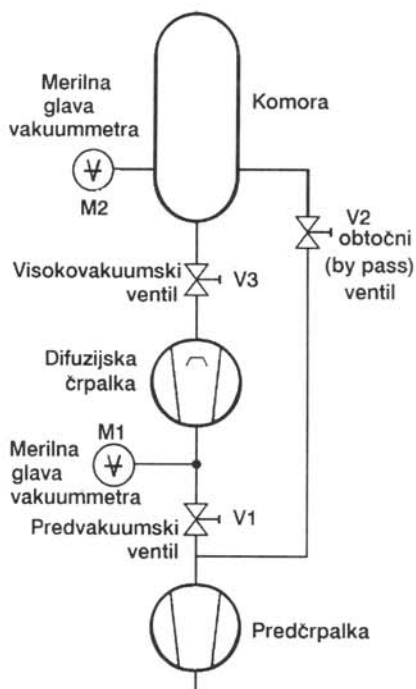


NASVETI

PRAVILNO UPRAVLJANJE VISOKOVAKUUMSKEGA ČRPALNEGA SISTEMA

Najbolj pogosto so visokovakuumski črpalni sistemi sestavljeni iz difuzijskih črpalk in njim odgovarjajočih rotacijskih predčrpalk. Osnovna shema takega sistema je prikazana na sl.1.



Slika 1. Osnovna shema visokovakuumskega črpalnega sistema

Kljub temu da proizvajalci v navodilih natančno predpišejo način upravljanja visokovakuumskega sistema, tj. od trenutka, ko začnemo črpati komoro, od atmosferskega tlaka pa tja do 10^{-4} oz. 10^{-5} mbar, kjer navadno poteka tehnološki proces (npr. naparevanje), pa je v praksi navadno precej drugače. Samo pri popolnoma avtomatiziranem delovanju se lahko izognemo napakam, pa še pri tem se kaj rado zgodi, da nestrokovnjak poljubno prestavlja nastavitvene točke avtomatike in tako izniči pravilnost delovanja sistema. Posledice so v glavnem naslednje:

- s povratnim tokom oljnih par iz difuzijske črpalke onesnažijo celotno komoro in vse kar je v njej
- oksidacija in razgradnja ter izguba olja so zelo intenzivni.

Škoda, ki je pri tem nastala, je zelo velika, saj moramo komoro, difuzijsko črpalko, ventile, merilnike ter povezovalne vakuumske vode temeljito očistiti, kar lahko traja več dni, saj moramo celotni sistem popolnoma

razstaviti in ga po čiščenju ponovno (uspešno) sestaviti. Škoda, ki smo jo povzročili na izdelkih, ki so pravzaprav postali izmet, je v primerjavi z vsem drugim malenkostna.

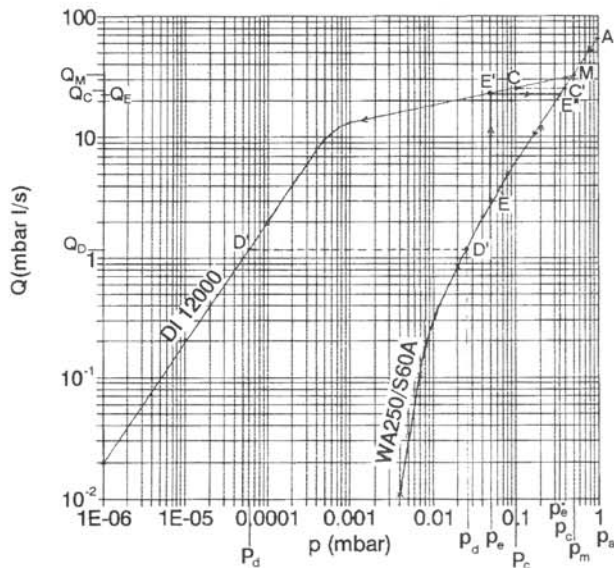
Kdaj ga lahko najbolj "polomimo" pri upravljanju visokovakuumskega (VV) sistema?

Najprej si na kratko osvežimo spomin, kakšen je pravi način vklapljanja oz. odpiranja posameznih ventilov (sl. 1). Predpostavimo, da je sistem vključen in da vse črpalke delujejo normalno. Ko komoro, v kateri so naši vzorci ali predmeti, pripravljeni za vakuumsko tehnološko obdelavo, vakuumsko tesno zapremo, jo začnemo evakuirati tako, da odpremo obtočni (by pass) ventil V2 (sl.1). Rotacijska črpalka mora izčrpati komoro vsaj do 0,1 mbar, kar ugotovimo z merilnikom M2. Nato ventil V2 zapremo in odpremo predvakuumski ventil V1 ter takoj nato še visokovakuumski ventil V3. Začnemo torej črpati z difuzijsko črpalko in z njo zaporedno vezano rotacijsko predčrpalko. Pri tem se ustvari tok plinov (npr. zraka) in par (npr. vodna para), ki potuje iz komore skozi ventil V3, difuzijsko črpalko, predvakuumski ventil V1, rotacijsko predčrpalko ter skozi njen izpuh na prosto (atm). Tok plinov in par, na kratko rečeno zraka, je **neprekinjen** in je v začetku črpanja največji, ob koncu, ko dosežemo končni tlak (npr. 10^{-6} mbar) pa najmanjši. Najbolj preprosto lahko tudi rečemo, da je molekule, ki jih je "zgrabila" difuzijska črpalka, "sprejela" predčrpalka in jih "izvrgla" na prosto. Difuzijska črpalka in njena predčrpalka morata delovati popolnoma **usklajeno**, če želimo doseči v najkrajšem možnem času želeni vakuum. V vsaki proizvodnji pa je, kot vemo, čas zlato (= denar). Da bi čim bolj zmanjšali proizvodni čas, moramo zato natančno vedeti, kdaj lahko med evakuiranjem komore zapremo obtočni ventil V2 in odpremo predvakuumskega V1 in visokovakuumskega V3. Poznati moramo **črpalni karakteristiki** (črpalno hitrost v l/s v odvisnosti od tlaka) obeh črpalk, tj. difuzijske in njene rotacijske predčrpalke.

Najbolj nazorno bomo lahko pojasnili delovanje in medsebojno vplivanje obeh črpalk, če bomo predstavili njuni **pretočni karakteristiki** (pretok v mbar.l/s v odvisnosti od tlaka).

Za zgled smo vzeli pretočni karakteristiki difuzijske črpalke DI 12000 in njej odgovarjajoče predčrpalke, ki pa je zaporedna kombinacija dveh črpalk, in sicer Rootsove WA 250 in enostopenjske rotacijske črpalke S 60 A (proizvajalec Leybold).

Iz diagrama na sl. 2 je razvidno, da se obe pretočni karakteristiki (dif. in kombinirane predčrpalke) štikata v točki M, tj. pri nekem pretoku Q_M in tlaku p_m . Črpalke so namreč izbrane tako, da se konča pretočna karakteristika difuzijske črpalke ravno na pretočni karakteristiki predčrpalke. Tlak p_m imenujemo tudi **mejni predtlak** difuzijske črpalke. Pri višjem tlaku dif. črpalke



Slika 2. Odvisnost pretoka Q od tlaka p za oljno difuzijsko črpalko DI 12000 in predčrpalno enoto: Roots WA 250 in enostopenjsko rotacijsko črpalko S 60A (Leybold). Zgled **usklajene** kombinacije črpalk. Preklop ventilov v raznih točkah pretočne karakteristike.

ne "dela" več. Ves pretok zraka, ki gre skozi njo, je odvisen le od predčrpalke in prevodnosti dovodov. Ko nastopi za difuzijsko črpalko mejni tlak, oljne pare, ki nastanejo v vrelniku (bojlerju) in izhajajo iz šob v njen črpalni (delovni) prostor, ne dosežejo vodno hlajenih sten, da bi se kondenzirale in kot kondenzat odtekle nazaj v vrelnik. En del par pobegne v smeri komore in se tam kondenzira (**onesnaženje**), druga pa počrpa predčrpalna (**izguba olja**). Oksidacija oz. razgradnja olja v vrelniku in na vročem sistemu šob (temp. okoli 200°C) je pospešena (**uničevanje olja**).

Ko se predtlak difuzijske črpalke približuje mejnemu, se začne nestabilno črpanje (**kritični predtlak**), vendar o tem pojavu tu ne bomo posebej govorili.

Ko začnemo črpati komoro po obtočnem vodu od atmosferskega tlaka, s tem da odpremo obtočni ventil V2 (V1 in V3 sta zaprta), se pretok zraka Q in z njim tlak p počasi manjšata. Šele ko pridemo do točke M na pretočni karakteristiki, kjer je tlak p_m , je dana teoretična možnost, da začnemo črpati z difuzijsko črpalko, ki ji je zdaj predčrpalna(e) vezana zaporedno. Zapremo obtočni ventil V2 in odpremo V1 in V3. Iz točke M pridemo po karakteristiki dif. črpalke npr. v točko C, kjer je pretok Q_C in je tlak na vходу difuzijske črpalke p_C , na vходу predčrpalke pa p_c (ki je nižji od p_m). Po daljšem času črpanja pridemo npr. v točko D, ki ji odgovarjajo pretok Q_D in tlak p_d ter predtlak p_d . Črpanje se nadaljuje, dokler ne dosežemo tlaka, pri katerem lahko začnemo naš vakuumski tehnološki postopek (npr. naparovanje).

Pretočni karakteristiki obeh črpalk (dif. in prečrpalke) sta lepo **skladni**, kot je razvidno s slike 2. Njuno delovanje je usklajeno, kar pomeni, da sta črpalki (ali kombinacija črpalk) pravilno izbrani, kar pa pri vseh

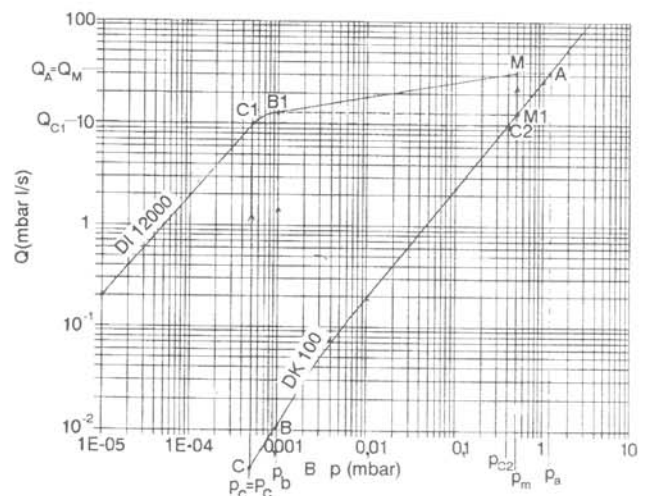
praktičnih primerih visokovakuumskih sistemov ni pričakovati. Lahko se zgodi (kar je precej pogost pojav), da je kapaciteta (črpalna sposobnost) predčrpalke **premajhna** (mejna točka M dif. črpalke ne leži na pretočni karakteristiki predčrpalke, ampak levo od nje, tj. pri nižjih tlakih) ali pa **prevelika** (M leži desno, pri višjih tlakih), kar je v praksi tudi mogoče, vendar bolj poredko.

Vrnimo se spet k naši sliki 2 in predpostavimo, da bi zaprli obtočni ventil V2 (ker se nam tako strašno mudi in bi radi skrajšali čas črpanja) ter odprli V1 in V3 v točki A, tj. pri tlaku p_a , ki je višji od mejnega predtlaka p_m . Difuzijska črpalka bi v hipu prenehala delovati kot črpalka in bi se vedla kot navadna posoda, v kateri se "kuha" olje. Škodne posledice smo že opisali. Vsi proizvajalci VV sistemov priporočajo (ali z avtomatiko naravnajo), da preklop ventilov opravimo pri nižjem tlaku od mejnega, npr. pri 0,1 mbar. (Opomba. Mejni predtlak pri oljnih difuzijskih črpalkah je okoli 0,5 mbar.).

Na sliki 2 je prikazano, kaj se dogodi, če ta preklop opravimo npr. v točki E pri tlaku v komori p_e . V istem hipu difuzijska črpalka "potegne", pretok skozi njo se poveča na Q_E , ki ga na krivulji odčitamo pri točki E'. Enak pretok mora nenadoma sprejeti tudi predčrpalna (E"), zato njen vstopni tlak naraste na p_e , kar lahko spremljamo z vakuummetrom M1.

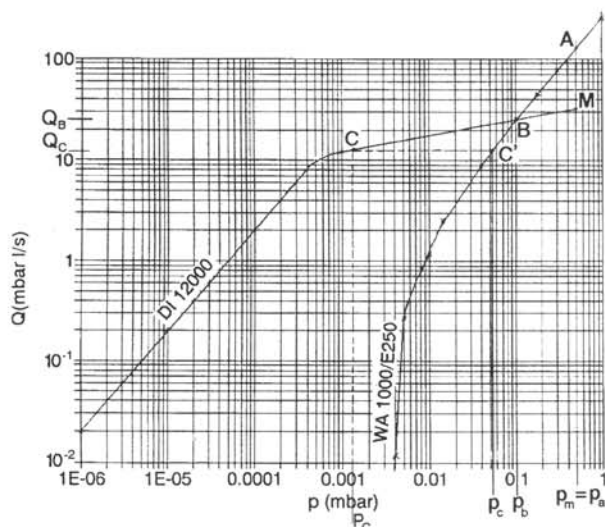
Črpanje se nadaljuje z difuzijsko črpalko, visoki vakuum pa merimo z merilnikom M2 (Na sliki 2 "potuje" točka E' po difuzijski krivulji navzdol, prav tako tudi točka E" na predčrpalni krivulji proti E in nato navzdol). Ta način delovanja oz. upravljanja VV sistema je normalen in ga proizvajalec predpisuje v navodilih za uporabo.

Oglejmo si sedaj primer, ko se pretočna karakteristika difuzijske črpalke ne konča na pretočni krivulji predčrpalke, recimo, bolj levo (slika 3), kar pomeni, da je predčrpalna **prešibka** oz. neusklajena z difuzijsko črpalko. Ponovimo postopek črpanja komore po obtočnem vodu. Ko dosežemo s predčrpalno točko A na krivulji, kjer sta pretoka Q pri obeh črpalkah sicer enaka



Slika 3. Odvisnost pretoka Q od tlaka p za **neusklajeno** kombinacijo črpalk: DI 12000 in dvostopenjsko rotacijsko predčrpalno DK 100 (Leybold)

(točkama M in A odgovarja enak pretok $Q_A=Q_M$), vendar je tlak p_a večji od mejnega predtlaka p_m . Difuzijska črpalka ne bo črpala. O škodi, ki pri tem nastane, pa smo že dovolj govorili. Če opravimo preklon ventilov v točki M1, ki je pri mejnem predtlaku p_m , difuzijska črpalka sicer hitro "potegne" (pretok v točki M je Q_M), tlak na njenem izstopu, ki je istočasno vstopni tlak predčrpalke, pa naraste iz p_m na p_a (točka A). Črpanje z difuzijsko črpalko se poruši (prekine). Predčrpalka spet izčrpa komoro preko difuzijske črpalke in obeh ventilov V1 in V3 od tlaka p_a do p_m , kjer se spet vse skupaj ponovi. Ostanemo torej v začaranem trikotniku A-M1-M. Difuzijska črpalka nikakor ne more "potegniti". Posledice že dobro poznamo. Če torej želimo priti iz tega začaranega trikotnika, moramo po obtočnem vodu izčrpati komoro s predčrpalko vsaj do točke B ali nižje, tj. do tlaka p_b , ki je mnogo nižji od p_m , da lahko opravimo preklon (pretok naraste na Q_{B1} ; točka B1 na krivulji difuzijske črpalke in M1 na krivulji predčrpalke), kajti tlak na ustju predčrpalke naraste na p_m , tj. na mejni predtlak, kar pa seveda ni priporočljivo, saj delo (črpanje) v mejnih razmerah ni obvladljivo. Če hočemo popolnoma obvladati črpanje v takih razmerah, je bolje, da izvršimo preklon npr. v točki C pri tlaku p_c , kjer difuzijska črpalka "potegne" s Q_{C1} in rotacijska prevzame ta pretok ($Q_{C1}=Q_{C2}$), pri tem pa pade predtlak na vrednost p_{c2} (točka C2), ki pa je manjši od mejnega predtlaka p_m . Difuzijski črpalki torej omogočimo normalno delovanje. Na visokovakuumske strani bo začel tlak P_c padati (točka C1 "potuje" po krivulji navzdol). Tudi predtlak bo skladno padal od p_{c2} proti p_b in p_c in še bolj navzdol. Čas, ki smo ga porabili v tem primeru, ko je kapaciteta predčrpalke neusklajena z zahtevami difuzijske črpalke, je mnogo daljši (črpanje s predčrpalko od atm do p_b), kot je pri usklajenih črpalkah. Če pa je čas zlato, potem smo si s premajhno črpalko (manjši investicijski stroški) naredili slabo uslugo, saj je proizvodnja izdelkov mnogokrat manjša, kot bi bila pri usklajenih črpalkah.



Slika 4. Odvisnost pretoka Q od tlaka p za "predimenzionirano" predčrpalko. Kombinacija dif. črpalke DI 12000 in predčrpalne enote: Roots WA 1000 in enostopenjske rotacijske črpalke E 250 (Leybold)

Pa si oglejmo še primer, ko je predčrpalka "predimenzionirana", torej večja, kot bi bilo potrebno. Narišimo si pretočni krivulji za vsako črpalko posebej. S slike 4 lahko ugotovimo, da leži mejna točka difuzijske črpalke M na desni strani pretočne krivulje predčrpalke, torej pri višjih tlakih. Ponovimo postopek črpanja komore. Spet najprej črpamo po obtočnem vodu in pridemo do točke A oz. tlaka p_a , ki je enak mejnemu predtlaku dif. črpalke p_m . Če bi tisti hip preklonili črpanje (zaprl obtočni ventil V2 in odprli V1 in V3), bi za kratek čas prišli sicer v mejne razmere difuzijske črpalke, vendar bi se takoj nato "izvlekli" iz tega položaja, saj točka A "potuje" proti presečišču B, kjer sta oba pretoka enaka, torej usklajena. Kaj se dogaja v tem času v difuzijski črpalki? Ker pretok skozi njo določa predčrpalka in ker je črpanje difuzijske črpalke slabotno, se tudi oljne pare, ki izhajajo iz šob, pomešajo med tok zraka in skupaj zapustijo difuzijsko črpalko (izguba olja). Zato nima smisla preklapljati črpanja med tlakoma p_a in p_b , dokler ni dosežena točka B oz. pretok Q_B . Od tu dalje pa velja enako kot pri prvem zgledu, ko je bilo delovanje obeh črpalk usklajeno. Npr. v točki C je pretok Q_C , tlak na VV strani (merilnik M2) P_c , na predvakuumske strani pa p_c (merilnik M1).

S "predimenzionirano" predčrpalko, ki pomeni velik strošek, smo sicer dosegli krajši čas začetnega črpanja komore, vendar nismo mogli izkoristiti difuzijske črpalke v celoti, saj je del karakteristike (med M in B) neuporaben in nam povzroča le izgubo oljnih par, torej olja, iz difuzijske črpalke, če izvršimo preklon pri p_m (točka A oz. M).

Bralce želimo ob koncu še opozoriti, da v nobenem primeru ne smejo dopustiti, da bi predtlak difuzijske črpalke (ko sta ventila V1 in V3 zaprta in komoro obtočno črpajo preko V2) narasel nad p_m , ki je za oljne difuzijske črpalke nekje okoli 0,5 mbar. Če je obtočno črpanje predolgo, moramo dograditi predvakuumsko posodo (Vakuumist, 27, 1992, 2, 23-24). Vedno pa moramo meriti predtlak z M1, da bi se pravočasno izognili povečanju tlaka na p_m (npr. z občasnim zaprtjem V2 in odprtjem V1), kar ima, kot smo že ugotovili, škodljive posledice za difuzijsko črpalko in za celotni VV sistem.

Kako lahko **praktično** ugotovimo, ne da bi poznali črpalne karakteristike, ali upravljamo VV sistem pravilno ali ne?

Pri preklapljanju ventilov opazujemo oba merilnika M1 in M2 (ali vsaj M2, ki je na visokovakuumske strani, tj. na komori). Ko odpremo VV ventil V3, mora začeti tlak v komori (merilnik M2) počasi in nato vse hitreje padati, predtlak (M1) pa lahko v začetku celo rahlo naraste, vendar ne do p_m , nato pa mora počasi padati. Tak VV sistem je usklajen in bo dolgo uspešno deloval.

Dr. Jože Gasperič
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39, Ljubljana