

TEORIJA ČRPANJA POSOD OZ. SISTEMOV IN OPREDELITEV VELIKOSTI PUŠČANJA

Vincenc Nemanič, Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

Theory of pumping of vessels or vacuum systems and leakage rate measuring

ABSTRACT

High vacuum and ultra high vacuum technology depends crucially on tightness of vessels and components. The most sensitive methods developed to control and measure leakage were so called vacuum methods, where leakage is measured in evacuated vessel. Nowadays, high demands for tightness, comparable to those in high vacuum technique, are met in several other fields. In the paper, basic quantities and relations, necessary to describe pump-down process are described. Physical units for measuring leakage rates, which are closely related to difficulty range of particular application, are also introduced.

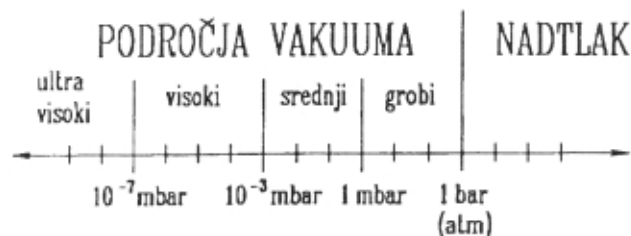
POVZETEK

Priprava visokega vakuumu je od vsega začetka zahtevala izredno dobro tesnost vseh elementov, zato so bile razvite tudi izredno občutljive metode preizkušanja in merjenja netesnosti. Danes srečamo enako visoke zahteve za tesnost še v mnogih drugih vejah tehnike, zato se vakuumske metode ob primernih prilagoditvah uporabljajo tudi tam. V prispevku so podane osnovne definicije količin in zveze, ki jih potrebujemo za opis črpanja in spremljajočih pojavov. Vpeljane so enote za merjenje netesnosti, kar je osnova za razvrstitev na območja zahtevnosti.

1 Območja tlaka - definicija vakuumu

Ohlapna definicija: Vakuum je vsako razredčenje plina pod 1 bar; boljši izraz je podtlak. Skala se razteza med 0 in 1; pogosto srečamo skalo, ki seže celo v negativno smer, med 0 (=atmosferski tlak) in -1 bar (vakuum).

Precizna definicija: Vakuum je razredčenje plina do poljubne stopnje, ko lahko plinu pripišemo in izmerimo spremenjene toplotne, električne in kinetične lastnosti. Primerna je logaritemska skala, ki označuje velikost razredčenja plina od začetnega tlaka pri 1 bar in na kateri ne moremo nikoli doseči vrednosti 0.



Slika 1: Skala z nazivi območij tlaka

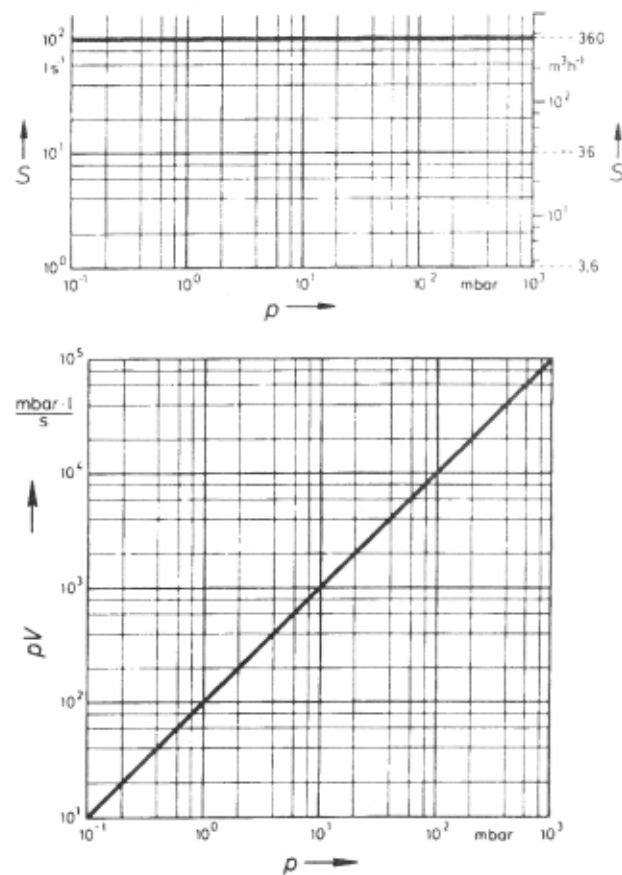
2 Črpalke

Za evakuiranje posode s prostornino V do želenega tlaka se uporabljajo primerne vakuumske črpalke. Razdelimo jih glede na: fizikalni princip delovanja, območje tlakov, črpalno hitrost itd. Njihove osnovne lastnosti so podane v splošnih učbenikih vakuumske

tehnike, /1,2/. Vse današnje črpalke delujejo žal le v razmeroma ozkem območju tlakov. Za visoki vakuum potrebujemo zato še najmanj dve črpalki, za UVV pa lahko tri, od tega vsaj dve vezane zaporedno. Zmogljivost črpalke podajamo vedno z vsaj dvema podatoma:

- črpalno hitrostjo S v enotah (l/s) pri specifičnem tlaku
- z območjem tlaka, kjer je dani S dejansko enak nazivnemu.

Idealna črpalka ima črpalno hitrost S neodvisno od tlaka, slika 2 (zgoraj). Pri danem vstopnem tlaku p preteči na enoto časa količino plina, ki je enaka p.S, slika 2 (spodaj).

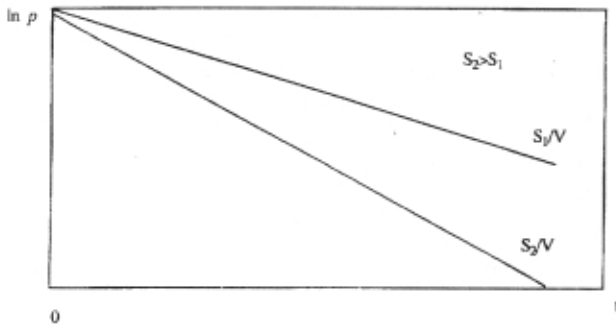


Slika 2: Črpalna hitrost idealne črpalke S (zgoraj) in pretok $Q=p.S$ (spodaj) v odvisnosti od tlaka.

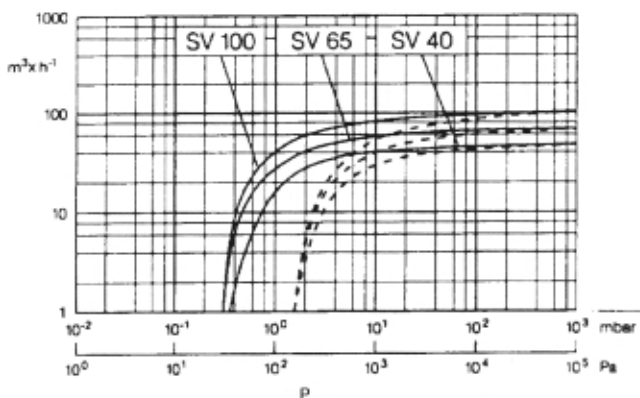
Naj bo v posodi s prostornino V (l) sprva tlak enak p_0 (bar). Splošna enačba za opis pojemanja tlaka v vakuumski posodi, ki jo črpamo s črpalno hitrostjo S, se glasi:

$$p(t) = p_0 \cdot e^{-\left(\frac{S}{V}\right)t} = p_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_v}} \quad (1)$$

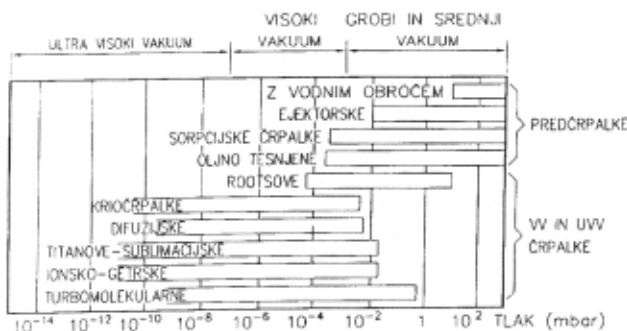
$\tau_v = S/V$ - je konstanta sistema oz. čas, ko pade začetni tlak p_0 (ob času $t=0$) na $0,37 p_0$ ($=1/e$) vrednosti. Če enačbo (1) logaritmujemo in relativni tlak merimo na y osi, ta pada linearno s časom. Strmina nagiba je ravno τ_v . Potek padanja tlaka v posodi, ki bi jo črpali z dvema različno zmogljivima črpalkama, je na sliki 3.



Slika 3: Padanje tlaka v posodi s časom. Posoda s prostornino V črpamo s konstantno črpalno hitrostjo S. Čim večja je S, tem strmejši je nagib.



Slika 4: Črpalna hitrost dvostopenjske rotacijske črpalke v odvisnosti od tlaka za različne zmogljive črpalke. Nazivna hitrost S je podana v m^3/h pri vhodnem atmosferskem tlaku. Končni tlak je pri vseh enak. Črtano je označena hitrost pri dodajanju zraka, (črpalka deluje z "gas balastom").



Slika 5: Pregled vakuumskih črpalk glede na območje tlakov, v katerem delujejo s sprejemljivo veliko črpalno hitrostjo.

Za vsako črpalno je treba upoštevati dejansko črpalno hitrost v odvisnosti od tlaka; poznati moramo torej karakteristiko $S(p)$. Količina pretočenega plina je v območjih, ko je črpalna hitrost dosti manjša od nazivne, bistveno manjša. Zgled za črpalno hitrost v odvisnosti od tlaka je za rotacijsko črpalno prikazan na sliki 4, za ostale tipe črpalk pa so območja tlakov s sprejemljivo veliko črpalno hitrostjo podana na sliki 5 /3/.

3 Črpanje - dinamični in statični sistemi

Vakuumski sistem sestavlja:

- posoda s povezavami
- črpalna
- merilnik (lahko pa opazujemo kak neposredni efekt, ki ga povzroča tlak).

Dinamični ali odprt vakuumski sistem je ves čas priključen na črpalno; trenutni tlak je dinamično ravnovesje med dotokom plinov v posodo in hitrostjo črpanja.

Statični sistem je pri nekem tlaku ločen od črpalke. Hitrost naraščanja tlaka je odvisna od dotoka plinov iz okolice.

Enačba (1) in slika 3 veljata žal v ozkem območju tlaka, spremembe pri realnem črpanju nastanejo, ker:

- se črpalna hitrost črpalke s tlakom spreminja; doseže lahko najnižji oz. končni tlak črpalke p_{ck} . Njena hitrost S je tedaj 0.
- je črpalna hitrost, s katero dejansko črpamo vakuumsko posodo, odvisna od prevodnosti povezave C [l/s] med njo in črpalno, kar izrazimo z efektivno črpalno hitrostjo S_{ef} .

$$S_{ef} = \frac{S \cdot C}{S + C} \quad (2)$$

Pri dobro konstruiranem sistemu sta S in C izbrani razumno, količini sta primerljivi, $C \approx S$. Primerna prevodnost cevi je tista, ki črpalne hitrosti ne znižuje pretirano.

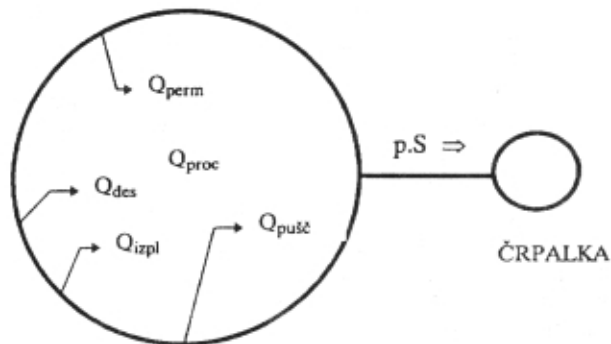
4 Postavitev zahtev za velikost puščanja v dinamičnih sistemih

Črpalni sistem je bil najverjetneje zgrajen za ustvarjanje takega tlaka p_k , pri katerem neki proces že lahko izvajamo. V realnem vakuumskem sistemu je preostanek plina, ki je bil v posodi pred črpanjem, dokaj nepomemben. Problematičen postane dotok plina kot posledica:

- razplinjevanja površine sten posode, Q_{des}
- permeacije nekaterih plinov skozi stene, Q_{perm}
- izplinjevanja samega materiala stene Q_{izpl}
- puščanja skozi lokalizirana mesta, $Q_{pušč}$
- sproščanje plinov med samim procesom Q_{proc}

Vse prispevke Q_i izrazimo v enotah (mbar l/s). Bilanco ponazorimo shematsko, slika 6. Opis pojemanja tlaka v posodi z enačbo (1) je kljub upoštevanju upornosti povezave (2) še vedno preoptimističen. Ob približevanju končnemu tlaku črpalke le-ta črpa z vse manjšo

hitrostjo. Če želimo izvajati neki postopek pri tlaku, ki leži v istem območju, kot je končni tlak črpalke, naletimo na težave. Črpalka tedaj črpa z zmanjšano hitrostjo, kar je bilo prikazano na sliki 4.



Slika 6: Vakuumska posoda s prispevki, ki vplivajo na trenutni in končni tlak.

Po daljšem času pričakujemo, da bo končni tlak v sistemu, namenjenem izvajanju nekega procesa brez neželenih prispevkov, enak:

$$p_k = Q_{proc} / S_{ef} + p_{\check{c}.k.} \quad (3)$$

Ko upoštevamo dejanski dotok plinov, ki upočasnjujejo črpanje:

$$Q = Q_{proc} + Q_{des} + Q_{perm} + Q_{izpl} + Q_{pušč}$$

končni tlak določajo ravno ti:

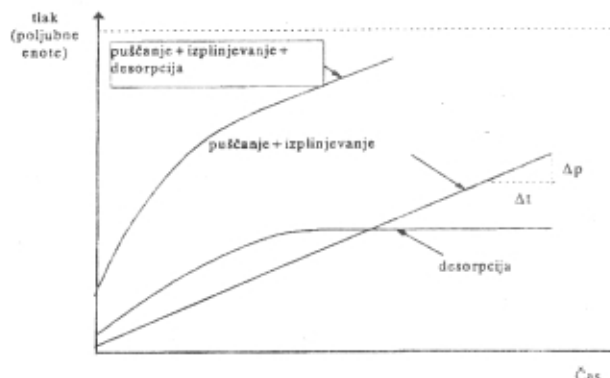
$$p_k = Q / S_{ef} + p_{\check{c}.k.} \quad (4)$$

Končni tlak je tako višji, sestava plinov pa je lahko za naš proces dosti bolj neugodna. Dobro zasnovan sistem ima druge prispevke, razen Q_{proc} , majhne že v zasnovi, kar dosežemo z izbiro primernih materialov pri konstrukciji sistema. Cilj vzdrževanja naprave je preprečiti puščanje in povečevanje Q_{des} zaradi slabega oz. napačnega delovanja črpalk itd. K zmanjševanju Q_{des} pripomore tudi skrb za čistočo v vakuum vnesenih predmetov, kar imenujemo tudi vakuumska higiena.

5 Postavitev zahtev za velikost puščanja v statičnih sistemih

Ob prenehanju črpanja lahko pričakujemo, da zaradi istih prispevkov, ki omejujejo končni tlak med črpanjem, tlak narašča tudi po tem, ko smo črpanje prekinili. Najbolj neugoden prispevek, ki se mu lahko izognemo, je puščanje. Neugoden je zato, ker je ravnovesje doseženo šele pri atmosferskem tlaku. Oglejmo si okvirno naraščanje tlaka v zaprti posodi, ki ga povzročajo zgoraj naštetih prispevki, slika 6. V zgodnji fazi predhodno slabo izplinjena vakuumskega sistema lahko pričakujemo sprva strmo naraščanje tlaka, na katerega vplivajo tako puščanje (in per-

meacija), kot izplinjevanje in desorpcija. V tesnem sistemu se desorpcija izenači z adsorpcijo in tlak doseže pri dani temperaturi ravnovesno vrednost. V netesnem sistemu je prirastek tlaka na enoto časa ($\Delta p / \Delta t$) konstanten, kar lahko pogosto uporabimo pri enostavnih metodah ugotavljanja jakosti puščanja. Ker sestave plinov v posodi največkrat ne poznamo, lahko iz samega naklona napačno sklepamo na puščanje tudi, kadar imamo opravka le s počasno desorpcijo oz. izplinjevanjem. Čas za potrditev linearnega narastka tlaka zaradi puščanja je lahko zelo dolg, zato je uporaba občutljivejših metod ugotavljanja netesnosti skoraj vedno umestna. Na sliki 7 je prikazano samo vedenje posameznih prispevkov. Dopustna vrednost za končni tlak za predviden čas uporabnosti posode ali naprave je prikazano črtkano.



Slika 7: Naraščanje tlaka v posodi po prenehanju črpanja.

6 Razvrstitev velikosti puščanja

V dinamičnih sistemih je treba odpraviti večja netesna mesta, kar omogoča ponovljivo izvajanje procesa, za katerega je bil sistem zasnovan. Zaradi današnjih zmogljivih črpalk majhna puščanja pogosto niti niso problematična. Izjema je področje ultra visokega vakuuma (UVV).

V statičnih sistemih pa je meja dopustnega puščanja zaradi dolgega časa vedno zelo nizka, lahko je celo pod detekcijsko mejo danes znanih metod.

V splošnem velja, da je dopustna jakost puščanja $Q_{pušč}$ ($=V \cdot \Delta p / \Delta t$) tem nižja:

- čim manjši je volumen posode oz. sistema
- čim nižji tlak moramo vzdrževati v predvidenem času
- čim daljši je čas uporabe

Zgledi:

1. V posodah za shranjevanje medijev lahko pomeni puščanje potencialno nevarnost, če uhaja strupen ali vnetljiv plin oz. tekočina. Vrednost izgubljenega medija pa je lahko zanemarljiva. Drugi prispevki, ki povzročajo naraščanje tlaka v sistemu, največkrat niti niso pomembni. Upoštevati jih moramo torej le med vakuumskim preizkušanjem. V hladilnih sistemih pa je izguba hladilnega medija lahko usodna, ker se z zniževanjem tlaka niža izkoristek naprave. Zaradi dolge dobe trajanja naprav je dopustno puščanje izredno nizko, primerljivo

s tistim, ki ga dopuščamo pri dinamično črpanih vakuumskih sistemih.

2. V posodah, ki predstavljajo ohišje (npr. zaščito vezja, mehanizma naprave ipd.) je zahteva za čas brezhibnega delovanja nekaj let. Če je v posodi inertni plin (npr. suh zrak, dušik ali žlahtni plin), se le-ta izgubi, naprava pa se lahko pokvari. V termopanskih oknih je razmeroma majhno puščanje z leti vzrok za rosenje. Suh zrak oz. inertni plin se zamenja z zrakom, ki vsebuje vlago, okvara je predvsem estetske narave. Vzrok za izmenjavo plina je občasna razlika temperatur in nihanje atmosferskega tlaka zaradi vremenskih sprememb. Delni razlog za rosenje je lahko permeacija vode skozi sicer tesno tesnilno maso. Podoben vpliv netesnosti srečamo v relejih, kjer lahko vlaga okvari kontaktne lastnosti površin itd.

3. Usodnejše je puščanje pri posodah oz. napravah, v katerih je za pravilno delovanje potreben srednji ali visoki vakuum v vsej dobi uporabnosti, ki je pogosto nad deset let. Take posode so termovke, v katerih tlak ne sme narasti čez 10^{-4} mbar. V sodobni TV slikovni elektroniki je tlak že v UVV področju. Dopuščene netesnosti pa z nobeno od obstoječih metod ne znamo izmeriti. Pomaga nam narava, ker se izkaže, da je večina netesnih mest bodisi v območju, ki ga lahko izmerimo, ali pa jih ni. Iz naštetih zgledov je razvidno, da je določitev in merjenje jakosti puščanja izredno pomembno. Omogoča napoved časa brezhibnega delovanja naprave, predvidimo lahko izgubo medija, ugotovimo, ali je strošek za popravilo smiseln itd.

7 Enote, s katerimi podajamo velikost puščanja

Velikost puščanja je lahko podana v poljubnih enotah, ki merijo izgubo ali vdor tekočine ali plina. Celo standardi dopuščajo enote, ki niso enake tem, ki se uporabljajo v vakuumski praksi. Vakuumске enote so se uveljavile zato in predvsem tam, kjer druge metode odpovedo, so nezanesljive, nenatančne itd.

Enota, ki izraža količino plina, ki doteka v vakuumski sistem pri tlačni razliki 1 bar, je:

$$\begin{aligned} & 1 \text{ mbar.l(PNP)/s} = \\ & = 1 \text{ bar.cm}^3 \text{ (PNP)/s} = \\ & = 10^{-1} \text{ Pa.m}^3 \text{ (PNP)/s.} \end{aligned}$$

(PNP pomeni "pri normalnih pogojih", $p=1$ bar, $T=273,15\text{K} = 0^\circ\text{C}$)

Iz splošne plinske enačbe velja, da 1 mol ($6,023 \cdot 10^{23} = \text{Avogadrovo število molekul oz. atomov}$) plina pri normalnih pogojih zaseda prostornino 22,4 l.

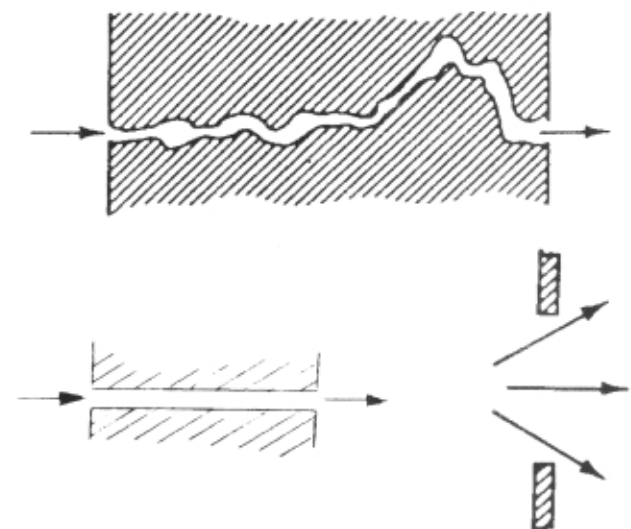
1 mbar.l plina je torej $2,68 \cdot 10^{19}$ molekul plina (ali atomov enoatomnega plina) pri normalnih pogojih.

V različnih vejah tehnike so vpeljane metode ugotavljanja netesnosti, ki slonijo na hitrosti sproščanja mehurčkov izbrane kombinacije plina in medija, izhajanja radioizotopov itd.

Fizična predstava za velikost odprtine stene, skozi katero se pri neki tlačni razliki pretoči ustrezno število plinskih molekul, največkrat odpove. Dobro je definirana le za pravilne odprtine med dvema tlakoma, ki

ležita v molekularnem območju. Mesta puščanja so v praksi nepravilnih oblik, slika 8.

Jakost oz. velikost puščanja, izmerjena v mbar l/s s helijevim detektorjem netesnosti kot najnatančnejšim merilnikom, je zato pogosto le vodilo uporabniku pri vpeljavi te metode. Ta mu omogoča hitro kontrolo, ki je v mnogih vejah proizvodnje zaradi zagotavljanja kvalitete danes že 100%. Pretvorbo v drugačne enote, ki izhajajo iz drugačne metode, **moramo opraviti s preizkušanjem**. Jakost puščanja ni nujno linearna funkcija razlike tlaka. Zaradi sile tlaka na stene posode je jakost puščanja lahko različna, gledé na to, v kateri smeri nastopi tlačna razlika. Podobno nezanesljivo je napovedati "vedenje" odprtine pri povišani ali znižani temperaturi. Iz podatka za jakost puščanja helija pri 1 bar razlike je težko napovedati, koliko zraka bo dotekalo v sistem. Še težje je, kljub znani viskoznosti, izračunati količino drugačnega medija. Gibanje plina vzdolž nepravilne kapilare je sprva turbulentno, nato viskozno in preide lahko v molekularno itd. Je pa razred velikosti puščanja dobra orientacija za to, ali sodi puščanje v okvir dopustnega ali ne.



Slika 8: Odprtine, ki predstavljajo puščanje, so nepravilnih oblik. Zvezo med geometrijo in jakostjo puščanja znamo danes izraziti le za pravilne geometrijske oblike v molekularnem območju pretoka plina.

V praksi, ki omogoča široko uporabnost občutljivih vakuumskih metod, velja: **Če je med meritvijo z vakuumsko metodo meja za netesnost postavljena pri dovolj visoki vrednosti, je izmerjena nizka vrednost zagotovilo za zadovoljivo tesnost. Prednost občutljivejše metode je hitrejša izvedba meritve. Posoda je dovolj tesna, če zadovoljuje namenu ves predviden čas uporabe.**

8 Permeacija in puščanje

Nelokaliziran vdor plina v vakuumsko posodo imenujemo permeacija. Je posledica raztapljanja plina in njegovega prodiranja skozi material z difuzijo. Poganja ga tlačni gradient oz. gradient koncentracije v steni.

Odvisen je tako od sestave stene kot od plina, ki difundira. Za permeacijo določenega plina skozi izbran material obstajajo tabele, ki podajajo permeacijsko konstanto, s katero lahko ocenimo njen pomen za konkretni primer /1,4/. Jakost permeacije v evakuirano posodo je za izbrani plin konstantna in je pri neselektivnem merjenju tlaka ne moremo ločiti od puščanja.

Zgledi: Permeacija zraka skozi večino materialov je pri sobni temperaturi nemerljivo majhna. Znano je, da skozi večino polimerov zlahka prodirata voda in helij, skozi paladij in nekatere kovine permeira vodik, skozi nekatera stekla helij ipd. V statičnih sistemih je treba biti še posebno pozoren, ker je zakasnitveni čas do stacionarnega stanja lahko razmeroma dolg in tega med meritvijo še ne opazimo. V praksi je treba biti pozoren tudi na tesnila, ki jih uporabljamo pri določevanju netesnosti s helijevim detektorjem. Permeacija helija se lahko javlja kot nesprijemljivo veliko puščanje, ki lahko preglasi šibko izražen signal prave netesnosti.

9 Sklep

Vakuumske metode ugotavljanja netesnosti so se zaradi izredne občutljivosti uveljavile povsod, kjer je zmanjšanje puščanja nujno za pravilno dolgotrajno

delovanje sistemov in naprav. Uporaba teh metod pa zahteva poznavanje spremljajočih pojavov, saj lahko pridemo v nasprotnem primeru do napačnih ugotovitev. Puščanje lahko določa končni tlak v posodi v dinamičnih sistemih. V evakuiranih statičnih sistemih se puščanje odraža z linearnim prirastkom tlaka na enoto časa. Zaradi predvidoma dolge dobe delovanja je dopustno puščanje vedno zelo majhno. Pri umeritvi velikosti puščanja, merjenega z vakuumskimi metodami, je za primerjavo z drugimi metodami (oz. za napoved delovanja naprave v drugačnih razmerah), potrebno preizkušanje. Določitev mest puščanja in opredelitev njihove okvirne velikosti je postalo v mnogih vejah tehnike ključnega pomena za zagotavljanje kakovosti izdelkov in naprav.

Literatura

- /1/ M. Wutz in sodel: Theory and Practice of Vacuum Technology, Friedr. Vieweg&Sohn, 1989
- /2/ Vakuumska tehnika, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 1983
- /3/ Vakuumska tehnika za Srednješolske predavatelje, Urednik Bojan Jenko, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 1993
- /4/ A. Roth: Vacuum Technology, North-Holland, 1982