1 pav. Koncentracijos profilio kitimas tirpale

riba. Po tam tikro laiko galima pastebėti, kaip vanduo pradeda nusidažyti žemiau esančio tirpalo spalva, net jei indas su tirpalais nėra judinamas ir kratomas. Kartu skiriamoji riba tarp skirtingų tirpalų pradeda nykti. Šitoks savaiminis maišymasis, nulemtas atsitiktinio molekulių judėjimo, yra vadinamas difuzija. Šiuo atveju net ir sunkesnės molekulės pakyla virš skirtingų tirpalų ribos ir išiskverbia į lengvesnę medžiagą, nors tam priešinasi gravitacijos jėgos. Kadangi difuzija vyksta dėl medžiagos molekulių ar dalelių judėjimo, todėl ji daugiausia reiškiasi dujose ir skysčiuose, kur galimas molekulių ir dalelių judėjimas, tačiau iš dalies gali reikštis ir kietųjų kūnų paviršiuje.

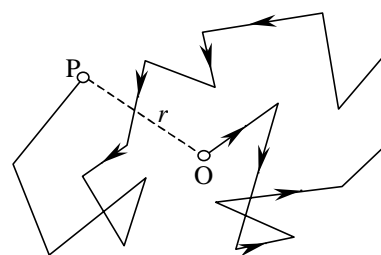
Difuzija nusako ne tik skirtingų molekulių maišymąsi dujose, garuose ir skysčiuose, bet ir vienos rūšies molekulių koncentracijos susilyginimą dujose, garuose ir tirpaluose, kurių pradinis koncentracijos pasiskirstymas nevienalytis. Šis reiškinys pavaizduotas 5.7.1 paveiksle. Kaip matyti iš koncentracijos profilio kitimo, visiškam koncentracijos išsilyginimui reikalingas tam tikras laikas. Pats difuzijos reiškinys yra pagrįstas tuo, kad kiekviena tirpalo ar dujų dalelė, esant tirpalo temperatūrai T (K), turi vidutinę kinetinę energiją (vidutinę šiluminę energiją):

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_0}{2} \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT; \quad (5.7.1)$$

čia k – Bolcmano konstanta. Iš (5.7.1) išplaukia, kad m_0 masės dalelė juda vidutiniu greičiu

$$\overline{v} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{3kT/m_0} = \sqrt{3RT/M}; \quad (5.7.2)$$

čia $M = N_0 m_0$ dalelių molio masė. Jei $M = 50$ g/mol, o $T = 290$ K, tai $\overline{v} = 390$ m/s. Taigi molekulių judėjimas tiek ore, tiek skystyje yra labai greitas, tačiau tai nereiškia, jog molekulės nukelia didelį atstumą. Dėl smūgių su arti esančiomis kitomis molekulėmis tirpalo dalelės juda chaotiškai. Chaotiško judėjimo trasa pavaizduota 5.7.2 paveiksle. Neveikiant jokiai kryptingai jėgai šis chaotiškas judėjimas neturi išskirtinės krypties. Pavienės dalelės šis judėjimo trasa po tam tikro laiko gali sutapti su pradine padėtimi, tačiau statistinis didelio dalelių ansamblio tyrimas rodo, kad po laiko tarpo t



5.7.2 pav. Chaotiškas dalelės judėjimas tirpale

nuo stebėjimo pradžios dalelės padėtis P skiriasi nuo pradinės padėties O atstumu r , kuris proporcingas kvadratinei šakniai iš laiko t :

$$r = \frac{4}{\pi} \sqrt{Dt}; \quad (5.7.3)$$

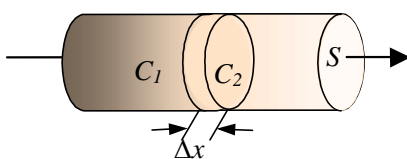
čia D yra *difuzijos koeficientas*, kurio matavimo vienetas yra m^2s^{-1} . Šis koeficientas priklauso nuo tirpiklio ir temperatūros. Jis nusako konkrečios dalelės difuziją tam tikrame tirpale. Mažų simetriškų molekulių difuzijos koeficientas nepriklauso nuo molekulių koncentracijos, tačiau ilgaagrantių molekulių jis gali priklausyti ir nuo difunduojančios medžiagos koncentracijos.

5.7.3. Fiko dėsnis. Difuzijos lygtis

Labai didelio kitos medžiagos dalelių skaičiaus pasiskirstymas tirpale makroskopiškai yra apibūdinamas *tirpalo koncentracija*, t. y. dalelių skaičiumi vienetiniame tūryje. Jei šis skaičius yra labai didelis, tai koncentracijos išsilyginimas tirpale, kurio koncentracijos gradientas pradinis, yra gerai aprašomas *Fiko dėsniumi*, nusakantiu pernešamos medžiagos masės kiekį. Imant paprasčiausią atvejį, kai koncentracija kinta tik viena kryptimi (5.7.3 pav.), Fiko dėsnis teigia: koncentracijos gradiento kryptimi pernešamos masės Δm kiekis yra proporcingas koncentracijos gradientui $\Delta C/\Delta x$, paviršiaus skerspjūvio plotui S ir trukmei Δt :

$$\Delta m = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} S \Delta t. \quad (5.7.4)$$

Tirpalo molekulės difunduoja iš didesnės koncentracijos srities į mažesnės koncentracijos sritį. Kadangi molekulių judėjimas yra chaotiškas, todėl nėra išskirtinės judėjimo krypties. Gali kilti klausimas, koku būdu molekulės iš didesnės koncentracijos srities difunduoja į mažesnės koncentracijos sritį. Tai galima paaiškinti nagrinėjant molekulių judėjimą tarp dviejų gretimų vienodo tūrio skysčio dalių, kuriose konkrečios rūšies molekulių koncentracija skiriasi. Nepaisant judėjimo chaotiškumo galima pasakyti, kad tam tikra molekulių dalis iš vienos skysčio dalies pereis į gretimą per jų skiriamąją ribą. Kadangi iš kiekvienos srities į kitą pereis ta pati molekulių dalis, tai iš srities, kurioje jų koncentracija didesnė, į gretimą pereis daugiau molekulių negu priešinga kryptimi. Todėl skirtumas tarp išlėkusių ir įlėkusių molekulių skaičiaus yra teigiamas ir tai reiškia, kad molekulių difuzija vyksta iš didesnės koncentracijos srities į mažesnės koncentracijos sritį. Laikant difuzijos koeficientą teigiamu, o koncentracijos gradientą neigiamu, t. y. koncentracija mažėja didėjant



5.7.3 pav. Difuzija skystuose koncentracijos mažėjimo kryptimi

koordinatėi x , ir norint gauti teigiamą pernešamos masės kiekį koncentracijos mažėjimo kryptimi, dešinėje (5.7.4) formulės pusėje tenka rašyti minuso ženklą. Iš pirmojo Fiko dėsnio gaunamas antrasis, nusakantis koncentracijos kitimą laiko atžvilgiu bet kuriame taške. Jis dar vadinama *difuzijos lygtimi* ir užrašomas:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (5.7.5)$$

Tai diferencialinė lygtis su antromis išvestinėmis, nusakanti, kad koncentracijos kitimo greitis yra proporcingas antrai koncentracijos išvestinei pagal koordinatę. Jei koncentracija kinta staigiai nuo vieno taško prie kito, tada ji greitai keičiasi laiko atžvilgiu. Jei koncentracija mažėja tiesiškai kintant atstumui, tai ji kiekviename taške yra pastovi, nes pastovus ir įlekiančių bei išlekiančių molekulių skaičius. Tai atitinka pastovią medžiagos masės pernašą medžiagos koncentracijos mažėjimo kryptimi. Jei antroji išvestinė yra nulis, tai koncentracija nekinta. Čia pateiksime tik šios lygties analitinį sprendinį paprasčiausiam vienos krypties difuzijos atvejui, kai pradinio laiko momentu $t = 0$ visa medžiaga yra sukonztruota plokštumoje, kurios koordinatė $x = 0$. Šis sprendinys nusako medžiagos koncentraciją C taške x laiko momentu t ir yra lygus:

$$C = \frac{m}{2(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

Šio sprendinio grafikai pateikiami 5.7.4 paveiksle.

5.7.4. Difuzijos koeficientas ir jo ryšys su dinamine klampa

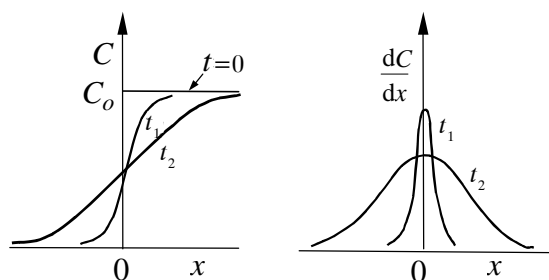
Dujų kinetinė teorija įrodo, kad difuzijos koeficientas yra proporcingas molekulių vidutiniam laisvajam keliui \bar{l} ir vidutiniam molekulių šiluminio judėjimo greičiui \bar{v} :

$$D = \bar{l}\bar{v}/3. \quad (5.7.6)$$

Taigi difuzija spartėja didėjant temperatūrai, nes didėja molekulių greitis \bar{v} . Be to, skysčiuose difuzija vyksta daug lėčiau, nes juose yra mažesnis negu dujose molekulių vidutinis laisvasis kelias. Sferinėms molekulėms, difunduojančioms skysčiuose, galioja toks ryšys tarp difuzijos koeficiento ir skysčio dinaminės klamos η :

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}; \quad (5.7.7)$$

čia r – molekulės spindulys. Taigi mažesnės molekulės mažiau klampiuose skysčiuose difunduoja greičiau. Difuzijos koeficientai kai kurioms molekulėms vandenyje pateikiami 5.7.1 lentelėje, o dalelių pernašą ore charakterizuojantys dydžiai – 5.7.2 lentelėje.



5.7.4 pav. Koncentracijos ir koncentracijos gradiento kitimas priklausomai nuo koordinatės (x) ir laiko (t) difunduojančioje sistemoje su aiškia riba tarp tirpalo ir tirpiklio pradinio laiko momentu $t = 0$

5.7.1 lentelė. Difuzijos koeficientai molekulėms, difunduojančioms 20 °C temperatūros vandenyje

Difunduojanti molekulė	Forma	Molinė masė, kg	D, m ² s ⁻¹ × 10 ¹¹
Glicinas (Glycine)	Maža sfera	0,075	95
Citochromas C (Cytochrome C)	Sfera	13	10,1
Kolagenas (Collagen)	Ilga grandinė	345	0,69
Tabako mozaikinis virusas (Tobacco mosaic virus)	Strypas	50 000	0,3

5.7.2 lentelė. Pernašą ore charakterizuojantys dydžiai (1 g/cm³ tankio dalelėms, esant 23 °C temperatūrai)

Dalelės spindulys, μm	D, m ² s ⁻¹ × 10 ¹¹	Vidutinis poslinkis per 1 s horizontalia kryptimi, μm	Atstumas, kurį dalelė nukrinta per 1 s veikiamo gravitacijos jėgos, μm
10 ⁻³	128 000	1280	0,0131
10 ⁻²	1350	131	0,137
0,10	22,1	16,8	2,24
1	1,3	4,02	128

Difuzijos koeficientai, sudarius skirtingos koncentracijos skysčio sluoksnius, yra matuojami iš koncentracijos kitimo skirtinguose skysčio taškuose arba tiesioginiais koncentracijos matavimo metodais, arba iš lūžio rodiklio proporcingo koncentracijai kitimo. Pastaruoju metu difuzijos koeficientai matuojami iš tokių tirpalų perėjusio lazerio pluošto sklaidos fliktuacijų, sukeltų atsitiktinai judančių molekulių.

Kadangi difuzijos koeficientas priklauso nuo tokių molekulės parametrų kaip molekulės spindulys ir forma, tai išmatavus difuzijos koeficientus skysčiuose galima gauti naudingos informacijos apie šiuos svarbius difunduojančių realiose sistemose molekulių parametrus.

5.7.5. Difuzijos pasireiškimo pavyzdžiai

Tiek dujų, tiek skysčių difuzija yra labai svarbi procesams, vykstantiems biologijoje, medicinoje, aplinkos fizikoje, geologijoje, meteorologijoje ir kitur. Augalų šaknys difuzijos būdu pasisavina dirvos vandenyje ištirpusias maistingąsias medžiagas. Augalui reikalingas medžiagas šaknys greitai perduoda organizmui, todėl jų koncentracija arti šaknų yra mažesnė. Taigi vyksta nuolatinė šių medžiagų molekulių difuzija per dirvos vandenį iš aplinkinių sričių link šaknų. Panašiu būdu žmogaus ir gyvulių virškinimo sistemoje pasisavinamos iš maisto organizmui naudingos medžiagos: skrandis ir žarnynas paverčia maistą skysta mase ir organizmui reikalingos medžiagos patenka į kraujagysles, esančias virškinamojo trakto sienelėse.

Pūvant organinėms medžiagoms dirvoje išsiskiria anglies dioksidas. Jis difunduoja į atmosferos orą, kuriame jo koncentracija mažesnė, ir ten veikiamas molekulinės arba turbulentinės (sąlygotos atmosferos oro judėjimo) difuzijos pasklinda dideliuose plotuose ir pasisavinamas augalų vykstant fotosintezės procesui.

Difuzija yra galima ir biologinėse ląstelėse, kur įvairių rūšių molekulių randama daugiau ar mažiau skystoje citoplazmoje. Svarbu žinoti, kaip greitai molekulės gali difunduoti į citoplazmą, kur vyksta molekulių jungimasis, veikiantis ląstelės išgyvenimą ir dauginimąsi. Naudojant ant odos tepamus gelius, į organizmą difuzijos būdu patenka antikūnai ir antigenai, kurie vėliau susitikę sudaro nuosėdas. Nuosėdų padėtis suteikia informacijos apie antikūnus ir antigenus, bet kiekybiniam vertinimams būtina žinoti difuzijos greitį.

5.7.6. Difuzija aplinkos fizikoje

Iki šiol nagrinėjome difuziją idealiomis sąlygomis, kai jokie papildomi veiksniai netrikdo nagrinėjamos sistemos. Realiose gamtinėse sistemose nagrinėjant masės pernašą, skiriama jau nagrinėta *molekulinė difuzija* ir *turbulentinė difuzija*, t. y. difuzija, vykstanti kartu su konvekcija. Kaip jau buvo minėta (5.5 skyriuje), dėl priverstinės konvekcijos medžiaga pernešama vėjo ar srovės tekėjimo kryptimi pastoviu greičiu v . Kai tiek difuzija, tiek konvekcija yra svarbios medžiagos pernašai, bendras koncentracijos pokytis yra suma abiejų reiškinų ir aprašoma apibendrinta difuzijos lygtimi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (5.7.8)$$

Abi difuzijos rūšys yra atsakingos už medžiagos masės pasikeitimą tarp organizmų ir juos supančio oro:

- molekulinė difuzija veikia organizmų viduje (gyvūnų plaučiuose arba lapų ertmėse) ir plonoje oro plėvelėje, sudarančioje pasienio sluoksnį, kuris apgaubia visą organizmą;
- turbulentinė difuzija vyrauja laisvojoje atmosferoje, nors molekulinė difuzija tebeveikia ir yra atsakinga už galutinį turbulentinės energijos vartimą šiluma.

Turbulentinė vandens garų ir CO₂ pernaša yra labai svarbi visoms aukštesnėms gyvybės formoms. Turbulentiškumo matas gali būti CO₂ kiekis, sugeriamas sveikų žalių pasėlių per vieną dieną fotosintezės metu. Jis yra ekvivalentus visam CO₂ kiekiui, esančiam atmosferos oro sluoksnyje tarp pakloto ir 30 m aukščio. Nors CO₂ koncentracija, kaip fotosintezės rezultatas, sumažėja nuo aušros iki saulėlydžio, iš tikrųjų šis sumažėjimas retai viršija 15 % vidutinės koncentracijos žemės paviršiuje. Šie skaičiai rodo, kad turbulentiškumas leidžia augmenijai paimti fotosintezei naudojamą CO₂ bent iš žemiausio 200 m atmosferos oro stulpo, o galbūt iš dar didesnio aukščio. Mažas dieninis CO₂ pokytis pastebėtas net 500 m aukštyje.

Turbulentinės difuzijos atveju masės pernaša objekto aptekamo oro srautu yra analogiška šilumos pernašai konvekcijos būdu ir yra patogiausiai susieta su nedimensiniu parametru (panašiai kaip Niuselto kriterijus šilumos perdavimo teorijoje; žr. 5.5 skyrių), vadinamu *Šervudo* (Sherwood) *kriterijumi* Sh . Dujų masės srautas F per vienetinį paviršiaus plotą išreiškiamas tokia lygtimi:

$$F = ShD(C_p - C_a) / d; \quad (5.7.9)$$

čia C_p ir C_a – vidutinė dujų koncentracija paviršiuje ir atmosferos ore, o d – pasienio sluoksnio storis. Taip kaip Niuselto kriterijus priverstinei konvekcijai yra Reinoldso Re ir Pradtlio kriterijų

sandauga, taip ir Šervudo kriterijus yra Re ir santykio g/D , kuris vadinamas Šmidto kriterijumi Sc , funkcija. Masės pernašai plokščios plokštelės paviršiuje

$$Sh = 0,66 Re^{0,5} Sc^{0,33}.$$

Tai, kad tiek šilumos, tiek masės pernašą aprašantys kriterijai turi savyje Re kriterijų, rodo abiejų procesų panašumą, o skirtingi Pr ir Sc kriterijai įskaityto efektyvų pasienio sluoksnio storį masės ir šilumos pernašai, esant priverstinei konvekcijai.

Laisvos konvekcijos sąlygomis oro cirkuliaciją apie karštą ar šaltą objektą lemia oro tankio skirtumai, atsirandantys dėl temperatūros gradiento, vandens garų koncentracijos gradiento arba abiejų efektų kombinacijos. Laisvai konvekcijai

$$Sh = BGr^n Sc^m;$$

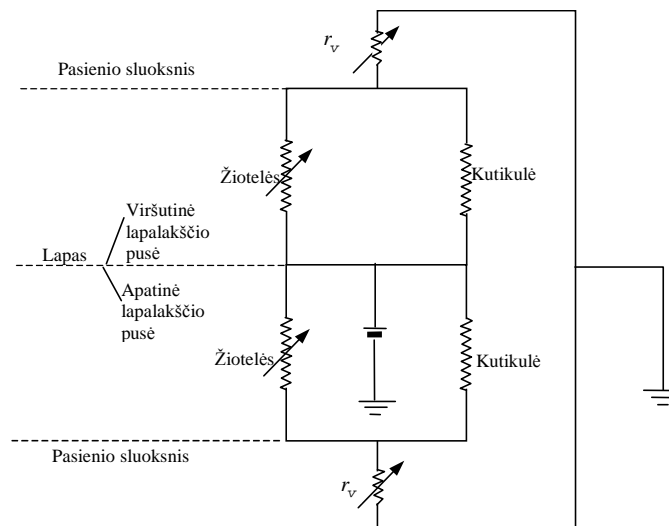
čia Gr – jau minėtas Grashofo kriterijus. $m = 1/4$ laminariajam srautui ir $1/3$ turbulentiniam. Siekiant įvertinti Gr vertę patogiau naudoti ne paviršiaus ir oro temperatūrų skirtumą, bet virtualių temperatūrų skirtumą, kuris įskaityto ir oro tankio mažėjimą dėl ore esančių vandens garų.

Eksperimentai, atlikti tiriant vandens garų pernašą, kai vėjo greitis didesnis nei 1 m/s, gerai atitinka (5.7.9) lygtį. Panašūs rezultatai gauti ir garams, kurių difuzijos koeficientai kitokie.

5.7.7. Masės pernaša per poras

Augalų lapų vandens išgarinimas vyksta pakopomis. Iš pradžių vanduo per ląstelės sienelės difunduoja į požiutelinę kamerą, po to – per žiotelių poras ir galiausiai – per lapo pasienio sluoksnį į atvirą atmosferą. Vykstant fotosintezei CO_2 molekulės juda tuo pačiu keliu, bet priešinga kryptimi. Masės pernaša per poras – labai sudėtingas reiškinys. Jį galima supaprastinti laikant, kad porų varža dujų pernašai priklauso nuo jų geometrijos, dydžio ir išsidėstymo, o štai pasienio sluoksnio varžos dydis priklauso nuo lapo matmenų ir vėjo greičio. Lapų porų ilgis paprastai yra 10–30 μm , o plotas, kurį užima pilna pora su apsauginėmis ląstelėmis, yra nuo 25×17 μm iki 72×42 μm . Poros užima apie 1 % lapo paviršiaus, kai poros plotis yra 6 μm . Porų forma gali būti gana įvairi.

5.7.5 pav. pateikiama ekvivalentinė elektrinė grandinė, kurioje vandens garų difuzijai per lapo žioteles ir lapo viršutinį bei apatinį epidermius apskaičiuoti



5.7.5 pav. Ekvivalentinė elektrinė grandinė vandens garų difuzijai per lapo žioteles ir lapo viršutinį bei apatinį epidermius apskaičiuoti

įskaitanti vandens garų nuostolius iš lapo per žioteles ir odą. Odos varža vandens išgarinimui yra nuo 20 iki 60 s cm⁻¹, o žiotelės varža – nuo 1 ir 2 s cm⁻¹. Pasienio sluoksnio varža yra apie ~1 s cm⁻¹, kai vėjas silpnas. Taigi pagrindinis garavimas iš lapo vyksta per poras.

Paukščių kiaušiniuose poros atlieka panašią funkciją kaip lapų žiotelės. Jomis vyksta deguonies, reikalingo besivystančiam embrionui, difuzija į vidų ir CO₂ bei vandens garų difuzija į išorę. Tos pačios geometrijos ir tankio, bet skirtingo dydžio kiaušinių paviršiaus plotas A yra proporcingas $m^{0,66}$ (m – kiaušinio masė), todėl poriškumas g , apibūdinantis vandens nuostolius per kiaušinio paviršiaus plotą, tik silpnai priklauso nuo $m^{0,12}$. Kiaušinio lukštų varža vandens garavimui taip pat kaip lapų yra 500–1000 s cm⁻¹.

5.7.8. Varžos analogija difuzijos skaičiavimuose

Elektrinė analogija leidžia vaizdžiai stebėti, kaip vyksta difuzija iš lapo tarpląstelinių ertmių per žiotelių poras į išorinį pasienio sluoksnį. Tai gali būti nagrinėjama kaip dvimatis analogas (5.7.6 pav.) dujų difuzijos per apvalią d skersmens skylę plokštėleje, kurios storis yra daug mažesnis už d . Pagal trimatę dujų difuzijos teoriją, kiekvieno apvalios skylės šono varža yra $r = \pi d / 8 D$; čia D – dujų difuzijos koeficientas. Kad tiksliai nustatytume varžą, būtina žinoti poros skersmenį ir plotą skirtingais atstumais nuo poros galo. Daugumos lapų bendrai varžai r_l vandens išgarinimui apskaičiuoti gerai tinka ši formulė:

$$r_l = (l + \pi d / 8) / D;$$

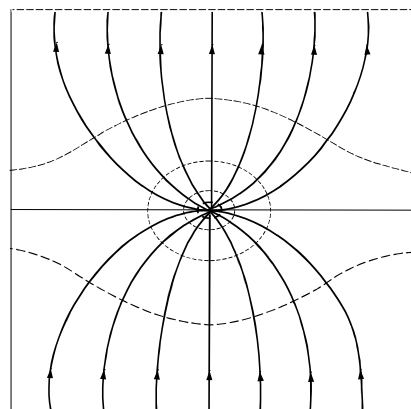
čia l – poros ilgis, d – skersmuo. Paprastai atstumas tarp porų yra maždaug eilė didesnis už porų skersmenį, todėl čia yra tik mažas atskirų porų ekvipotencialinių paviršių persidengimas (5.7.7 pav.). Porų rinkinio varža r_s gali būti randama iš atskirų porų varžos r_l . Ji išreiškiama taip:

$$r_s = \frac{4(l + \pi d / 8)}{\pi n d^2 D};$$

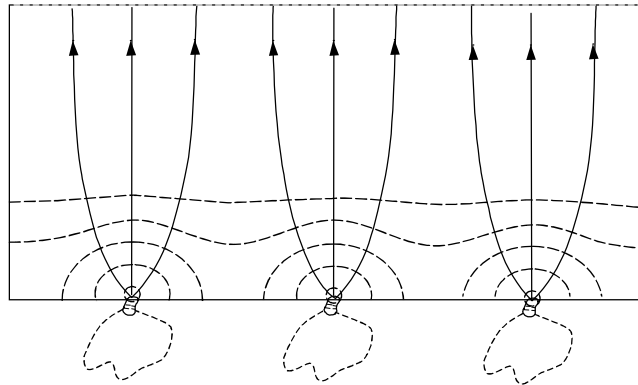
čia n – porų skaičius vienetiniame lapų plote. r_s mažėja, kai poros plėtėja. Dujų ar vandens garų masės pernaša žinant varžą r , gali būti apskaičiuojama pagal formulę

$$F = (C_p - C_a) / r_s.$$

Kai lapo abu paviršiai vienodi, bendra varža vandens ir CO₂ difuzijai yra $r_s/2$.



5.7.6 pav. Difuzijos tarp dviejų plokštumų, tarp kurių yra pavienė kiaurymė, dvimatis elektrinis analogas



5.7.7 pav. Lapo epidermio su trimis poromis elektrinis analogas

5.7.9. Dujų ir vandens pernaša gyvūnų kailyje ir per žmogaus odą

Matavimai, atlikti su iš skaidulų padarytu kailiu ir tikru avies kailiu, parodė, kad kailio varža vandens garų pernašai yra artima nejudančio oro varžai, tačiau natūraliame kailyje jo varža mažėja, nes prisideda vandens pernaša dėl kapiliarumo. Kitais matavimais gauta, kad vandens garų koncentracija mažėja tiesiškai didinant atstumą nuo gyvūno odos. Šis kitimas buvo apie $0,6 \text{ g/m}^3$ per 1 cm kailio $5 \text{ }^\circ\text{C}$ oro temperatūroje ir apie 1 g/m^3 per 1 cm kailio $28 \text{ }^\circ\text{C}$ oro temperatūroje. Laisvoji konvekcija taip pat didina vandens garų pernašą kailyje ir drabužiuose. Esant vėjui, t. y. priverstinei konvekcijai, vandens garų pernaša dar padidėja.

Tiek žmogaus, tiek paukščių odos varža vandens garų difuzijai yra $100\text{--}200 \text{ s cm}^{-1}$ eilės ir daug didesnė už drabužių ir plunksnų varžą. Tačiau nuogų kūdikių odos varža gali būti daug mažesnė, net $\sim 30 \text{ s cm}^{-1}$, ir šiuo atveju garavimui eikvojama šiluma viršija kūdikio metabolinės šilumos gamybą, jei cirkuliuojantis oras inkubatoriuje nėra pakankamai drėgnas.

5.7.10. Osmosas

Su masės pernaša susijęs dar vienas reiškinys. Daugelio ląstelių membranos yra pralaidžios vandeniui, bet nepralaidžios kitoms vandenyje ištirpusioms molekulėms. Vadinasi, vanduo gali patekti į ląstelę, bet tam tikri ląstelės komponentai negali iš jos išeiti. Šis procesas (tirpiklio difuzija per membraną mažesnės koncentracijos kryptimi) vadinamas *osmosu*. 5.7.8 pav., a, pavaizduotas stiklinis indas, kurio viduje yra pusiau pralaidi membrana, skirianti indą į dvi dalis. Indo A dalyje yra cukraus tirpalas, o B dalyje – vanduo. Kiekvienoje indo dalyje esančios molekulės turi kinetinės energijos, todėl juda chaotiškai tos dalies viduje. Membrana apsaugo nuo visiško dviejų tirpalų susimaišymo ir ištirpusios medžiagos molekulių judėjimo iš A dalies į B dalį. Tačiau ji yra pralaidi vandeniui, todėl po tam tikro laiko A dalyje padidės tirpalo tūris (5.7.8 pav., b).

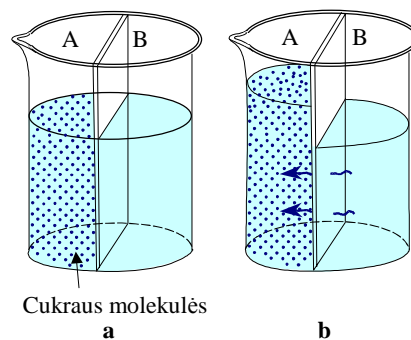
Tirpiklio (vandens) koncentracija yra didesnė indo B dalyje (5.7.8 pav., a), nes šioje dalyje jokių kitų molekulių nėra. Tokiame pačiame skysčio tūryje A dalyje yra tirpiklio (vandens) ir ištirpusios medžiagos (gliukozės) molekulių, todėl šioje dalyje tirpiklio (vandens) koncentracija yra mažesnė, nes vandens molekulės iš B dalies, kur vandens molekulių koncentracija didesnė, difunduos į A dalį, kur jų koncentracija mažesnė. O štai cukraus molekulės negali difunduoti per membraną iš A dalies į B dalį. Šis procesas vyks, kol abiejose membranų pusėse tirpiklio koncentracijos susilygins. Taigi osmosas vyksta iš B dalies į A dalį.

Panašiu būdu natrio ir chloro jonai apsaugomi nuo judėjimo iš vienos ląstelės membranų pusės į kitą (5.7.9 pav.).

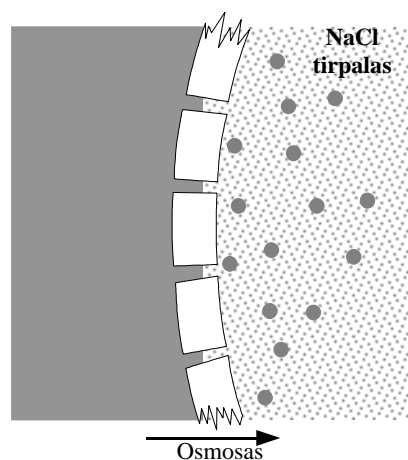
Osmosas, kaip ir visi kiti procesai, vykstantys gyvuose audiniuose, yra dinaminis procesas. Kadangi visos dalelės turi kinetinės energijos, atrodytų, tirpiklio molekulės tuo pačiu metu turėtų difunduoti abiem kryptimis vienodai, bet galutinis rezultatas – tirpiklio molekulės juda mažesnės koncentracijos kryptimi. Kai kalbama apie tirpiklio judėjimą, mintyse turima paties tirpiklio, o ne ištirpusios medžiagos koncentracija.

Praktikoje osmoso reiškinį komplikuoja slėgio faktorius. Kaip matyti iš 5.7.8 pav., b, indo dalyje pasikeičia tirpalo aukštis. Vykstant osmosui, tirpalo aukštis A dalyje tampa didesnis negu vandens lygis B dalyje. Šis skirtumas tarp dviejų skysčio lygių generuoja slėgių skirtumą per membraną, nes slėgis yra didesnis A dalyje. Šioje dalyje dėl osmoso didėjant vandens molekulių skaičiui padidėja skysčio tūris, kartu ir slėgis. Šis didesnis slėgis linkęs priešintis kitų vandens molekulių difuzijai į A dalį. Ilgainiui dėl šio slėgio pasiekama pusiausvyra. Reikia pažymėti, kad difuzija nesibaigia, ji vyksta tolygiai kiekviena kryptimi, kadangi membrana išlieka pralaidi vandeniui. Hidrostatinis slėgis, kurį sukelia papildomas skysčio stulpelis, vadinamas *osmosiniu slėgiu*.

Bet kokie du tirpalai, kurie turi tokį patį osmosinį slėgį, vadinami *izoosmosiniais*. Jei du tirpalai yra atskiriami membrana, tirpiklio molekulės tarpusavyje keisis vietomis, bet nevyks tirpiklio molekulių judėjimas. Reikia pažymėti, jog tai nepriklauso nuo ištirpusių dalelių prigimties, kadangi osmosinis slėgis yra tik ištirpusių dalelių kiekio konkrečiame tūryje, t. y. koncentracijos, funkcija. Vadinasi, osmosinis slėgis priklauso nuo tirpiklio koncentracijų dviejuose tirpaluose skirtumo.



5.7.8 pav. Osmos reiškinys



5.7.9 pav. Osmosas, vykstantis per ląstelės membraną, kai natrio chlorido jonai yra vienoje membranų pusėje, o vanduo – kitoje

Šie reiškiniai turi ypatingą tiesioginį ryšį su žmogaus organizmu, nes įvairių dalelių koncentracija skirtingose vidinėse kūno terpėse lemia skysčio judėjimą į organų ląsteles ir iš jų (pavyzdžiui, inkstų ir kt.). Osmosiniai sąryšiai egzistuoja tarp kraujo dalelių ir kitų organizmo tirpalų. Reikia pasakyti, kad osmosinis kraujo slėgis vandens atžvilgiu yra apie 700 kPa, o tai atitinka 67 m vandens stulpo aukščio slėgį. Tačiau kūne kraujo molekulės neturi sąveikos su grynu vandeniu, todėl osmosinis slėgis yra daug mažesnis.

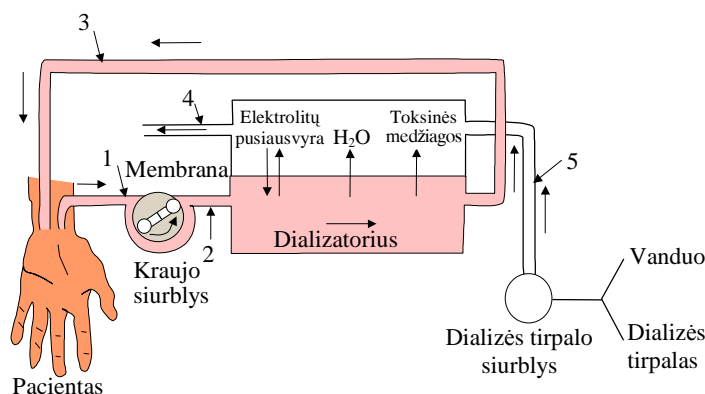
Pavyzdžiui, normaliai kraujyje natrio chlorido koncentracija yra 0,9 % (0,9 g natrio chlorido/100 ml vandens). Tai reiškia, kad normali natrio chlorido koncentracija eritrocite apytiksliai bus lygi 0,9 %, ir sakoma, jog ląstelė yra izotoninė kraujo atžvilgiu, t. y. ląstelės turi tokį patį tonusą (turi tokią pačią kaip ir kraujo ištirpusių medžiagų koncentraciją). Tirpalas, kuriame natrio chlorido koncentracija yra didesnė už 0,9 %, vadinamas *hipertoniniu*, nes šiuo atveju tirpalas turi didesnę ištirpusios medžiagos koncentraciją negu ląstelė, o vandens koncentracija tirpale yra mažesnė negu ląstelėje. Todėl vandens molekulės dėl osmoso judės iš ląstelės į tirpalą, vyks ląstelės dehidracija, kartu ji susitrauks ir netgi žus. Ir atvirkščiai, tirpalas, kuriame natrio chlorido koncentracija yra mažesnė už 0,9 %, vadinamas *hipotoniniu*, nes tuomet ištirpusios medžiagos koncentracija tirpale yra mažesnė, o vandens koncentracija tirpale yra didesnė negu ląstelėje. Vandens molekulės dėl osmoso judės iš tirpalo į ląstelę, ląstelė išbrinks ir net gali sprogti. Tačiau organizme egzistuoja įvairūs apsauginiai veiksniai, todėl čia aprašyti kraštutiniai atvejai yra reti, nes ištirpusių medžiagų ir tirpiklio molekulių judėjimas yra palyginti mažas.

Osmos reiškinys užtikrina skysčių pusiausvyrą žmogaus organizme: dėl jo vandens molekulės gali laisvai judėti per membranas ir pakeisti vandens koncentraciją tiek ląstelių viduje, tiek skysčiuose, esančiuose ląstelės išorėje. Osmosas svarbus ir kraujotakos sistemai, nes kraujagyslių tinklui netekus skysčių, padidėja ištirpusių medžiagų lygis jose, o tirpiklio lygis didės labai lėtai, jei pavyzdžiui, gydymui reikalingas tirpalas pateks į organizmą staigiai. Taigi padidės kraujo tūris, kuris savo ruožtu pakels grįžtančio veninio kraujo lygį ir padidins širdies krūvį (kraujo tūris yra svarbus veiksnys, lemiantis širdies darbą).

5.7.11. Dializė. Hemodializė

Aiškinant osmoso reiškinį 5.7.10 skyrelyje buvo kalbama tik apie vienos medžiagos – tirpiklio pernašą per membraną. Tačiau žmogaus organizmo membranos yra laidžios įvairioms skirtingų medžiagų molekulėms, pavyzdžiui, vandens, druskos, gliukozės, šlapalo ir kt. Didelės molekulės (hemoglobino, albumino, proteinų ir pan.) negali difunduoti per membraną, tačiau skysčiai, mažos molekulės ir jonai tai daryti gali. Toks procesas, kai tirpale esančios mažos molekulės dėl skirtingo difuzijos greičio per pusiau laidžią membraną atskiriamos nuo didelių, vadinamas *dialize*. Dializė taikoma medicinoje inkstų funkcijai pakeisti, kai ji yra nepakankama ar visiškai sutrikusi. Dializės tipai yra du: dializė per pilvaplovę ir hemodializė.

Dializė per pilvaplovę vyksta dėl difuzijos ir osmoso reiškinų, tam naudojamos pilvaplovės membranos. Dializės tirpalas leidžiamas į paciento pilvo ertmę. Tai yra santykinai paprasta procedūra, nereikalaujanti brangių prietaisų ir taikoma pacientams, kuriems yra ryškus inkstų



7.5.9 pav. Hemodializės principo schema

funkcijos nepakankamumas. Ji kartojama tam tikrais laiko tarpais, kiekvieną kartą vartojant švarų skystį.

Hemodialize vadinamas kraujo valymas dializės būdu nuo nepageidaujamų medžiagų (įvairių atliekų, toksinių medžiagų, vaistų ir pan.) ar jų pertekliaus (7.5.9 pav.), kai inkstai šios funkcijos neatlieka arba jų veikla sutrikusi. Tai procesas, kurio metu iš vienos pusiau laidžios, dirbtinės membranos pusės teka kraujas, o iš kitos priešinga kryptimi – tam tikras skystis. Membranos poros leidžia kraujo plazmos komponentams (išskyrus koloidinius plazmos proteinus) laisvai difunduoti abiem kryptimis. Kraujas iš paciento arterijos teka per dirbtinę membraną (1), kuri atskiria dializatorių (2) nuo dializės tirpalo tėkmės (5). Elektrolitai ir mažos molekulės laisvai difunduoja per membranos poras. Didelės molekulės ir kraujo ląstelės negali pereiti membranos. Panašiai bakterijos, esančios dializės tirpale, negali patekti į kraują.

Dializės tirpalas turi kelias paskirtis. Jame esančių medžiagų skirtingos koncentracijos palengvina vandens difuziją iš kraujagyslių, kai jose yra vandens koncentracija per didelę dėl koncentracijos gradiento susidarymo dializės tirpalo kryptimi. Vanduo difunduos į dializės tirpalą ir bus pašalintas iš kraujagyslių (iš kraujo). Difuzija priešinga kryptimi (į kraują) vyks tada, kai vandens molekulių koncentracija kraujyje bus žema, pasikeitus dializės tirpalo koncentracijai, taigi egzistuos koncentracijos gradientas kraujo kryptimi. Jei vandens molekulių koncentracija bus tokia kaip ir turi būti normaliai, t. y. vienoda, vandens molekulių difuzija nevyks nė viena kryptimi. Ištirpusių dializės tirpale medžiagų koncentracija atkurs normalią tų medžiagų koncentraciją plazmoje. Kadangi nei šlapalo, nei kreatino šiame tirpale nėra, tai beveik visos atliekos (šalinami produktai) difunduos iš kraujo ir vamzdeliu (4) bus surenkami į atliekų vonią. Elektrolitų koncentracija tuo metu atitiks normalų plazmos lygį, taigi tik jų perteklius difunduos išorėn, o išvalytas kraujas vamzdeliu (3) teka į paciento veną.

Čia aprašyta sistema vadinama *dirbtiniu inkstu*, o procesas – hemodialize. Toks dirbtinis inkstas gali išvalyti 150 litrų skysčio per 24 valandas, tuo metu pagaminama 1,5 litro šlapimo. Labai svarbu šio proceso metu palaikyti dializės tirpalo temperatūrą intervale nuo 36 iki 42 °C, nes kitaip pacientas jaus diskomfortą (grįžęs išvalytas kraujas bus atvėšęs). Šiuo metu pasaulyje sukurta įvairių

dirbtinio inksto modifikacijų, kurios skiriasi dirbtinių membranų medžiagomis (naudojama natūrali celiuliozė ir jos pakaitalai, įvairios sintetinės medžiagos ir kt.) ir technologija. Jos naudojamos atitinkamai atsižvelgiant į paciento būklę ir bendrą medicininę situaciją. Dirbtinis inkstas ne tik išvalo kraują, bet ir palaiko tinkamą elektrolitų pusiausvyrą bei pH, kontroliuoja organizmo skysčių balansą.