

NASTANEK TURBULENCE PRI ČRPANJU VAKUUMSKE POSODE

Tudi v vakuumski tehniki moramo biti v nekaterih primerih pozorni na pojav turbulence zraka v vakuumski posodi. Le-ta se pojavi na začetku črpanja vakuumske posode z atmosferskega tlaka, če so črpalne hitrosti velike. Zračni vrtinci dvignejo prah, ki se nato usede na notranje površine v vakuumski posodi, kot so npr. podlage ali izviri za napajanje oz. naprševanje. Ta pojav je nesprejemljiv zlasti v napravah za napajanje ali naprševanje tankih plasti za optiko ali mikroelektroniko. Pri napajanju kovinskega prahu iz lončka pa se lahko zgodi, da ga turbulentni tok zraka dobesedno odnese v črpalko. Pri tem obstaja še dodatna nevarnost, da lahko drobni kovinski delci resno poškodujejo turbomolekularno črpalko. Zato moramo v takih primerih pojav turbulence preprečiti.

Kdaj in zakaj se pojavi turbulenca med črpanjem vakuumske posode? Pretok plina skozi cev je lahko viskozen, molekularen ali pa kombinacija obojega. Pri črpanju vakuumskega sistema z atmosferskega tlaka do visokega vakuuma gre plin skozi vsa tri stanja. Mejo med laminarnim, vmesnim in molekularnim tokom določa t. i. Knudsenovo število, ki je razmerje med premerom cevi d in srednjo prosto potjo molekul λ . Če prosto pot izrazimo s tlakom plina, dobimo za zrak pri sobni temperaturi naslednji izraz za Knudsenovo število:

$$K = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,066}{p \cdot d} \quad (1)$$

Če je to razmerje manjše od 0,01, potem je tok viskozen, če pa je večje od 0,5, je tok molekularen. Tok zraka pri sobni temperaturi je viskozen, če je produkt premera cevi in tlaka plina ($p \cdot d$) več kot 50 Pa cm. O molekularnem toku govorimo, če je ta produkt manjši od $5 \cdot 10^{-1}$ Pa cm.

Pri nižjih tlakih, kjer je srednja prosta pot večja od premera cevi ($\lambda > d$), pride do molekularnega gibanja plinov (slika 1). V teh razmerah ni medsebojnih trkov molekul, pogosti pa so trki molekul s steno vakuumske posode. Pri vsakem trku se lahko molekula odbije naprej ali nazaj. Končen rezultat trkov je, da molekula zapusti cev na strani z nižjim tlakom ali pa se vrne na stran z višjim tlakom, od koder je prišla.

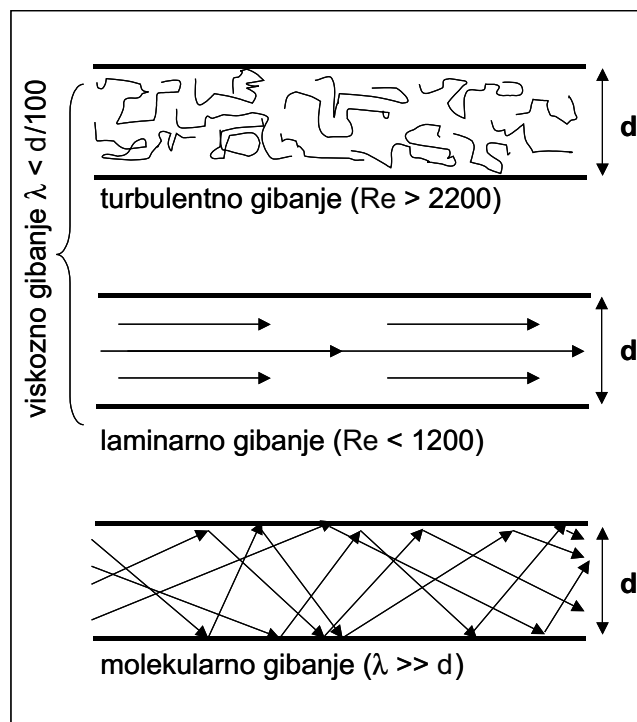
Pri višjih tlakih, kjer je srednja prosta pot molekul λ veliko manjša od premera cevi d ($\lambda < 0,015 d$), je pomembna viskoznost plina. Gibanje plina v teh razmerah (govorimo o **viskoznem** toku plina) je lahko

laminarno (posamezne plasti zraka se ne mešajo, tokovnice plina so vzporedne steni cevi, po kateri tečejo) ali turbulentno (pojavi se vrtinci) (slika 1). Kdaj in zakaj se razvije turbulentno gibanje? Pojav turbulence je povezan z viskoznostjo plinov. Za lažje razumevanje pojava si pomagajmo z analogijo s tekočinami, kjer nam je pojav bolj domač.

Tabela 1: Viskoznost izbranih plinov pri sobni temperaturi

Plin	Molekulska masa	Viskoznost 10^{-6} Pa s
H ₂	2	8,8
He	4	19,6
H ₂ O (pare)	18	9,7
N ₂	28	17,6
Zrak	29	18,2
O ₂	32	20,4
Ar	40	22,3
CO ₂	44	14,7

Če primerjamo vodo, med ali smolo ugotovimo, da se pri pretakanju zelo različno vedejo. Medtem ko teče voda z lahkoto in se pri večjih hitrostih pretakanja giblje turbulentno, pa teče med počasi in skoraj vedno laminarno. Pravimo, da ima večjo viskoznost kot



Slika 1: Shematski prikaz turbulentnega, laminarnega in molekularnega gibanja plinov

voda. Viskoznost si lahko predstavljamo kot nekakšno trenje med posameznimi plastmi tekočine, zato se sosednje tekočinske plasti gibljejo relativno druga glede na drugo. Viskoznost je posledica medmolekularskih sil, s katerimi molekule iz ene plasti učinkujejo na molekule iz sosednje. Viskoznost je tudi posledica preskakovanja molekul iz hitrejši plasti v počasnejšo in nasprotno. Oboje skupaj povzroča, da hitrejša plast "vleče" počasnejšo s seboj z viskozno silo F , obenem pa počasnejša plast zadržuje hitrejšo z enako veliko silo. To silo določa t. i. Stokesov zakon ($F = \eta \cdot S \cdot (dv/dt)$), ki ima linearni in kvadratni člen. Pri majhnih hitrostih gibanja tekočine prevladuje linearni člen, pri velikih (pojav turbulence) pa kvadratni. To pomeni, da se turbulentni tok pojavlja pri tekočinah z manjšo viskoznostjo. Ni pa viskoznost tekočine edini parameter, ki določa pojav turbulentnega toka. S poizkusi lahko ugotovimo, da če pretakamo vodo po tanki cevi, teče brez vrtincev. Po drugi strani pa lahko spravimo celo med v turbulentno gibanje, če ga mešamo v veliki posodi. To pomeni, da je turbulentno gibanje odvisno tudi od hitrosti gibanja in velikosti posode, v kateri se tekočina giblje. Tudi vsaka ovira, ki jo postavimo v gibajočo se tekočino, zmoti njeno gibanje.

Podobno je pri plinih, ki se pretakajo po ceveh. Ker je njihova viskoznost veliko manjša kot pri tekočinah, opazimo turbulentno gibanje že pri veliko manjših hitrostih plina. Pri manjših hitrostih plina je njegovo

gibanje laminarno, medtem ko je pretok plina stacionaren na vsakem mestu. Tokovnice so vzporedne osi cevi, hitrost plina pa je največja v njeni osi. S tako vrsto pretoka plinov se v vakuumski tehniki najpogosteje srečujemo. V nekem vmesnem področju hitrosti se lahko pojavi tako laminarno kot turbulentno gibanje plina. Način gibanja je odvisen tudi od hrapavosti notranje površine cevi in od pogojev na vhodni strani cevi.

Če hitrost plina preseže določeno vrednost, postane gibanje turbulentno. Takšno gibanje zraka ni stacionarno, saj se hitrost plina na vsakem mestu spreminja zaradi menjajočih se vrtincev. Na smer tokovnic močno vpliva kakršnakoli ovira na njegovi poti. Zaradi vrtincev je tlak plina v cevi zelo neenakomeren. Na mestih, kjer je podtlak, se pojavi kavitacija. Gibanje plina je izrazito nepravilno. Turbulenten pretok plina se v vakuumski tehniki ne pojavlja pogosto. Najpogosteje se s tem problemom srečujemo v območju grobega vakuuma, kadar imamo opraviti z zelo močnimi črpalkami.

Parameter, ki določa mejo med turbulentnim in laminarnim pretokom, je Reynoldsovo število Re . Reynoldsovo število je po definiciji:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\eta} \quad (2)$$

kjer je ρ gostota plina, v njegova hitrost in η viskoznost, medtem ko je D_h hidravlični parameter cevi. Hidravlični parameter D_h je definiran kot razmerje $4A/B$, kjer je A presek cevi in B obseg. Pri okrogli cevi je to razmerje kar enako njenemu premeru d . Iz praktičnih razlogov lahko Reynoldsovo število izrazimo kot funkcijo pretoka plina (oz. črpalne hitrosti). V vakuumski tehniki je pretok plinov definiran kot:

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} \quad (3)$$

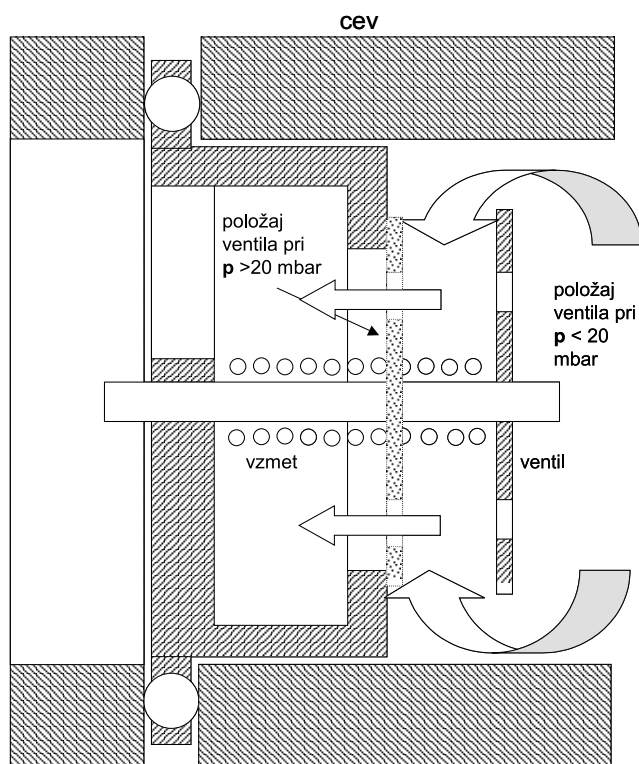
kjer smo upoštevali, da je (dV/dt) črpalna hitrost S (izražamo jo v Pa L/s). Ker je $p = n m = \frac{Mp}{RT}$, dobi izraz za Reynoldsovo število naslednjo obliko:

$$Re = \frac{Mp}{RT} \frac{4Q}{\pi d^2 p \mu} \quad (4)$$

Pri sobni temperaturi ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) je viskoznost zraka $1,79 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, plinska konstanta $8312 \text{ L Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in $M = 28,98 \text{ kg}$. Iz enačbe (4) potem sledi:

$$Q_{\text{zrak}} = 9,06 \cdot 10^{-2} Re \cdot d \quad (5)$$

Ugotovljeno je bilo, da se pojavi prehod iz laminarnega gibanja zraka v turbulentno pri vrednosti Reynoldsovega števila okrog 2000. Če torej privza-



Slika 2: Shema ventila, ki se avtomatsko zapre na začetku črpanja vakuumske posode, ko je pretok plinov velik

memo to merilo, potem lahko iz zgornje enačbe izračunamo za cilindrično cev pri sobni temperaturi kritično črpalno hitrost, pri kateri pride do omenjenega prehoda:

$$Q > 24 \cdot d \quad (6)$$

Pri tem je premer cevi podan v milimetrih, pretok plina Q pa v mbar L/s. Če je npr. premer cevi 25 mm, se bo turbulentno gibanje plina pojavilo, kadar bo hitrost črpanja preseгла 600 mbar L/s. Če bomo torej uporabili priključno cev s takšnim premerom in črpalko, ki bo imela črpalno hitrost 10 L/s, potem bomo imeli v cevi turbulenten tok vse do tlaka 30 mbar.

Kako preprečimo pojav turbulence pri črpanju vakuumske posode? Najenostavnejša rešitev je, da med črpalko in vakuumsko posodo vgradimo ventil, ki se samodejno zapre, ko je na začetku črpanja pretok zraka velik. Praktična izvedba takšnega ventila je

prikazana na sliki 2. Plošča ventila ima več manjših luknjic. Ventil je nameščen na os, ki je vpeta na ohišje priključne cevi. Na osi je vzmet, ki odrine ploščo ventila od ležišča s tesnilom. Ko pričnemo črpati vakuumsko posodo, je pretok zraka zaradi velike tlačne razlike med vhomom v rotacijsko črpalko in vakuumsko posodo velik, zato tlak zraka potisne ploščo ventila na ležišče s tesnilom. Črpalna hitrost se bistveno zmanjša, saj se vakuumska posoda črpa samo skozi manjše luknjice v plošči ventila. Ko se tlaka na obeh straneh izenačita, vzmet odrine ploščo ventila in črpalna hitrost se poveča. To se zgodi pri tlaku, ki je manjši od 30 mbar.

dr. Peter Panjan
 Institut "Jožef Stefan"
 Jamova 39
 1000 Ljubljana