

PADANJE KAPLJIC, IZLOČENIH IZ DIHAL

GREGOR SKOK

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

Ključne besede: epidemija, padanje kapljic, dihal

Dandanes, ko po svetu razsaja virus SARS-CoV-2, ki se med ljudmi najverjetneje najbolj prenaša kapljično, je zelo aktualno vprašanje, koliko časa v zraku ostanejo potencialno patogene kapljice, ki jih iz telesa izločimo iz dihal ob kihanju, kašljanju, govorjenju ali dihanju. Ob določenih poenostavitvah o kemični sestavi kapljic in nekaterih drugih predpostavkah je možno izračunati, koliko časa bi potrebovala kapljica, da pade na tla iz neke začetne višine. Rezultati kažejo, da večje kapljice (npr. tiste z radijem večjim od $50 \mu\text{m}$) padejo iz višine dveh metrov na tla v nekaj sekundah, medtem ko bi lahko manjše kapljice (npr. tiste z radijem manjšim od $5 \mu\text{m}$) padale do tal tudi več ur – seveda v ne preveč suhem zraku, ko se ne bi povsem osušile.

FALLING OF RESPIRATORY DROPLETS

Nowadays, with the pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus, which is most likely transmitted between humans by respiratory droplets emitted by coughing and sneezing, the question of how long these droplets stay airborne is relevant. With the simplification of the chemical composition of the droplets and assuming stationary air, it is possible to calculate how long it would take for a droplet to fall to the ground from some initial height. The results show that larger droplets (e.g., those with a radius greater than $50 \mu\text{m}$) fall from a height of two meters to the ground in a matter of seconds, while smaller droplets (e.g., those with a radius less than $5 \mu\text{m}$) can remain airborne for several hours – assuming that the droplets don't completely dry out.

Uvod

Dandanes, ko po svetu razsaja virus SARS-CoV-2, ki se med ljudmi najverjetneje najbolj prenaša kapljično, je zelo aktualno vprašanje, koliko časa v zraku ostanejo potencialno patogene kapljice, ki jih iz telesa izločimo iz dihal.

Ob kihanju, kašljanju, govorjenju in dihanju se iz dihal izloča večje število kapljic [4]. Na primer, ob močnem kihanju se lahko izloči več kot 40 000 kapljic [9], in če si ust in nosu med kihanjem ne pokrijemo, lahko kapljice priletijo tudi do 8 metrov daleč v horizontalni smeri [1]. Te kapljice so del turbulentnega oblaka, ki se od stran od izvora premika z veliko hitrostjo (lahko tudi več kot 100 m/s , [9]). Med premikanjem lahko predvsem večje kapljice iz oblaka že izpadejo in potencialno kontaminirajo različne površine na tleh ali predmetih. Ščasoma oblak izgubi zagon in razpade, preostale

kapljice v oblaku pa začnejo intenzivneje padati in izhlapevati. Tudi pri govorjenju in dihanju se lahko izloča večje število kapljic. Te iz telesa sicer ne izhajajo s takšno veliko hitrostjo kot pri kihanju, vendar pa se lahko med počasnim padanjem proti tlom premikajo skupaj z okoliškim zrakom in v tem času lahko prepotujejo večjo horizontalno razdaljo. Pri tem glavno vlogo igra hitrost padanja kapljic skozi zrak, saj določa, kako hitro bo neka kapljica padla na tla, to pa je odvisno predvsem od njene velikosti. Velikost kapljic se ob izhlapevanju manjša, hitrost izhlapevanja pa je močno odvisna od temperature in vlažnosti zraka, skozi katerega padajo.

Nas predvsem zanima, koliko časa traja, da posamezna kapljica pade na tla skozi povsem mirujoč zrak ob določeni predpostavki o relativni vlažnosti. Ker je izhlapevanje kapljic, ki jih tvorijo kompleksne biološke tekočine, slabo raziskano [1], bomo v naši obravnavi kemično sestavo kapljic zelo poenostavili. Predpostavimo, da je sestava kapljic podobna slini, v kateri 99,5 % mase predstavlja voda [3], ter da preostale 0,5 % mase predstavlja NaCl, ki je v vodi raztopljen.

Ravnovesna hitrost padanja kapljic

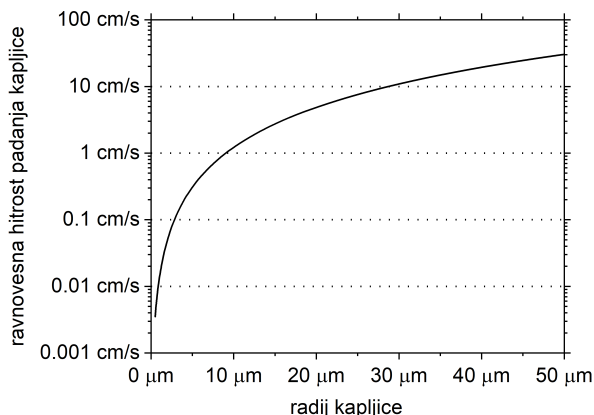
Majhna kapljica zelo hitro doseže ravnovesno hitrost padanja. Na primer, kapljica z radijem $30 \mu\text{m}$ doseže 99 % ravnovesne hitrosti v približno 0,05 sekunde, ko iz mirovanja pade za približno 4 mm [5]. Ravnovesno hitrost padanja zelo majhnih kapljic (v_{rav}) je možno preprosto izraziti ob predpostavki Stokesovega zakona upora, pri čemer ima v_{rav} približno kvadratno odvisnost od radija kapljice ([5], enačba 10-139)

$$v_{\text{rav}} = Ckr^2. \quad (1)$$

V enačbi je r radij kapljice, k pa konstanta, odvisna od težnega pospeška, gostote vode in zraka ter dinamične viskoznosti zraka. C je korekcijski faktor, ki je pomembno različen od 1 le za zelo majne kapljice z radijem manjšim od $5 \mu\text{m}$. Velja pol-empirična zveza $C = 1 + 1,26 \cdot \lambda_a/r$, kjer je λ_a povprečna prosta pot molekul v zraku. Pri temperaturi 20°C in zračnem tlaku 1 bar približno velja $k \approx 1,2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in $\lambda_a \approx 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ [2]. Predpostavka o Stokesovem upor in s tem enačba 1 dobro veljata za kapljice z radijem $0,5 \mu\text{m} \lesssim r \lesssim 10 \mu\text{m}$, vsaj približno pa še vse do $r < 50 \mu\text{m}$.

Slika 1 prikazuje ravnovesno hitrost padanja kapljic v odvisnosti od radija. Za kapljico z radijem $10 \mu\text{m}$ je ravnovesna hitrost padanja približno 1,2 cm/s, torej bi takšna kapljica z višine dveh metrov na tla padla v približno 2,7 minute (seveda spet ob predpostavki, da zrak popolnoma miruje). Ker pa okoliški zrak večinoma ni nasičeno vlažen, začne voda iz kapljice izhlapevati in se kapljica manjša. Zato se njeno padanje upočasni in potrebuje več časa, da pade na tla. Na primer, za kapljico z radijem $2 \mu\text{m}$ je v_{rav}

približno 0,5 mm/s, kar pomeni, da bi za padec globok dva metra potrebovala precej več časa kot kapljica z radijem $10\ \mu\text{m}$ (približno 1,1 ure). Spet drugače velja za še večjo kapljico z radijem $50\ \mu\text{m}$ – za njo je v_{rav} približno 30 cm/s, kar je dosti več kot za kapljico z radijem $10\ \mu\text{m}$. Takšna kapljica bi za dvometrski padec potrebovala le dobrih 6 sekund, kar je premalo, da bi se njena velikost v tem času bistveno zmanjšala, in zato takšna kapljica hitro pade na tla.



Slika 1. Ravnovesna hitrost padanja kapljic v mirujočem zraku (v_{rav}) izračunana po enačbi (1) pri temperaturi $20\ ^\circ\text{C}$ in zračnem tlaku 1 bar.

Vpliv topljenca in ukrivljenosti na nasičeni parni tlak ob kapljici

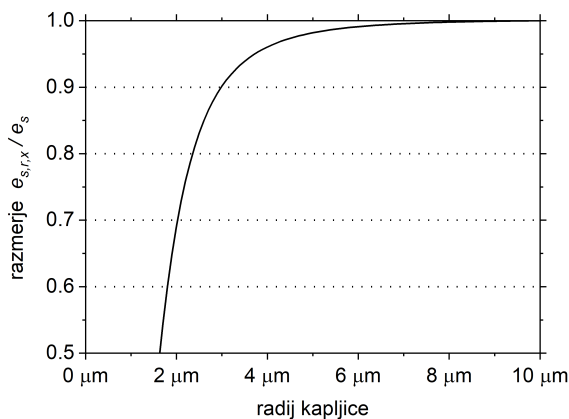
Hitrost izhlapevanja vode iz kapljice je močno odvisna od vrednosti nasičenega parnega tlaka tik nad površino kapljice. Razmerje med nasičenim parnim tlakom nad površino kapljice, v kateri je raztopljena določena masa x topljenca ($e_{s,r,x}$), ter nasičenim parnim tlakom nad ravno površino vode, v kateri ni topljenca (e_s), opisuje Köhlerjeva enačba ([5], enačba 6-27):

$$\ln\left(\frac{e_{s,r,x}}{e_s}\right) = \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3}. \quad (2)$$

Člen $\frac{A}{r}$ s konstanto A , ki je sorazmerna z vrednostjo površinske napetosti vode, opisuje vpliv ukrivljenosti površine kapljice – ta ima učinek, da nad površino kapljice poveča nasičeni parni tlak (čim manjša bo kapljica, tem bolj bo ukrivljena njena površina in tem večji bo člen A/r). Člen $\frac{B}{r^3}$ z $B(x)$, ki je sorazmeren masi topljenca, pa opisuje vpliv topljenca – ta ima učinek,

da nad površino kapljice zniža nasičeni parni tlak. Pri majhnih kapljicah, zaradi kubične odvisnosti od radija, prevlada učinek topljenca in posledično je nasičeni parni tlak nad majhno kapljico praviloma nižji od tistega nad ravno površino vode, v kateri ni topljenca.

Kapljica z radijem $10\ \mu\text{m}$ ima maso približno $4,2 \cdot 10^{-12}$ kg, kar (ob predpostavki, da 0,5 % mase kapljice tvori NaCl) pomeni, da bi bila masa raztopljenega NaCl približno $2,1 \cdot 10^{-14}$ kg. Ob predpostavki, da je temperatura $20\ ^\circ\text{C}$, in da je v vodi raztopljenega $2,1 \cdot 10^{-14}$ kg NaCl, dobimo za $A \approx 3,2 \cdot 10^{-8}$ m in za $B \approx 3,1 \cdot 10^{-18}$ m³ ([5], enačba 6-28).



Slika 2. Razmerje med nasičenim parnim tlakom $e_{s,r,x}$ nad ukrivljeno kapljico s topljenecem in nasičenim parnim tlakom e_s nad ravno čisto vodo v odvisnosti od radija kapljice. Vrednosti so izračunane iz enačbe (2) ob predpostavkah, da je temperatura $20\ ^\circ\text{C}$, in da je v vodi raztopljenega $2,1 \cdot 10^{-14}$ kg NaCl.

Odvisnost razmerja $e_{s,r,x}/e_s$ v odvisnosti od radija kapljice je prikazana na sliki 2. Praviloma velja, da je nad površino manjše kapljice nasičeni parni tlak manjši, in da vrednost z vse večjim radijem narašča proti vrednosti, ki je nad ravno vodno površino. Na primer, pri radiju $3\ \mu\text{m}$ je nasičeni parni tlak nad površino kapljice enak približno 90 % vrednosti nasičenega parnega tlaka nad ravno površino vode. To je predvsem posledica raztopljenega NaCl, ki nad površino kapljice zniža nasičeni parni tlak, ter tega, da je koncentracija enake količine NaCl v večji kapljici manjša. Ob izhlapevanju se seveda koncentracija NaCl v kapljici povečuje.

Dodatno komplikacijo predstavlja dejstvo, da koncentracija raztopljenega NaCl v vodi ne more biti poljubno velika. Koncentracija NaCl je praviloma nasičena, ko parni tlak nad kapljico doseže približno 75 odstotkov vrednosti nasičenega parnega tlaka nad ravno čisto vodo (tako imenovana točka delikvescence, [5]). Če je relativna vlažnost nižja od 75 %, se

kapljica sicer lahko povsem osuši (v tem primeru bo ostal le trdni delec NaCl) – vendar to ni nujno. Eksperimenti kažejo, da lahko tekoče kapljice, ki vsebujejo NaCl, obstajajo vse do vlažnosti 45 % (tako imenovana točka efflorescence, [10]).

Trdni delec NaCl, ki nastane, če se kapljica popolnoma osuši, nima nujno povsem sferične oblike, precej pa se spremeni tudi gostota delca (gostota kristalizirane NaCl je približno dvakratnik gostote tekoče vode). Zato se bomo pri nadaljnji obravnavi omejili na primere, kjer je relativna vlažnost vsaj 50 %, pri čemer bomo predpostavili, da se kapljice ne osušijo povsem.

Hitrost manjšanja kapljice ob izhlapevanju

Ob predpostavki, da okoliški zrak ni nasičeno vlažen, voda iz kapljice izhlapeva in kapljica se manjša. Pričakovali bi, da bo čez nekaj časa dosegla ravnovesno velikost glede na vlažnost v okolici (npr. za relativno vlažnost 90 % je pri $2,1 \cdot 10^{-14}$ kg NaCl to radij $3 \mu\text{m}$) – seveda, če kapljica ne bo že prej padla na tla.

Hitrost izhlapevanja kapljice je odvisna od hitrosti prenosa vodne pare stran od kapljice, ki skozi miren zrak poteka le z molekularno difuzijo. Hitrost spremembe mase sferične kapljice ob izhlapevanju oziroma kondenzaciji lahko izrazimo z izrazom (enačba 7-7 v [6])

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D_v (\rho_v - \rho_{vr}), \quad (3)$$

kjer je m masa kapljice, D_v konstanta difuzivnosti vodne pare skozi zrak (pri temperaturi ledišča in standardnem tlaku 1013 hPa je vrednost D_v približno $0,2 \text{ cm}^2/\text{s}$), ρ_v gostota vodne pare v okoliškem zraku, ρ_{vr} pa gostota vodne pare tik nad površino kapljice. Enačba 3 je omenjena tudi v članku, ki se ukvarja z zmrzovanjem podhlajenih kapljic, saj izhlapevanje pomembno vpliva tudi na odvod toplote v okolico [8].

Za izhlapevanje je pomembno, da je gostota vodne pare tik ob kapljici večja od tiste v okolici – v tem primeru je $dm/dt < 0$ in kapljica se manjša. Za gostoto vodne pare tik ob površini kapljice lahko privzamemo kar nasičeno vrednost – pri tem pa je treba upoštevati, da imata kapljica in zrak tik ob kapljici nekoliko nižjo temperaturo od okolice, saj se za izhlapevanje vode porablja toplota (pri kondenzaciji je ravno obratno).

Iz enačbe (3) je možno v nekaj korakih priti do izraza za hitrost spremembe velikosti kapljice

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\xi}{r} \left(S - \frac{e_{s,r,x}}{e_s} \right), \quad (4)$$

Ta izraz je enak enačbi 7.18 v [6], le da je v števcu namesto člena $1 + A/r - B/r^3$ zapisan kar bolj splošen izraz $e_{s,r,x}/e_s$, koeficienta F_k in F_d pa

sta združena v koeficient $\xi = 1/(F_k + F_d)$. S je relativna vlažnost zraka v okolici (razmerje med parnim tlakom v zraku in nasičenim parnim tlakom nad čisto ravno vodo). ξ je odvisna le od temperature in zračnega tlaka – vrednosti lahko preberemo iz slike 7.1 v [6]. Pri temperaturi 20 °C in zračnem tlaku 1 bar približno velja $\xi \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

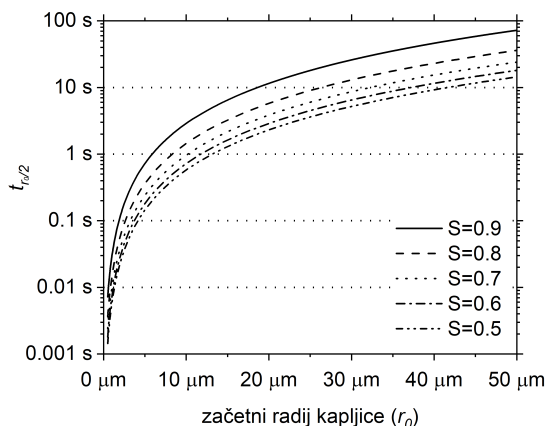
Enačbi (3) in (4) veljata le v primeru, da kapljica glede na zrak povsem miruje – če se kapljica glede na zrak premika je treba upoštevati tudi konvekcijski prenos vlage in toplote. Tega lahko poenostavljeno upoštevamo s tem, da desne strani enačb (3) in (4) pomnožimo s t. i. ventilacijskim faktorjem f_v . Velja $f_v \geq 1$, saj konvekcija vedno poveča prevajanje toplote oziroma prenos vodne pare. Izkaže se, da je za kapljice z radijem manjšim od 10 μm , učinek konvekcije zanemarljiv ($f_v \approx 1$). Za večje kapljice pa učinek ni več zanemarljiv – na primer, za kapljice z radijem 50 μm je $f_v \approx 1,2$ ([5], enačba 13-60). V naši obravnavi bomo učinek konvekcije zanemarili, saj se bomo omejili na velikosti kapljic do $r = 50 \mu\text{m}$. Sicer pri $r = 50 \mu\text{m}$ učinek konvekcije ni več popolnoma zanemarljiv, vendar pa ta poenostavitev ni zelo velika glede na nekatere druge (npr. o kemični sestavi kapljic in o povsem mirujočem zraku).

Najprej lahko poskušamo ugotoviti, koliko časa bi bilo potrebno, da bi se kapljica zmanjšala do polovičnega radija. Enačbo (4) lahko rešimo z integracijo od začetnega radija r_0 do polovičnega radija $r_0/2$ ter od časa 0 do $t_{r_0/2}$. Če predpostavimo, da je učinek topljenca in ukrivljenosti kapljice na nasičeni parni tlak majhen (kar v primeru na sliki 2 približno velja, dokler je $r > 5 \mu\text{m}$), lahko predpostavimo kar $e_{s,r,x}/e_s \approx 1$. V tem primeru se enačba 4 precej poenostavi in jo lahko rešimo s preprosto integracijo

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{\xi}{r}(S - 1), \\ \int_{r_0}^{r_0/2} r dr &= \xi(S - 1) \int_0^{t_{r_0/2}} dt, \\ t_{r_0/2} &= \frac{3r_0^2}{8\xi(1 - S)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Slika 3 prikazuje odvisnost $t_{r_0/2}$ od začetnega radija in vlažnosti. Za $S = 0,9$ in $r_0 = 10 \mu\text{m}$ dobimo $t_{r_0/2} = 3 \text{ s}$. Torej se velikost radija zelo hitro prepolovi – padec kapljice v tem času je majhen (približno 3 cm). Če bi bila relativna vlažnost 50 %, bi bil $t_{r_0/2}$ še petkrat krajši (0,6 s). Prav tako bi bil $t_{r_0/2}$ krajši za kapljice z manjšo začetno velikostjo, saj je v izrazu kvadratna odvisnost od r_0 .

Posledično lahko pričakujemo, da kapljica z začetnim radijem manjšim od 10 μm v nekaj sekundah doseže svojo ravnovesno velikost. Ker se prilagoditev velikosti hitrosti zgodi zelo hitro, lahko spust kapljice v tem času



Slika 3. Odvisnost časa $t_{r_0/2}$, ki je potreben, da se kapljica zmanjša na polovično velikost, od začetnega radija kapljice in relativne vlažnosti – enačba (5). Izračun je narejen ob predpostavkah, da je temperatura $20\text{ }^\circ\text{C}$, zračni tlak 1 bar ter da je v začetni fazi izhlapevanja učinek topljenca in ukrivljenosti na nasičen parni tlak majhen.

kar zanemarimo (v primerjavi z višino dveh metrov). Prav tako zanemarimo izhlapevanje v tem kratkem času in zato predpostavimo kar konstantno hitrost padanja.

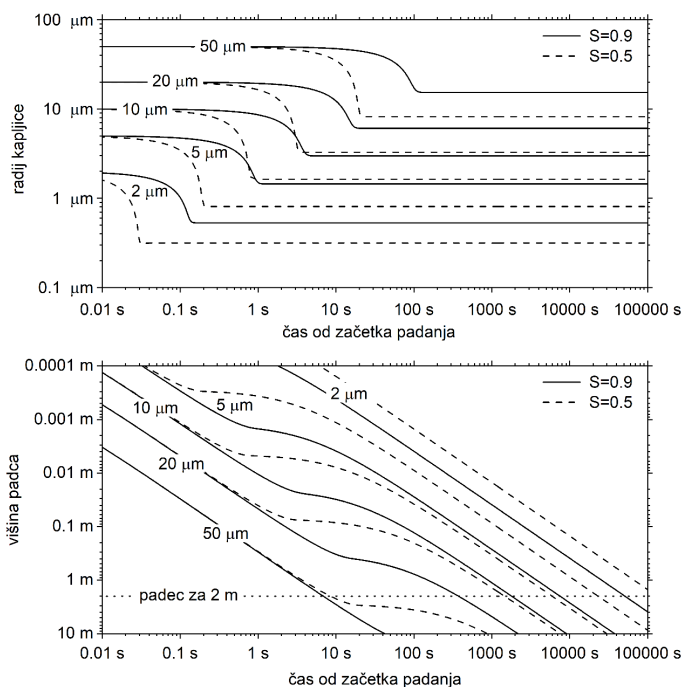
Na primer, kapljica z začetnim radijem $10\text{ }\mu\text{m}$ v nekaj sekundah izhlapi do ravnovesne velikosti z radijem $3\text{ }\mu\text{m}$ (velja za $S = 0,9$). Za tako veliko kapljico je ravnovesna hitrost padanja približno $1,1\text{ mm/s}$ – torej bi za dvometrski padeč na tla potrebovala približno 30 minut.

Drugače pa velja za večje kapljice. Na primer, za $r_0 = 50\text{ }\mu\text{m}$ in $S = 0,9$ dobimo $t_{r_0/2} = 72\text{ s}$. Ker je ravnovesna hitrost padanja kapljice z radijem $50\text{ }\mu\text{m}$ približno 30 cm/s , lahko upravičeno pričakujemo, da bo kapljica z višine 2 m v tem času že padla na tla. Hkrati tudi ne moremo več privzeti, da ves čas pada s konstantno hitrostjo, saj med padanjem hlapi, se manjša in zato pada vse počasneje, a pade na tla, preden doseže ravnovesno velikost.

Čas padca kapljice do tal

Za izračun padanja kapljice torej ne moremo vedno privzeti, da kapljica pada s konstantno hitrostjo. Za oceno padanja lahko v enačbo (4) vstavimo izraz za $e_{s,r,x}/e_s$ iz enačbe (2), ter jo kombiniramo z enačbo 1 za ravnovesno hitrost padanja, kjer v_{rav} zapišemo kot dz/dt ter izrazimo koeficient C . Tako

Padanje kapljic, izločenih iz dihal



Slika 4. Sprememba radija (zgoraj) in padeč kapljice (spodaj) v odvisnosti od časa pri relativni vlažnosti 50 % oziroma 90 %. Prikazani so izračuni za pet kapljic z različnimi začetnimi velikostmi, ki so označene na slikah ($r_0 = 2 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ in $50 \mu\text{m}$). Izračun je narejen z numerično integracijo enačb 6 ob predpostavkah, da zrak povsem miruje, da 0,5 % začetne mase kapljice predstavlja NaCl, preostalo pa je voda, da je temperatura $20 \text{ }^\circ\text{C}$, da je zračni tlak 1 bar, da kapljica ves čas pada z ravnovesno hitrostjo padanja, ter da se kapljica nikoli povsem ne osuši.

dobimo sistem dveh diferencialnih enačb:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\xi}{r} \left(S - \exp \left(\frac{A}{r} - \frac{B}{r^3} \right) \right), \quad (6)$$

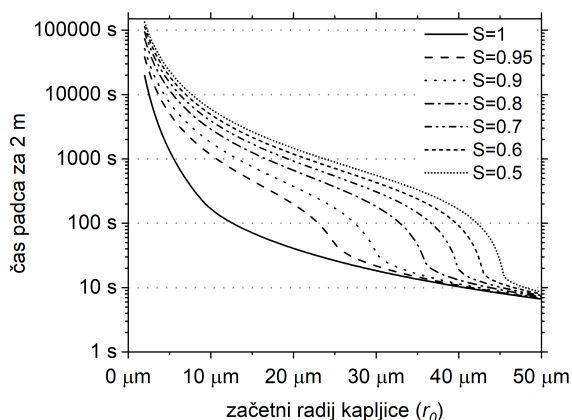
$$\frac{dz}{dt} = \left(1 + 1,26 \frac{\lambda_a}{r} \right) kr^2.$$

Ta sistem enačb lahko rešimo z numerično integracijo v času, ter tako dobimo spremembo radija in višine kapljice v času. Na sliki 4 so prikazani rezultati numerične integracije za pet velikosti kapljic in dve vrednosti relativne vlažnosti. Padanje vseh kapljic poteka podobno. V prvi fazi se velikost kapljic bistveno še ne zmanjša in padanje je enakomerno. Prva faza je pri manjših kapljicah kratka (npr. za $r_0 = 5 \mu\text{m}$ je med 0,1 s in 1 s, odvisno

od vlažnosti), pri večjih pa daljša (npr. za $r_0 = 50 \mu\text{m}$ je $\gtrsim 5 \text{ s}$). V drugi fazi, tam, kjer se na črtah na sliki 4 zgoraj vidi koleno, se kapljica začneja manjšati in padanje je vse počasnejše. V tretji fazi kapljica doseže ravnovesno velikost in padanje spet postane enakomerno. Do tretje faze prej pride pri manjših kapljicah kot pri velikih. Na padanje ima velik vpliv vlažnost okoliškega zraka. V bolj vlažnem zraku pride do druge in tretje faze pozneje kot v bolj suhem zraku – posledično kapljica pri večji vlažnosti pada hitreje. Tudi ravnovesna velikost kapljice bo v bolj vlažnem zraku večja, kar pomeni, da bo tudi hitrost padanja v tretji fazi večja.

Z vodoravno točkasto črto je označena tudi višina padca za 2 m – za kar privzamemo, da je začetna višina kapljice nad tlemi. Kapljica z $r_0 = 50 \mu\text{m}$ pade na tla v približno 10 sekundah, pri čemer je še vedno v prvi fazi, saj se njena velikost v tem času ne zmanjša bistveno. Kapljica z $r_0 = 10 \mu\text{m}$ pride do tretje faze v približno 1 do 5 sekundah. Pri takšni kapljici je tudi jasno viden velik vpliv vlažnosti na izhlapevanje in s tem na padanje – pri 90 % vlažnosti bo kapljica padla na tla v približno 30 minutah, pri 50 % pa v približno 100 minutah.

Slika 5 in tabela 1 bolj podrobno kažeta odvisnost časa, v katerem kapljica pade za 2 m, od začetne velikosti kapljice in vlažnosti. Za kapljice vseh velikosti velja, da čim bolj vlažen je zrak, tem manj bodo hlapele in zato tem prej padle na tla. Pri nekaterih kapljicah je čas padanja pri 50 % vlažnosti lahko tudi več kot 30-krat daljši kot čas pri 100 % vlažnosti (npr. za kapljico z $r_0 = 10 \mu\text{m}$ je pri 50 % vlažnosti ta čas enak 1,7 ure, pri 100 % vlažnosti pa 2,8 minute).



Slika 5. Čas, v katerem kapljica pade na tla z višine 2 m, v odvisnosti od začetne velikosti kapljice in relativne vlažnosti. Izračun je narejen pri enakih pogojih in predpostavkah kot pri sliki 4.

Padanje kapljic, izločenih iz dihal

S	začetni radij kapljice (r_0)				
	2 μm	5 μm	10 μm	20 μm	50 μm
1,00	5,5 h (0,88 μm)	22 min (3,5 μm)	2,8 min (9,9 μm)	41 s (20 μm)	6,7 s (50 μm)
0,95	11 h (0,62 μm)	1,4 h (1,8 μm)	19 min (3,7 μm)	3,3 min (7,6 μm)	6,8 s (49 μm)
0,90	14 h (0,53 μm)	2,1 h (1,4 μm)	30 min (3,0 μm)	6,2 min (6,1 μm)	6,9 s (48 μm)
0,80	20 h (0,44 μm)	3,2 h (1,2 μm)	48 min (2,4 μm)	11 min (4,8 μm)	7,2 s (46 μm)
0,70	26 h (0,38 μm)	4,3 h (1,0 μm)	1,1 h (2,0 μm)	15 min (4,1 μm)	7,5 s (44 μm)
0,60	31 h (0,34 μm)	5,3 h (0,89 μm)	1,4 h (1,8 μm)	20 min (3,6 μm)	8,0 s (41 μm)
0,50	37 h (0,31 μm)	6,4 h (0,81 μm)	1,7 h (1,6 μm)	24 min (3,3 μm)	8,5 s (37 μm)

Tabela 1. Enako kot slika 5, le da so prikazane numerične vrednosti za nekatere izbrane začetne velikosti kapljic. Vrednosti v oklepajih predstavljajo radij kapljice ob času padca na tla.

Večje kapljice večinoma hitro padejo na tla. Na primer: kapljice z radijem večjim od 40 μm padejo na tla v največ treh minutah (sicer ob predpostavki, da relativna vlažnost ni manjša od 50 %). Čas padanja manjših kapljic je lahko zelo dolg – tudi več ur – še posebej, če je zrak zelo suh (a vseeno ne toliko suh, da bi povsem izhlapele). Na primer, kapljice z radijem 5 μm pri 100 % vlažnosti potrebujejo do tal 22 minut, pri vlažnosti 50 % pa kar 6,4 ure.

Zaključki

Čas, v katerem kapljica pade na tla, je odvisen predvsem od njene začetne velikosti, ter temperature in vlažnosti okoliškega zraka. Večje kapljice izpadejo v nekaj sekundah, medtem ko lahko manjše kapljice ostanejo v zraku tudi več ur – seveda ob tem delno izhlapijo. Velik vpliv na padanje ima vlažnost. Če je zrak bolj suh, majhne kapljice bolj izhlapijo in dosežejo manjšo ravnovesno velikost in zato padajo počasneje. Če pa bi bil zrak zelo suh, pa bi se lahko tudi povsem osušile in bi ostal le delec NaCl. Vpliv vlažnosti je verjetno tudi razlog, zakaj so v notranjih prostorih kapljice prisotne v zraku dlje časa pozimi kot poleti. Pozimi notranje prostore običajno ogrevamo in s tem znižamo relativno vlažnost, poleti pa prostorov ne ogrevamo in je relativna vlažnost v notranjih prostorih višja in bolj podobna tisti zunaj.

Na padanje – posredno preko nasičenega tlaka vodne pare – pomembno vpliva tudi kemična sestava kapljice. Topljenec v kapljici vpliva na nasičeni parni tlak nad površino kapljice, ter posledično na hitrost izhlapevanja in padanja kapljice. Pri naši obravnavi smo zelo poenostavljeno predpostavili, da 0,5 % začetne mase kapljice predstavlja NaCl, preostalo pa je voda. V resnici je kemična sestava kapljic, izločenih iz dihal precej bolj zapletena. Predpostavili smo tudi, da kapljice padajo skozi zrak, ki povsem miruje. V resnici tudi v notranjih prostorih zrak skoraj nikoli povsem ne miruje. Razlike v temperaturi sten oziroma različnih površin povzročijo konvektivske tokove – na primer, topli radiatorji, površine, ki so skozi okno obsijane

s sončnim sevanjem, štedilnik med kuhanjem in ne nazadnje tudi ljudje, ki segrevamo okoliški zrak s telesom in lahko povzročimo konvekcijsko dviganje s hitrostjo več kot 0,2 m/s [7]. Premikanje zraka ima lahko tudi mehanske vzroke – na primer, ventilatorji, prepih, premikanje in dihanje ljudi, odpiranje in zapiranje vrat. Ravnovesna hitrost padanja majhnih kapljic je pogosto manjša kot hitrost premikanja zraka in posledično zrak nosi te kapljice s seboj naokrog, tudi navzgor. Tako lahko kapljice ostanejo v zraku dlje časa, kot pa če bi ta povsem miroval, zračni tokovi pa jih lahko prenašajo tudi med različnimi prostori skozi morebitne odprtine, kot so vrata ali pa skozi centralno povezan prezračevalni sistem.

Zaradi poenostavitev o kemični sestavi kapljic, predpostavki o mirovanju zraka, in privzetku, da se kapljice nikoli povsem ne osušijo (tudi ko je vlažnost manjša od 75 %), naši rezultati niso povsem kvantitativno uporabni. Vseeno pa lahko služijo za kvalitativno razlago in razumevanje procesov, ki vplivajo na padanje potencialno patogenih kapljic.

LITERATURA

- [1] L. Bourouiba Turbulent, *Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19*, JAMA, Published online March 26, 2020. doi:10.1001/jama.2020.4756.
- [2] S. Jennings, *The mean free path in air*, Journal of Aerosol Science, **19** (1988), 2, 159–166.
- [3] L. K. McCorry, *Essentials of Human Physiology for Pharmacy*, CRC Press, 2005.
- [4] L. J. G. R. Morawska, G. R. Johnson, Z. D. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, S. Corbett, C. Yu Hang Chao, Y. Li in D. Katoshevski, *Size Distribution and Sites of Origin of Droplets Expelled from the Human Respiratory Tract During Expiratory Activities*, Journal of Aerosol Science **40** (2009), 3, 256–69.
- [5] H. R. Pruppacher in D. J. Klett, *Microphysics of clouds and precipitation*, 2nd Ed., Springer, xx+954 pp, 2010.
- [6] R. R. Rogers in M. K. Yau, *A Short Course in Cloud Physics*, 3rd Ed., Butterworth-Heinemann, an Imprint of Elsevier, xiv+290 pp, 1989.
- [7] M. Salmanzadeh, H. Zahedi, G. Ahmadi, D. R. Marr in M. Glauser, *Computational modeling of effects of thermal plume adjacent to the body on the indoor airflow and particle transport*, Journal of Aerosol Science, **53** (2012), 29–39.
- [8] G. Skok in J. Rakovec, *Podhlajene vodne kapljice v ozračju*, Obzornik mat. fiz., **67** (2019), 5, 171–183.
- [9] J. W. Tang, et al., *Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises*, Journal of Hospital Infection, **64** (2006), 2, 100–114.
- [10] M. E. Wise, T. A. Semeniuk, R. Bruintjes, S. T. Martin, L. M. Russell in P. R. Buseck, *Hygroscopic behavior of NaCl-bearing natural aerosol particles using environmental transmission electron microscopy*, J. Geophys. Res., **112** (2007), D10224, doi:10.1029/2006JD007678.