

## POJAVI Z MEHURČKI IN KAPLJICAMI

Janez Strnad

Na robu sveta velikih teles se odpira zanimivo območje mehurčkov in kapljic. V njem imajo pomembno vlogo fazne spremembe in metastabilna stanja. Kapljice so odločilne v ozračju. Svoj čas so jih izkoriščali v megličnih celicah. Podobno so mehurčke izkoriščali v mehurčnih celicah. Mehurčki sodelujejo pri pojavu vročega napitka. Ali bi lahko s pivom zaznavali hitre nabite delce? Pri segrevanju vode, kavitaciji in sonoluminiscenci ima pomembno vlogo implozija mehurčkov.

### Fazne spremembe in metastabilna stanja

Najpreprostejše fazne spremembe so med trdnim in kapljevinskim stanjem *taljenje* ter med kapljevinskim in trdnim stanjem *strjevanje* in med kapljevinskim in plinskim stanjem *izparevanje* ter med plinskim in kapljevinskim stanjem *kondenzacija*, *utekočinjenje*. Fazne spremembe med trdnim in plinskim stanjem, sublimacija, ter plinskim in trdnim stanjem, izločanje v trdni fazi, so v tej zvezi manj zanimive.

Pogosto pri temperaturi pod tališčem opazimo *podhlajeno kapljevino* in pri temperaturi pod vreliščem *podhlajen plin (paro)* ter pri temperaturi nad vreliščem *pregreto kapljevino*. O *pregreti trdnini* nismo slišali dosti. Nekaj časa so mislili, da trdnine sploh ni mogoče segreti. Tako so mislili, ker pri temperaturi pod tališčem na površju kristala nastane zelo tanka plast snovi z lastnostmi kapljevine, ki se debeli, ko temperatura narašča proti tališču. S tako plastjo je Michael Faraday leta 1850 pojasnil, zakaj je led spolzek. S sodobnimi merilnimi načini so se prepričali, da taka plast obstaja. Pri posebnih poskusih so kristale pregrel, na primer majhne kristale srebra [1], ki so jih prevlekli prevlekli s tanko plastjo zlata, ki ima višje tališče. To je uspelo tudi s kristali svinca [2], ki jih omejujejo kristalne ravnine (111), na katerih naj ne bi nastala kapljevinska plast.

---

### Voda

Pri navadnem tlaku voda vre pri temperaturi  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podhlajeno vodo je menda prvi opazil Gabriel Fahrenheit leta 1714. Vodo je mogoče izdatno podhladiti, če je voda čista, če v njej ni mehurčkov zraka, če ima posoda gladke stene, če miruje in ni ionizirajočih delcev. *Homogena nukleacija*, to je prehod v trdno stanje po vsej prostornini, se dogodi pri temperaturi  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Če vodo zelo hitro ohladijo ali led močno stisnejo, dobijo amorfnostno trdnino, steklo. Obstajata dve obliki amorfnega ledu. Temperaturo prehoda cenijo na  $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Amorfnostni led je mogoče segreti do približno  $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ne da bi se mu spremenilo stanje [3], [4].

---

Opisali smo fazne spremembe v sistemu z eno sestavino. Fazne spremembe potekajo tudi v sistemu z dvema sestavinama, na primer v vlažnem zraku, ki ga obravnavamo kot sestavo suhega zraka in vodne pare, ali v "gazirani" vodi, ki jo obravnavamo kot sestavo vode in ogljikovega dioksida. Zanimamo se za kondenzacijo vodne pare v vlažnem zraku, ki je zelo pomembna v ozračju. Pri tem se pri temperaturi pod rosiščem pojavi metastabilno stanje *prenasičene pare*. Zanimamo se tudi za metastabilno stanje *prenasičene raztopine* v raztopini ogljikovega dioksida v vodi, ko tlak raztopljenega ogljikovega dioksida preseže ravnovesni tlak.

### Preprost račun

Pregrete in podhlajene snovi sodijo k metastabilnim stanjem. Ta stanja v termodinamiki lahko primerjamo z labilnimi ravnovesnimi legami v mehaniki. Pregreto ali podhlajeno kapljevino pojasnimo s termodinamičnega gledišča. Dovolj je, če privzamemo, da imajo molekule plina prostornino in da deluje med molekulama privlačna sila. Oboje upošteva van der Waalsova enačba, zapisana za mol:

$$(p + a/V_M^2)(V_M - b) = RT.$$

Temperaturo izrazimo s kritično temperaturo  $\tilde{T} = T/T_k$ , tlak s kritičnim tlakom  $\tilde{p} = p/p_k$  in molsko prostornino s kritično molsko prostornino  $\tilde{V}_M = V_M/V_{Mk}$ . Dobimo *enačbo ustrežajočih si stanj*, ki velja za kateri koli plin:

$$(\tilde{p} + 3/\tilde{V}^2)(\tilde{V} - 1/3) = 8\tilde{T}/3.$$

Približek za izoterme realnega plina dobimo, ko krivulje  $\tilde{p}(\tilde{V}) = -3/\tilde{V}^2 + 8\tilde{T}/(3(\tilde{V} - 1/3))$  premostimo z vodoravno črto, tako da sta ploščini vrha in doline enaki. Krivulja med izotermo in minimumom na levi ustreza pregreti kapljevini, krivulja med izotermo in maksimumom na desni pa podhlajenemu plinu. Vmesni del krivulje je nedosegljiv, tam bi bila stisljivost negativna. Velja opozoriti, da van der Waalsova enačba samo kvalitativno opiše prehod plina v kapljevino. Zanj je razmerje  $RT_k/(p_k V_{Mk}) = 8/3 = 2,67$ , medtem ko je za realne pline to razmerje večje, na primer za helij 3,13, za kisik 3,42...

### Molekule

Molekule v plinu se prosto gibljejo in prožno trkajo med seboj in s steno posode. Velikosti njihovih hitrosti so porazdeljene po Maxwelllovo. Povprečna hitrost pojema, ko se niža temperatura. Pri dovolj nizki temperaturi kot fluktuacije nastajajo gruče molekul in se razletijo. Pri vrelišču se nekaterim od gruč pridružijo nove molekule in gruče rastejo in izločijo se kapljice. V makroskopskem opisu sile med molekulami prispevajo k površinski napetosti. Verjetnost za nastanek kapljic se poveča na krajih s povečano gostoto energije, to so na primer raze in osti v steni, ioni, tuji makroskopski delci. Ti delujejo kot *kondenzacijska jedra*, na katerih se izločijo kapljice.

Obratno je v kapljevini. V njej trkajo molekule z veliko hitrostjo. Pri vrelišču nastajajo v kapljevini gruče molekul plina in potem mehurčki plina. Pri makroskopskem gledanju mora biti

tlak večji kot vsota nasičenega parnega tlaka (izparilnega tlaka) in tlaka  $2\gamma/R$  zaradi površinske napetosti  $\gamma$ , da kapljevina zavre. Tlak zaradi površinske napetosti je tem večji, čim manjši je polmer  $R$  mehurčka. Potem ko mehurček nastane, zrasede. Verjetnost za nastanek mehurčkov se poveča, če so v pregreti kapljevini kraji s povečano gostoto energije, ki smo jih našli. Ti delujejo kot *jedra*, na katerih se izločijo mehurčki.

### Ozračje

V ozračju imajo kondenzacijska jedra pomembno vlogo [5]. Značilni premer kondenzacijskih jeder meri  $0,1 \mu\text{m}$ , kapljic vode v oblakih  $0,02 \text{ mm}$  in kapljic dežja  $2 \text{ mm}$ . Kot kondenzacijska jedra delujejo prah, črni ogljik od požigov na poljih, saje iz dimnikov in strojev z notranjim zgorevanjem, delci od ognjeniške dejavnosti, delci morske soli, delci, ki izvirajo od fitoplanktona. Vse to štejemo k *aerosolu*. (Fitoplankton oddaja dimetilsulfid, iz katerega nastanejo kapljice metansulfonske kisline kot sulfatni aerosol.) Kako učinkovito kondenzacijska jedra spodbujajo nastanek oblakov, je odvisno od njihovih lastnosti, predvsem od higroskopnosti. Razmere so zapletene. Nekatera kondenzacijska jedra so bolj učinkovita pri nastanku oblakov iz vodnih kapljic, druga pa bolj pri nastanku oblakov iz kristalčkov ledu.

V zraku je navadno sto do tisoč kondenzacijskih jeder v kubičnem centimetru. Cenijo, da na Zemlji vsak dan v ozračje preide za 5 milijard kilogramov kondenzacijskih jeder. Gostota kondenzacijskih jeder je tem večja, čim bolj je zrak onesnažen. Oblaki v onesnaženem zraku imajo več manjših kapljic in se zdijo bolj beli. Obstajata dve nasprotujoči si napovedi. Dvig temperature naj bi povečal gostoto kondenzacijskih jeder. Zato bo oblakov več in bodo bolj odbijali sončno svetlobo. To bo delovalo proti segrevanju ozračja. (Za 5% povečan albedo Zemlje bi izravnal pojav tople grede.) Po nasprotni domnevi naj bi dvig temperature povzročil, da se bodo v svetovnih morjih oblikovale plasti z različno temperaturo. Fitoplankton naj bi se zgomel v nižji, hladnejši plasti, kjer je manj sončne svetlobe. Zaradi tega bo nastalo manj kondenzacijskih jeder, tako da bo oblakov manj. Še enkrat poudarimo, da so razmere zelo zapletene. Porazdelitev aerosolov v ozračju je drugačna kot porazdelitev toplogrednih plinov. Vrhu tega imajo različni aerosoli različen učinek. Tako na primer črni ogljik povzroči, da nastale kapljice prej izhlapijo in oblaki trajajo krajši čas. Za zdaj ni mogoče napovedati končnega učinka.

V visokih plasteh ozračja so pogosto kapljice podhlajene vode. Letala povzročajo nastanek *kondenzacijskih sledi*. Poleg tega se na letalih lahko izloča led, kar utegne biti za letalo nevarno. Žled pogosto nastane iz podhlajenih dežnih kapljic. Nekateri tovarni pijači so izdelovale hladilnike in steklenice, v katerih je bila podhlajena pijača. Ko so steklenico odprli, je del kapljevine zmrznil in je nastala mešanica ledenih zrn in pijače. Pri gretju vode v mikrovalovni pečici lahko nastane pregreta voda, ki eksplodira, ko pečico odpremo in premaknemo posodo.

Če ni kondenzacijskih jeder je mogoče vlažni zrak podhladiti za 13 stopinj za 5 do 6 ur, preden se s homogeno nukleacijo ne izločijo kapljice. Zrak je treba za 40% prenasitati, preden se s homogeno nukleacijo izločijo kapljice. Nekdaj so oblake "sejali" s srebrevim jodidom v pričakovanju, da bi

sprožili dež in preprečili točo.

### Meglična celica

Charles Thomson Rees Wilson je leta 1894 izdelal napravo, s katero je poskusil delati oblake v laboratoriju. Iz vlažnega zraka je skrbno odstranil prah. V toplotno izoliranem valju je z batom nenadno povečal prostornino, da se je zrak ohladil pod rosišče in postal prenasičen. Ugotovil je, da so kapljice megle nastale, ko je prostornino povečal za eno četrtno. Domneval je, da nastanejo na ionih, ki delujejo kot kondenzacijska jedra. Z rentgensko svetlobo je povzročil nastanek megle. Leta 1910 je sestavil izboljšano meglično celico in naslednje leto opazoval sledi delcev  $\alpha$  in  $\beta$  iz radioaktivnega izvira. Leta 1927 je dobil polovico Nobelove nagrade. Z meglično celico so odkrili več dotlej neznanih delcev, na primer pozitron.

### Mehurčna celica

Donald Glaser je leta 1952 prišel na misel, da bi opazoval hitre nabite delce v pregreti kapljevini. Prve poskuse je delal s pregretim etrom. Potem so večinoma uporabljali tekoči vodik pri nizki temperaturi in velikem tlaku. Nenadno so zmanjšali tlak, da se je temperatura povišala nad vrelišče. Elektroni in ioni, ki so jih na poti po pregretem vodiku sproščali hitri nabiti delci, so delovali kot jedra, na katerih so se izločili prvi mehurčki plinastega vodika. Potem so tlak povečali, da vodik ni zavrel. Pri reakcijah med delci iz pospeševalnika in vodikovimi jedri so nastali in razpadli delci. Z mehurčno celico so odkrili več dotlej neznanih kratkoživih delcev. Glaser je leta 1960 dobil Nobelovo nagrado. Danes uporabljajo naprave z množicami napetih žic v plinu, s katerih je mogoče podatke neposredno zajeti z računalnikom.

### Pojav vročega napitka

V kapljevini, prenasičeni z raztopljenim plinom, na primer v segreti vodi iz pipe ali v pivu, šampanjcu ali gazirani pijači dodatek hrapavih delcev, na primer ščepec soli, peska ali prahu, povzroči nastanek dodatnih mehurčkov. Zaradi mehurčkov se zmanjša frekvenca osnovnega tona, ki ga slišimo, ko udarjamo po dnu valjaste posode s prenasičeno kapljevino. To je *pojav vročega napitka* (hot chocolate effect). Lastna frekvenca stebrička kapljevine se zmanjša, ker je sorazmerna s hitrostjo zvoka. Hitrost zvoka v kapljevini z mehurčki je manjša kot v kapljevini brez mehurčkov. Frank S. Crawford, ki je pojav raziskal, je ugotovil, da se frekvenca zmanjša do osemkrat [6].

V vodi z adiabatno stisljivostjo  $\chi_S = -(1/V)(dV/dp)_S$  in gostoto  $\rho$  velja za hitrost zvioka  $c$  enačba  $1/c^2 = \chi_S \rho$ . V vodi z mehurčki pa velja za hitrost zvoka  $c_m$  enačba:

$$\frac{1}{c_m^2} = -\frac{\rho}{V} \frac{dV}{dp} - \frac{\rho}{V} \frac{dV'}{dp} = \frac{1}{c^2} (1 + r\chi'_S/\chi_S) \quad \text{in} \quad \frac{c_m}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,49 \cdot 10^4 r}}.$$

Razmerje prostornin plina v mehurčkih  $V'$  in vode  $V$  je  $r = V'/V \ll 1$ . V obeh členih upoštevamo prostornino in gostoto vode in samo v drugem členu spremembo prostornine mehurčkov  $dV'$ .

Stisljivost zraka in stisljivost vode sta v razmerju  $\chi'_S/\chi_S = c^2\rho/(\kappa p) = 1,49 \cdot 10^4$ . Upoštevali smo podatka za sobno temperaturo pri navadnem zračnem tlaku. Že majhen delež mehurčkov vpliva na hitrost zvoka. Približek oceanografi poznajo kot *Woodovo enačbo*. Ne upošteva površinske napetosti, velikosti mehurčkov, plina v mehurčkih in drugih podrobnosti ter privzame, da je premer mehurčkov majhen v primerjavi z valovno dolžino zvoka.

### Celica s pivom

Crawford je raziskal, ali bi pivo v pravkar odprti steklenici lahko uporabili za zaznavanje hitrih nabitih delcev [7]. Ali bi lahko opazili dodatne mehurčke, ki bi jih v pivu povzročili taki delci? Opozorili so ga, da se prenasičena kapljevina močno razlikuje od pregrete kapljevine. Glaser pa ni izključil možnosti, da se pojavijo dodatni mehurčki. Kot sodelavec Lawrenceovega laboratorija in kalifornijske univerze v Berkeleyju je Crawford imel dostop do najmočnejših izvirov. Pivo je izpostavil sevanju  $\gamma$  iz šibkega izvira s 10  $\mu\text{Ci}$  kobalta  $^{60}\text{Co}$ , ki je seval fotone  $\gamma$  z energijo 1,2 in 1,3 MeV. Potem je uporabil izvir z 10 mCi in nazadje še izvir z 2000 Ci. V nobenem primeru ni opazil dodatnih mehurčkov. Enako je poskusil še z delci  $\alpha$  iz bevatrona. Za obsevanje so uporabili sunke s po  $4 \cdot 10^{10}$  delci, ki so si sledili v razmikih po 4 s. Nato so uporabili sunke s po  $2 \cdot 10^7$  jeder železa z energijo 600 MeV/nukleon in nazadnje še sunke s po  $2 \cdot 10^5$  jeder urana. Opazovali so na daljavo preko televizije. Dobro je bilo videti mehurčke, ki so se dvigovali v pivu, a dodatnih mehurčkov zaradi obsevanja niso opazili v nobenem primeru. Po tem je Crawford sklepal, da s pivom ni mogoče zaznavati hitrih nabitih delcev. Fizikalni kemik ga je podučil, da je bilo to mogoče pričakovati. V vodni raztopini soli se raztopi manj plina, kot v čisti vodi. Pivo je šibek elektrolit in v njem hitri nabiti delci znatno ne povečajo gostote ionov. Le pri zelo močnem obsevanju bi lahko nastalo nekaj dodatnih mehurčkov zaradi malenkostnega povišanja temperature v obsevanem delu kapljevine. Vprašanje, ali bi hitri nabiti delci povzročili nastanek mehurčkov v prenasičeni kapljevini, ki ni elektrolit, je še odprto.

Z zmanjšanjem vzgona v mehurčkih pri izbruhu metana z morskega dna so poskušali pojasniti, zakaj so se, na primer v Bermudskem trikotniku, nenadoma potopile ladje [8].

Pred časom so bili priljubljeni poskusi, pri katerih je pena mehurčkov brizgnila visoko v zrak [9]. Srednješolci in študenti so delali take poskuse in o njih so poročali v revijah, na televiziji in na spletu. Najbolj so se obnesle umetne gazirane pijače kot kokakola ali kokta. Posebno učinkovite so bile pijače te vrste, oslajene z umetnim sladilom namesto s sladkorjem, ki imajo majhno površinsko napetost. Steklenico pijače ao odmašili, vanjo vrgli bombone in jo zamašili z zamaškom z nekajmilimetrsko okroglo odprtino. Namesto bombonov je bilo mogoče uporabiti pesek ali prah. Na hrapavem površju dodatkov so se burno razvijali mehurčki ogljikovega dioksida in tvorili peno, ki je brizgala iz steklenice.

Pri treh pojavih z mehurčki zasledimo sunkovito sesedanje, *implozijo* mehurčkov. Implozijo

je leta 1917 podrobneje raziskal lord Rayleigh v članku *O tlaku, ki se razvije v kapljevini med implozijo krogelne votline*.

### Šumenje v vodi pred vretjem

Pri segrevanju vode v posodi se pojavi značilno šumenje, ki preneha, ko voda zavre. Prav po prehodu od šumenja k brbotanju vemo, da je voda zavrela, če je ne opazujemo naravnost. Osborne Reynolds je leta 1901 raziskoval, ali pri segrevanju vode nastane enak šum kot pri toku vode skozi ožino v odprti cevi. Pozneje je William Henry Bragg v nizu poljudnih predavanj na londonski Kraljevi ustanovi ugotovil, da "so zvoki kotlička zelo zanimivi [...] majhni mehurčki pare se sesedejo, kar se zgodi zelo hitro, tako da strani mehurčka udarita druga ob drugo z ostrim pokom. Udarec je tako trd, kot da bi jeklo udarilo ob jeklo. Tako se pojavi iz kotlička šum, kot da bi ga zadevala nešteta kladivca." Ko mehurčki eksplozivno implodirajo, nastanejo udarni valovi (valovna čela). Lord Rayleigh se je zavedal zvokov, ki se pojavijo pri segrevanju vode, a jih v knjigi o zvoku ni obdelal. Tedaj so bile možnosti za merjenje frekvenc omejene. V zadnjem času raziskujejo mehurčke, ki se pojavijo pri segrevanju vode v vrelnem jedrskem reaktorju, in povzročajo naključne spremembe nevtronskega toka.

Na začetku segrevanja vode v kotličku prevladuje prenos toplote s konvekcijo, pri kateri ne nastane zvok. Pri srednjih temperaturah nastanejo mehurčki na jedrih. Pri tem zasledimo tri območja. Na prvem pri temperaturi okoli 40 °C začnejo nastajati mehurčki raztopljenega zraka na neravnostih na steni čaše in se dvigajo, ne da bi povzročali zvok. To opazimo, če voda pred poskusom ni bila prevreta. Na drugem območju pri temperaturi okoli 70 °C začnejo na dnu posode nastajati mehučki pare. Za razliko od mehurčkov zraka nastajajo sunkovito in implodirajo, ko zaidejo v hladnejši predel vode. To spremljajo udarni valovi, ki zbudijo resonanco lastnih nihanj čaše, zračnega stolpca in vodnega stolpca. Na tretjem območju pri temperaturi okoli 92 °C začnejo nastajati mehurčki pare in potujejo proti gladini, kjer počijo. Zmanjšanje jakosti zvoka pojasnimo s spremembo hitrosti zvoka zaradi pojava vročega napitka. Zaradi mehurčkov gladina vzvalovi, zaradi česar robni pogoj za vodni in za zračni stolpec ni več natančno določen. Ko voda zavre veliki mehurčki pare nastajajo po vsej prostornini in se hitro gibljejo proti gladini.

Zvoke pri stacionarnem segrevanju vode v majhni posodi sta raziskala Samer Aljishi in Jakub Tatarkiewicz [10]. Uporabila sta grelno ploščo, različne posode, brezžični mikrofoni, spektralni analizator in pisalni instrument. Poskuse sta delala s kovinskim čajnikom, z enolitrsko in dvolitrsko stekleno čašo ter litrsko kovinsko valjasto posodo. Uporabila sta vodo iz pipe, ki sta jo pred poskusom pol ure vrela, in s tem iz nje izgnala večji del raztopljenega zraka ter destilirano vodo. Merila sta le temperaturo pod gladino, temperaturnega profila pa nista ugotavljala. Razmere sta lahko najbolje opazovala pri segrevanju litra vode v dvolitrski stekleni čaši z višino 23 cm in s premerom 11,3 cm.

Vrh pri frekvenci okoli 1650 Hz je ustrezal longitudinalnemu lastnemu nihanju čaše, vrh pri frekvenci 1910 Hz pa radialnemu lastnemu nihanju čaše. Na ta vrhova ni vplivala višina vode

v čaši. Vrh pri frekvenci 510 Hz, ki se je pojavil pri visoki temperaturi, pa je bil odvisen od višine vode in je ustrezal lastnemu nihanju zračnega stolpca nad vodo kot pri orgelski piščali. Frekvenca se je nekoliko spreminjala, ker robni pogoj na vrhu čaše ni bil natančno določen. Ko je nekaj vode povrelo in se je zračni stolpec podaljšal, se je frekvenca zmanjšala. V vodi brez mehurčkov bi pričakovali lastno frekvenco vodnega stolpca pri okoli 3850 Hz. Zaradi mehurčkov pri pojavu vročega napitka se je frekvenca izdatno zmanjšala. Na vrhove pri temperaturi nad 90 °C na območju frekvenc od 130 do 190 Hz nista vplivali ne višina vode ne oblika posode. Bili pa so izrazitejši pri večji prostornini vode, zato so bili verjetno povezani s pokanjem večjih mehurčkov pare ob gladini.

Pri temperaturi pod 85 °C je v spektru prevladoval vrh pri frekvenci 1685 Hz. Z naraščajočo temperaturo je postal izrazitejši vrh pri frekvenci okoli 1920 Hz. Nad temperaturo 92 °C so vrhovi pri teh velikih frekvencah oslabei, pojavili pa so se novi pri manjših frekvencah 130, 190, 410 in 515 Hz. Največja je bila jakost zvoka pri temperaturi okoli 90 °C. Jakost se je izrazito zmanjšala, ko je voda zavrela. Mehurčki niso več implodirali, ampak so potovali do gladine in tam počili. Zvok pri segrevanju destilirane vode je bil šibkejši kot pri vodi iz pipe. Ko je nekaj vode povrelo, so na dnu posode nastali preostanki, ki so delovali kot dodatna jedra. Zvok je bil šibkejši tudi, ko so vodo med segrevanjem mešali.

### Kavitacija

Tlak v toku kapljevine je odvisen od hitrosti. To izhaja iz Bernoullijeve enačbe, ki v stacionarnem toku povezuje točko s tlakom  $p_0$  in hitrostjo  $v_0$  s točko s tlakom  $p$  in hitrostjo  $v$ :

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = p + \frac{1}{2}\rho v^2, \quad p = p_0 + \frac{1}{2}\rho(v_0^2 - v^2).$$

Enačba dobro velja za točki na vodoravni tokovnici, približno pa tudi za točki v majhni višinski razliki. Pri dovolj veliki hitrosti  $v$  postane tlak  $p$  manjši od izparilnega tlaka, to je nasičenega parnega tlaka, pri tisti temperaturi.

V zvoku ali ultrazvoku, ki ga opišemo kot ravno valovanje, tlak niha okoli navadnega zračnega tlaka  $p_0$  z amplitudo  $\delta p_0 = c\rho\omega s_0$ . Pri tem je  $c$  hitrost zvoka v vodi,  $\rho$  gostota vode,  $\omega$  krožna frekvenca in  $s_0$  amplituda delov vode. V zvoku z dovolj veliko jakostjo  $j = \frac{1}{2}c\rho\omega^2 s_0^2$  lahko tlak:

$$p = p_0 - \delta p_0 = p_0 - c\rho\omega s_0 = p_0 - \sqrt{2\rho c j}$$

postane manjši od izparilnega tlaka. Pri tem nismo upoštevali površinske napetosti  $\gamma$ , ki v mehurčku s polmerom  $R$  tlak poveča za  $2\gamma/R$ . Zato pri majhnih mehurčkih zapisana ocena ne velja.

---

Ocenimo mejni tlak v majhnih mehurčkih s polmerom  $R$  v kapljevini, pri katerih moramo upoštevati prispevek tlaka  $2\gamma/R$  zaradi površinske napetosti. Tlak plina v mehurčku je enak  $p = P + 2\gamma/R$ , če je  $P$  tlak v kapljevini. Vzemimo, da so spremembe dovolj počasne in potekajo

okoli ravnovesnega tlaka  $p_0 = P_0 + 2\gamma/R_0$ . Pri tem je v ravnovesju  $P_0$  tlak v kapljevini in  $R_0$  polmer mehurčka pri tem tlaku. V majhnem mehurčku se toplota hitro izmenja in lahko vzamemo, da je sprememba izotermna:  $p = p_0 V_0/V = p_0 R_0^3/R^3$ . Tako dobimo za tlak v kapljevini:

$$P = p - 2\gamma/R = p_0 R_0^3/R^3 - 2\gamma/R = (P_0 + 2\gamma/R_0)R_0^3/R^3 - 2\gamma/R = A/R^3 - 2\gamma/R.$$

Vpeljali smo okrajšavo  $A = (P_0 + 2\gamma/R_0)R_0^3$ . Tlak v kapljevini je odvisen od polmera mehurčka. V minimumu velja  $dP/dR = -3A/R_{kr}^4 + 2\gamma/R_{kr}^2 = 0$ . Kritični polmer in kritični tlak v kapljevini sta:

$$R_{kr} = \sqrt{3A/2\gamma} \quad \text{in} \quad P_{kr} = -\sqrt{32\gamma^3/27A} = -4\gamma/(3\sqrt{3}R_0).$$

Nazadnje smo v imenovalcu postavili  $A \approx 2\gamma R_0^2$ , ker je navadno pri majhnih mehurčkih  $P_0 \ll 2\gamma/R_0$ . Tako dobimo *Blakeov tlak*:

$$p_B = P_0 - P_{kr} = P_0 + 0,77\gamma/R_0.$$

To mejo je postavil F. G. Blake leta 1949. Do kavitacije pride, če jo tlak v plinu preseže. Privzeli smo, da so spremembe počasne. Pri hitrih spremembah je treba uporabiti bolj zapletene račune.

Mehurčki zaradi zmanjšane tlaka so značilni za *kavitacijo* [11]. Kavitacijo lahko sproži tudi močan laserski sunek ali električna iskra. Pri *inercialni kavitaciji* nastajajo mehurčki vodne pare in implodirajo. To se primeri v vodnem toku, če se na majhni razdalji izrazito spremeni hitrost, na primer okoli vrtečih se delov turbin, črpalk in ladijskih vijakov ter v zoženem toku. Pojav lahko primerjamo z mehurčki pri izparevanju. Pri izparevanju mehurčki nastajajo zaradi povišane temperature na izbranem kraju, pri kavitaciji pa zaradi zmanjšane tlaka. Pri kavitaciji mehurčki implodirajo, ko zaidejo v predel z manjšo hitrostjo in večjim tlakom, podobno kot pri segrevanju implodirajo, ko zaidejo na območje z nižjo temperaturo. Pri kavitaciji so udarni valovi zaradi implozij mehurčkov na splošno močnejši kot pri segrevanju vode. Inercialna kavitacija je navadno škodljiva. Zaradi nje se zmanjša izkoristek turbin in pogona z vijaki. Udarni valovi povzročijo v kovini mehanske napetosti in lahko pripeljejo do utrujenosti kovine. Mehurčki praskajo dele naprav, ki se zaradi tega prej obrabijo. Dandanes se kavitaciji pri strojih večinoma kolikor mogoče izognejo. Kavitacijo pa je mogoče izkoristiti, da zmanjšajo upor hitrih plovil in izstrelkov.

Kavitacijo sta leta 1895 opazila John I. Thornycroft in S. W. Barnaby, ko je vijak njune podmornice v razmeroma kratkem času postal hrapav. Izumitelj parne turbine Charles Parsons je z jahto dosegel borih 19 vozlov (35,2 km/h), namesto načrtovanih 40 vozlov (74,1 km/h). Pri svojih računih ni upošteval kavitacije.

Kavitacijo zasledimo v naravi. Pojavi se v toku vode na mestih, na katerih se smer toka močno spremeni, na primer v slapovih. Kozice iz družine alpheidae dosežejo le velikost 3 do 5 cm. Ene od klešč so veliko večje od drugih. Ko kozica velike klešče sunkovito zapre, nastane močan pok.



Pogosto navedejo, da pri tem jakost zvoka preseže jakost zvoka motorjev velikega reakcijskega letala, a traja manj kot tisočino sekunde. Tlak se lahko poveča za 0,8 bara. Nastane curek mehurčkov, ki potujejo z nadzvočno hitrostjo. Mehurčki implodirajo in ubijejo manjše živali, večje pa omamijo. Podobno lovijo plen kozice iz rodu stomatopoda, le da so te večje, do 30 cm in več, in nimajo asimetričnih klešč. Do kavitacije lahko pride v ceveh - ksilemu, po katerih drevesa in rastline črpajo vodo in rudninske snovi po deblih navzgor zaradi suše ali mraza. Drevo je zmožno ukrepov, s katerimi se do določene mere izogobe nevšečnostim.

Pri *neinercialni kavitaciji* v zvočnem ali ultrazvočnem valovnem polju mikroskopski mehurčki zraka v vodi zaradi ponavljajočega se zmanjšanja in povečanja tlaka nihajo, ne da bi nastala valovna čela. To vrsto kavitacije je mogoče izkoristiti. Z ultrazvokom na primer v vodi čistijo površje kovin in leč, homogenizirajo mešanice in čistijo vodo. Pri kavitaciji lahko pride do disociacije kemijskih spojin in nastanejo prosti radikali, ki povzročijo kemijske reakcije, kakršne sicer ne bi bile mogoče. Kavitacija ima pomembno vlogo v medicini, na primer pri drobljenju ledvičnih kamnov ali pri zmanjševanju maščevja z ultrazvokom.

---

### Rayleigh-Plessetova enačba

Vedenje mehurčka s polmerom  $R$  v kapljevini z gostoto  $\rho$ , viskoznostjo  $\eta$  in površinsko napetostjo  $\gamma$  opiše *Rayleigh-Plessetova enačba* [12]:

$$p - p_0 = \rho R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \rho \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\eta}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\gamma}{R}.$$

$p$  je tlak v mehurčku in  $p_0$  tlak v nemoteni kapljevini. Enačba sledi iz Navier-Stokesove enačbe za krogelno simetrijo. Rayleigh jo je uporabil leta 1917, a ni upošteval viskoznosti in površinske napetosti, Milton S. Plesset pa je leta 1949 z njo opisal gibajoče se mehurčke pri kavitaciji. V stacionarnih razmerah sledi znana enačba  $p - p_0 = 2\gamma/R$ .

---

### Sonoluminiscenca

V prvi svetovni vojni so raziskovali možnosti za zaznavanje podmornic z ultrazvokom. V ta namen so izdelali močne izvire ultrazvoka. V desetletjih po tej vojni so opazili, da ultrazvok spodbuja kemijske reakcije. Leta 1947 sta H. Frenzel in H. Schultes z ultrazvokom obsevala razvijalec, v katerega sta dala osvetljen fotografski film. Po nekaterih virih naj bi izhajala iz spoznanja, da energija, kakršna se sprosti pri kemijski reakciji, lahko sproži tudi sevanje. Po drugih virih ju je zgoj zanimalo, ali je z ultrazvokom mogoče pospešiti razvijanje. Na filmu sta opazila drobne bliske. Pokazalo se je, da so mehurčki ob imploziji sevali svetlobo. Pojav je dobil ime *sonoluminiscenca* [13], [14]. Frenzel in Schultes sta sklepala, da gre za torno električno in pojava nista dalje zasledovala. Poročajo, da naj bi podoben poskus leto prej naredila N. Marinesco in J. J. Trillat.

Pojav, pri katerem je udeleženi več mehurčkov, *večmehurčna sonoluminiscenca*, je zelo zapleten in ga je težko raziskovati. Leta 1989 pa sta Felipe Gaitan in Lawrence Crum v stoječem ultrazvočnem valovanju opazovala *enomehurčno sonoluminiscenco*. Pri tej osamljen mehurček seva

svetlobo ob vsakem stiskanju. Ta pojav je bil bolj pregleden. Med drugimi ga je raziskal Seth Putterman leta 1995. Ob žici v vodi, po kateri je spustil kratkotrajen tok, je nastal mehurček pare. Preden se je para utekočinila, je v mehurček vdrl raztopljeni zrak iz vode. Vzgon mehurčka je uravnovesil tlak ultrazvoka z glasnostjo 110 decibelov. S svetlobo laserja, ki se je sipala na mehurčku, so izmerili premer mehurčka. Zaradi zunanega tlaka se je premer zmanjšal od 50  $\mu\text{m}$  do 0,5  $\mu\text{m}$ . Potem se prostornina mehurčka ni mogla več zmanjšati zaradi lastne prostornine zajetih molekul. S fotopomnoževalko so izmerili, kako se je spreminjal svetlobni tok. Bliski so bili zelo kratkotrajni. Trajali so do 50 ps (1 ps =  $10^{-12}$  s) in so se ponavljali v razmiku po 35 do 40  $\mu\text{s}$ . Mehurček je seval svetlobo, ko je imel premer okoli 1  $\mu\text{m}$ . Izsevani energijski tok je dosegel od 1 do 10 mW.

Voda absorbira svetlobo z valovno dolžino, krajšo od 200 nm, zato te svetlobe niso mogli opazovati. Tej valovni dolžini ustreza energija fotona 6 eV in tej temperatura 72 000 K. Te ni bilo mogoče pojasniti le z adiabatnim stiskanjem plina v mehurčku. Pojasniti jo je bilo mogoče z udarnim valom. Izsevalo ga je površje, ki je implodiralo z nadzvočno hitrostjo. Udarni val je dosegel razdaljo 20 nm od središča mehurčka, ko se je ta že razpenjal. Spekter izsevane svetlobe je bilo mogoče primerjati s spektrom pri zavornem sevanju. Delali so poskuse z drugimi plini, ki so jih raztopili v vodi. Mehurčki dušika ali kisika so sevali slabše. Tako so ugotovili, da je pomemben argon, ki ga je v zraku okoli 1%, a ga v prečiščenem dušiku ali kisiku ni bilo.

Spekter izsevane svetlobe in temperaturo v mehurčku je težko meriti. Nekaj časa so mislili, da doseže do 200 tisoč kelvinov. Na to so sklepali, ker so argonovi mehurčki v žveplovi kislini sevali spektralne črte molekulskih ionov kisika, žveplovega monoksida in argona, ki naj bi ustrezale energiji do 18 eV. Sredi mehurčka bi v tem primeru med implozijo nastala zelo vroča plazma. Pozneje niso mogli potrditi tolikšne temperature. Ugotovili pa so, da je temperatura v mehurčku dovolj visoka, da se tali jeklo. S spektroskopskimi merjenji so se prepričali, da temperatura doseže vsaj 2300 do 5800 K. Sonoluminiscenco živahno raziskujejo.

---

Leta 2002 je Rusi Taleyarkhan s sodelavci v Državnem laboratoriju Oak Ridge v reviji Science objavil, da je uspelo z mehurčki zlivati jedra težkega vodika v devteriranem acetonu. Vest je zbudila precej zanimanja in dvomov. Leta 2003 je Taleyarkhan nadaljeval poskuse na univerzi Purdue v Lafayetteu v ameriški zvezni državi Indiana. Leta 2005 dva neodvisna raziskovalca nista mogla ponoviti izidov. Leta 2008 so Taleyarkhanu odvzeli profesorski naslov, češ da njegovo raziskovanje ni bilo pošteno. Še do danes niso čisto potihnile razprave o "mehurčnem zlivanju".

---

#### LITERATURA

[1] J. Daeges, H. Gleiter, J. H. Perepezko, *Superheating of metal crystals*, Physics Letters A **110** (1986) 79-82.

[2] J. J. Métois, J. C. Heyraud, *The overheating of lead crystals*, Journal de Physique **50** (1989) 3175-3179.

- [3] R. Rosenberg, *Why ice is slippery?*, Phys. Today **58** (2005) 50-55 (12).
- [4] P. G. Debenedetti, H. E. Stanley, *Supercooled and glassy water*, Phys. Today **56** (2003) 40-46 (6).
- [5] *Cloud condensation nuclei*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_condensation\\_nuclei](http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_condensation_nuclei).
- [6] F. S. Crawford, *The hot chocolate effect*, Am. J. Phys. **50** (1982) 398-404.
- [7] F. S. Crawford, *Hot water, fresh beer, aaaand salt*, Am. J. Phys. **58** (1990) 1033-1036.
- [8] J. Strnad, *Mehurčki*, Presek **19** (1991/92) 22-27; *Dvigajoči se mehurčki*, Obzornik mat. fiz. **39** (1992) 85-89, *Ladja in mehurčki*, Presek **30** (2002/03) 232-236, *Ladja in mehur*, Presek **31** (2003/04) 354-357).
- [9] G. Planinšič, J. Strnad, *Gejzir v steklenici*, Naravoslovna solnica **13** (2009) 10-13 (3).
- [10] S. Aljishi, J. Tatarkiewicz, *Why does heating water in a kettle produce sound?*, Am. J. Phys. **59** (1991) 628-612; J. Strnad, *Šumenje vode v kotličku*, Presek **20** (1992/93) 92-95.
- [11] *Cavitation*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>.
- [12] *Rayleigh-Plesset equation*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Plesset\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Plesset_equation).
- [13] S. J. Putterman, *Sonoluminescence: sound into light*, Scientific American **272** (1995) 32-37.
- [14] S. J. Putterman, K. R. Weninger, *Sonoluminiscence: how bubbles turn sound into light*, Annual Review of Fluid Mechanics **32** (2000) 445-476.