

VAKUUMSKA MOLEKULARNA DESTILACIJA (3. del)

Bojan Povh¹, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

Vacuum molecular distillation (Part III)

ABSTRACT

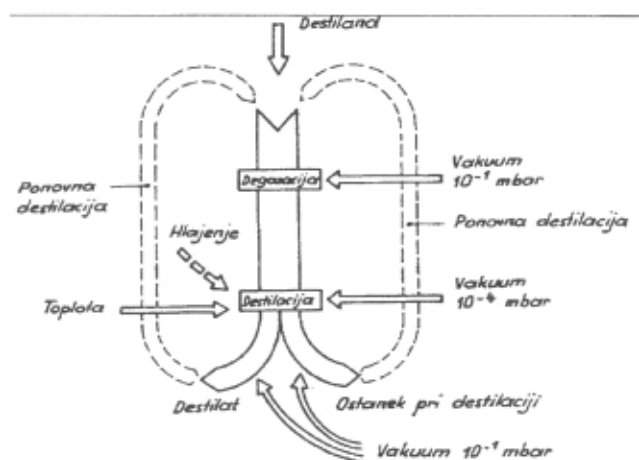
In the last part of this paper problems in designing a small centrifugal molecular still were studied in detail. Various solutions of basic principles and implements for some important functions are indicated. The attention is given to the design of three most important systems of still apparatus: the transfer of fast rotation in vacuum, the heating of rotor and the liquid transport in molecular still.

POVZETEK

Zadnji del razprave o vakuumski molekularni destilaciji posvečamo tehnološko-konstruktivnim problemom pri gradnji naprav za vakuumsko destilacijo. Nakazujemo izvedbene principe in detajle za posamezne pomembne funkcije v sistemu. Pozornost namenjamo konstrukciji treh ključnih sklopov: prenos hitrega vrtenja v vakuum, kontrolirano ogrevanje rotorja in transport tekočin v destilacijski napravi.

1 Uvod

Preden preidemo k podrobni obdelavi problematike, si uvodoma pogledimo zahteve za sam proces in ob tem naštejmo glavne sklope za centrifugalno molekularno destilacijo. Na sl. 1 je prikazan shematični potek procesa, ki mu je podvržen destiland, pri tem pa potrebe po vakuumu, ogrevanju in hlajenju.



Slika 1: Shematični potek procesa molekularne destilacije

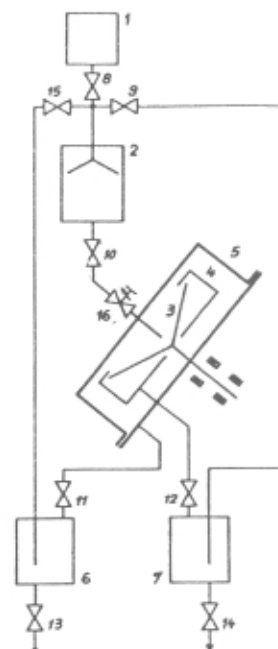
Destiland se mora praviloma pred samo destilacijo razpliniti ali znebiti preveč hlapnih komponent, sicer bi pri destilaciji vzkipel, škropil po napravi, kvaril vakuum in separacijo. To lahko omogočimo v posebnem degazatorju, ki ga črpamo le s predčrpalko. Pri manjših napravah, ki ne delujejo zvezno, je možno destiland razpliniti kar v destilacijski komori, tako da ga pošljemo enkrat ali večkrat skozi jo še brez ogrevanja in ob črpanju mimo difuzijske črpalke.

¹ Mag. Bojan Povh je upokojeni sodelavec Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko iz Ljubljane, ki je pred leti v okviru raziskovalne naloge obdelal to področje. Besedilo je za objavo priredil urednik Vakuumista.

Pri destilaciji sami pa je potrebna višja stopnja vakuumu: tlak nekondenziranih plinov naj bo 10^{-4} mbar, da ne ovirajo molekul pare na poti od izparilne h kondenzacijski površini, medtem ko je lahko tlak par bistveno višji. Določa ga kompromis med zadostno hitrostjo procesa in med dopustno temperaturo za destiland. Na površino, s katere destiland delno izhlapeva, je treba dovajati toploto, kondenzacijsko površino za destilat pa je treba hladiti.

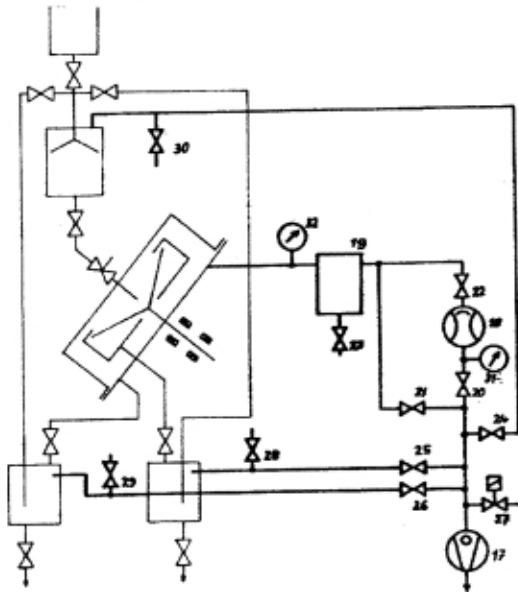
Shema osrednjega dela naprave za centrifugalno molekularno destilacijo, brez potrebne pomožne opreme, je prikazana na sl. 2. Tu so le deli, po katerih krožijo destiland ali njegovi produkti. Srce naprave je ogrevani rotor, na katerega skozi dozirni ventil počasi doteka destiland, se tam razporedi v tanko plast, delno odpari, ostanek pa zaradi centrifugalne sile odleti z roba rotorja v lovilni žleb, od koder odteče v zbiralno posodo. Izparili del se kondenzira na (hlajeni) površini komore, od koder odteče v posodo za destilat. Da je to odtekanje iz vakuumu brez posebnih tekočinskih črpalk sploh mogoče, moramo tudi v zbiralnih posodah poprej vzpostaviti določen vakuum, kar je nakazano že na sl. 1.

Da dosežemo želeno čistoto destilata ali ostanka, moramo proces ponavljati, tako da ustrezni medij ponovno pošljemo skozi destilacijsko napravo. To možnost prikazujeta obe shemi. Uresničimo jo brez črpalk tako, da ustrezni zbiralnik ločimo od vakuumске komore, vanj vpustimo atmosfero in ta potisne vsebino po cevi navzgor v razplinjevalnik.



Slika 2: Shema osrednjega dela naprave za centrifugalno molekularno destilacijo (1 - rezervoar tekočine, ki jo želimo destilirati, 2 - degazator, 3 - ogrevani rotor, 4 - zbiralni žleb ostanka pri destilaciji, 5 - kondenzacijski balon, 6 - zbiralna posoda za destilat, 7 - zbiralna posoda za ostanek pri destilaciji, 8-15 - krogelne pipe, 16 - dozirni ventil)

Za funkcioniranje naprave potrebujemo vakuumski sistem (slika 3) – črpalke, ventile, merilnike tlaka. Za zaščito črpalke pred lahko hlapnimi komponentami iz destilanda je treba vstaviti pred njih vsaj eno hladjeno kondenzacijsko past.



Slika 3. Vakuumski sistem pri destilacijski napravi (17 - rotacijska črpalka, 18 - difuzijska črpalka, 19 - hladilna pasta, 20,21 - vakuumski kotna ventila, 22 - visokovakuumski ventil, 23-26 - krogljne pipe, 27 - ventil za vpust zraka, 28-30 - odzračevalni ventili, 31,32 - vakuummetra)

Rotor, ki je v vakuumu, je treba obračati z dokaj veliko vrtilno frekvenco (npr. 1700/min pri premeru rotorja 13 cm). Za to je potreben elektromotor, ustrezen prenos, ležaji in tesnjenje proti vakuumu. Ker mora biti tesnilo odporno proti organskim topilom in ker se lahko že od rotorja tudi segreva, je to tesnjenje "trd oreh".

Nadalje je treba rotorju od zunaj kontrolirano dovajati toploto. Zelena temperaturo rotorja je treba vzdrževati konstantno in dokaj natančno, od mesta do mesta na rotorju se tudi ne sme znatno spreminjati. Možno je ogrevanje rotorja s sevanjem, vendar imajo laboratorijske naprave v rotor vgrajen uporovni grelnik, da ne pridejo pare v kontakt z zelo vročimi grelniki in na njih ne zoglejijo. Problem je torej dovod električnega toka v vrteči se rotor in merjenje rotorjeve temperature. Električni izhod merilnika temperature pa mora po elektronski povratni zvezi krmiliti jakost gretja. Če se odrečemo dragemu in tudi manj zanesljivemu nekontaktnemu merjenju temperature rotorjeve površine na osnovi infrardečega sevanja, bi preostala vgradnja termočlena v rotor. Pri tem pa ne pride v poštev prenos termonapetosti prek drsnih obrobov, temveč je treba signal prej predelati s pretvornikom na vrteči se osi.

2 Preučevanje in razvoj sestavnih delov

Težji problemi, s katerimi se srečamo pri konstrukciji naprave za molekularno destilacijo, zadevajo: zanesljiv prenos hitrega vrtenja v vakuum, tesnjenje spojev, kontrolirano ogrevanje rotorja ter dovajanje in odvajanje tekočin. Tu bomo navedli nekatere važnejše ugotovitve, do katerih smo prišli pri reševanju tehnološko

– konstrukcijskih problemov. Utemeljili bomo izbiro materialov in elementov ter nakazali konstrukcijske rešitve za nekatere dele in sklope.

Pri tesnjenju raznih spojev navadno ne gre brez sintetičnih elastomerov. Tesnilni materiali morajo zdržati vplive zelo različnih organskih snovi – destilandov in primernih topil za čiščenje, poleg tega pa še bolj ali manj povišano temperaturo, pač glede na nameno uporabo. Še zlasti zahtevno je tesnilo hitro se vrteče gredi, ki mora izpolnjevati še prej omenjene pogoje. Naravna guma za večino naših namenov ne ustreza (ker ni odporna proti olju in drgnjenju). Umetna guma (perbunan, neopren) je veliko boljša, vendar tudi le za temperature do 80°C. Silikonska guma je obstojna do 150°C. Za elastomerna tesnila pridejo v poštev umetni kavčuki, ki pa morajo biti kemično in temperaturno primerno odporni. Iz pregleda literature povzemamo naslednje podatke, pomembne za izbiro.

Nitrilni kavčuk, NBR (kopolimer butadiena in akrilonitrila), trajno zdrži do 100°C, pri višjih temperaturah pride do odtitve. Dobro prenaša mineralna olja; živalske in rastlinske maščobe, alifatske ogljikovodike, vročo vodo, alkohole (alkanole), kisline in baze ne previsoke koncentracije, slabo pa aromatske in klorirane ogljikovodike, polarna topila (acetona), glikol, nekatere estre. Zaradi nizke cene se za srednji in visoki vakuum na veliko uporablja kot tesnilni material pod trgovskim nazivom perbunan N.

Kloroprenski kavčuk, CR (polimer klorbutadiena), tudi zdrži do 100°C, po odpornosti proti kemikalijam je podoben prejšnjemu, izrecno pa je navedeno, da dobro prenaša tudi glikol, silikonska olja in večino freonov. Nekoliko slabše prenaša mineralna olja in bencin, slabo pa aromatske spojine, klorirane ogljikovodike, etre, ketone in nekatere estre. Tudi ta se pod nazivom perbunan C ali neopren lahko uporablja za vakuum, največ pa za hladilne naprave.

Silikonski kavčuk, MVQ (polisiloksan), zdrži trajno 150°C (občasno vsaj 200°C), nekatere vrste ostanejo prožne do -100°C. Fiziološko je inerten, srednje dobro prenaša vodo do 100°C, mineralna olja, eno- in večvalentne alkohole, aceton, slabo pa lahkomoledularne estre in etre, alifatske in aromatske ogljikovodike, koncentrirane kisline in alkalije.

Fluorov kavčuk, FPM (kopolimer vinilidenfluorida in heksafluorpropilena), je obstojen do 200°C in dobro prenaša alifatske in aromatske ogljikovodike, goriva, mineralna olja, rastlinska olja, alkohole, baze, silikonska olja, slabo pa polarna topila, anhidride halogenskih kislin in amoniak. Najpogostejša trgovska oznaka je viton, uporablja pa se za tesnila vakuumskih prirobnic, kjer je potrebno zmerno pregrevanje (ultravisoki vakuum). Različica je vitilan, za katerega pišejo, da trajno prenese 150°C, občasno 175°C. Fluorov kavčuk bi bil za naš namen najprimernejši, saj je v literaturi za viton izrecno navedeno, da prenaša tetrakloreten, trikloreten, klorogljik, (t.j. tetraklormetan) in freon.

Teflon, PTFE (politetrafluoretilen), je veliko bolj trd in neelastičen, nekateri ga štejejo že med termoplaste. Neobremenjenega lahko uporabljamo do 300°C. Kemično je skoraj inerten, načenjajo ga le koncentrirana HF in alkalijske kovine. Prodajajo ga tudi pod drugimi trgovskimi nazivi. Med drugim je primeren za samomazalne detajle, še zlasti, če mu je primešan grafit. Od zanimivih termoplastov omenimo še tri. Za cevi in posode za kemikalije je dokaj primeren polietilen

(PE), uporaben do 70°C. Je netoksičen, brez vonja in okusa, zelo fleksibilen. Do 60°C se dobro upira vodi, oljem, mastem. Ni pa odporen proti koncentrirani žveplovi ali solitni kislini, detergentom ter aromatskim in halogeniranim ogljikovodikom.

Polipropilen (PP) prenese 80°C, občasno 100°C, med drugim ga uporabljajo za vodovodne cevi za vročo in hladno vodo. Je zelo lahek, izjemno odporen proti previjanju in tudi površinski obrabi. Dobro obstojen je v koncentriranih bazah, nekoncentriranih kislinah, alkoholih, etrih, ketonih, bencinu, detergentih, slabo pa v aromatskih in kloriranih ogljikovodikih.

Poliamid (PA) prenese do 150°C, ima žilavo strukturo, je odporen proti površinski obrabi. Dobro je obstojen v mineralnih oljih, bencinu, estrih, etrih, ketonih, bazah, tetraklormetanu, trikloretilenu, freonu, slabo pa v anorganskih in koncentriranih organskih kislinah.

Duroplasti ostanejo trdi tudi pri višjih temperaturah. Omenimo epoksidne smole, ki so kemijsko dokaj inertne. Dobro se primejo kovine, stekla, keramike in jih lahko uporabimo za izdelavo nerazstavljenih spojev. Sem spada araldit, z njim lahko npr. nakitamo stekleno okno na kovinsko posodo ali izoliramo manj zahtevne električne prevodnice.

Poseben problem pri napravah za vakuumsko molekularno destilacijo je vakuumsko tesnjenje pogonskih osi. Standardne vakuumске prevodnice za vrtenje so praviloma za bolj počasno vrtenje: pri tesnjenju osi z O-obročji iz vitona, npr. do 300 vrtljajev/min, po principu opletanja »mačjega repa«, zatesnjenega s prožnim mehkom, pa kvečjemu do 500 vrtljajev/min, medtem ko za naše namene potrebujemo okrog 1700 vrtljajev/min.

Za vakuumsko tesnjenje pogonskih osi pogosto uporabljamo z mastjo ali oljem mazane elastomerne obroče, navadno posebnega profila (simmerringi). Gre za obroč iz elastomera s presekom v obliki črke U ali V. Na notranji strani ga pritiska proti osi prožna vzmet, zunaj pa se tesno prilega puši. Dopusna vrtilna frekvenca je omejena s temperaturo tesnilne ustne (navadno do 100°C). Vzmetna manšetna tesnila načeloma omogočajo zelo hitro vrtenje osi. Odprtina obroča naj gleda na stran višjega tlaka. Pred vstavitvijo je treba tesnilo namazati (npr. s silikonsko mastjo). Konec osi mora biti zaobljen, da se pri natikanju ne poškoduje tesnila.

Uporabljajo se tudi tesnilni obroči, oblikovani iz azbesta z grafitom ali teflona /1/. Slaba stran tega principa je potreba po mazanju in naknadnem privijanju, pride pa tudi do obrabe osi. Manj puščajo in manj vzdrževanja zahtevajo t.i. mehanska tesnila /1/, pri katerih se drgneta le gladki čelni ploskvi dveh obročev (iz zelo trde snovi in grafitu), pritisnjenih drug k drugemu. Taka tesnila so draga.

Tesniti je mogoče s suhim teflonom. V tesnilu se vrstijo ploščice iz teflona (debeline npr. 1,5 mm) in kovine (slika 4a). Med osjo in notranjim premerom kovinskih podložk je reža 0,25 mm. Pri stisnjenju teflona le-ta »steče« v te reže. Tesnilo dobro deluje pri temperaturi do 200°C in puščanje ni večje od 10^{-6} mbar l/s. Hitrost vrtenja pa je dokaj omejena.

Teflonsko tesnilo ima lahko tudi obliko obroča s stranskim utorom (slika 4b). Ta je obrnjen na atmosfersko stran in vanj se vstavi posebna vzmet, ki tišči tesnilo na os in ohišje. Pri uporabi dveh takih tesnil v seriji in

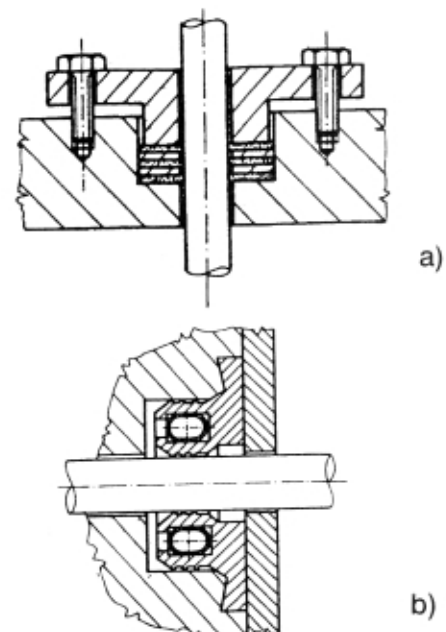
evakuaciji vmesnega prostora s predčrpalko je puščanje minimalno.

Magnetne sklopke /2/ prenašajo vrtenje skozi steno nemagnetne cevi s permanentnimi magneti. Navor je omejen in pri večjem uporabi pride rotor iz takta in se ustavi. Boljši je poseben elektromotor z veliko rezo med rotorjem in statorjem, v kateri je nameščena nemagnetna cev kot meja med atmosfero in vakuumom. Navadno je to asinhronski motor na vrtilni tok, zaradi večje reže pa so večje tudi izgube in grejete.

Ogrevanje rotorja bi bilo najbolj idealno z vročo tekočino iz termostata, vendar je napeljava tehnično zelo zahtevna. Lažje bi bilo vgraditi grelnik tako, da bi potekali izvodi v votli gredi do drsni obročev. V tem primeru bi bilo treba dobiti ali izdelati cevni grelec, okrog katerega bi ulili aluminij. Nato bi morali zatesniti spoj med rotorjem in gredjo (kovinsko tesnjenje zahteva velike sile) ali pa bi namestili drsne obroče kar v vakuumu in bi bila gred od tam naprej polna. V zadnjem primeru bi nagajalo počasno evakuiranje notranjosti rotorja, ki bi jo težko vakuumsko zatesnili.

Za spremljanje temperature rotorja pride v poštev termočlen. Ekspaktno merjenje ni potrebno, važna pa je ponovljivost. Če bi termočlen fiksirali na rotor in bi izvode speljali direktno čez dodatne drsne obroče, bi bil stik za milivoltno napetost dvomljiv. Možno bi bilo tudi posredno merjenje s sprejemnikom sevanja ali v ostanku destilanda v žlebu okrog rotorja.

Tako za morebitno ogrevanje prek sevanja kot tudi za merjenje smo naredili nekaj orientacijskih računov, o katerih bomo tu navedli le rezultate. Izhajali smo iz tega, da je emisijski koeficient za celotno sevanje za svetle kovine (zlasti take z veliko električno prevodnostjo in pri nižji temperaturi) le nekaj stotink, vzeli smo $\epsilon=0,1$. Že tanka plast tekočine na disku to precej zviša (kar hitro na 0,5). Za umetno potemnjene površine smo vzeli $\epsilon=0,9$.



Slika 4: Dve varianti vakuumskega tesnjenja pogonske osi s teflonom: s teflonskimi ploščicami (a) in s teflonskim obročem s stranskim utorom v obliki črke U (b)

Disk s premerom 10 cm pri 200°C lahko dobiva od približno enako velikega diskastega grelnika pod njim pri samo 400°C okrog 50 W, če sta obe nasprotni površini potemneni. S sevanjem izgublja na nasprotni stran v okolico pri sobni temperaturi le kakih 8 W (za $\epsilon=0,5$). Razlika je na razpolago za izparevanje. Če tega ne bi bilo, bi se disk segrel na znatno višjo temperaturo. Ocenili smo tudi časovno konstanto segrevanja takega diska s toplotno kapaciteto, kot jo ima 5 mm debelo nerjavno jeklo: pri dovajani moči 50 W bi bila okrog 10 min. Gotovo bi bila za izparevanje debelejša plasti destilanda potrebna tudi večja moč. Da ne bi prišlo do razpadanja in oglenenja par destilata na njem, bi ga vstavili v cevko (spiralo) iz ustreznega stekla. Kremenovo steklo bi npr. prepuščalo večino sevanja iz vira pri 700°C (še večji delež pri višji temperaturi), težavna pa je vakuumsko tesna zavaritev prevodnic.

Še bolj sprejemljivo kot pri ogrevanju je merjenje temperature diska na osnovi sevanja. V tem primeru merimo (npr. s prispajkanim termočlenom) temperaturo merilne ploščice, nastavljene v bližino rotorjeve površine. Če ima ploščica tisto stran proti disku potemnjeno, nasprotno pa svetlo, se njena temperatura že precej približa temperaturi diska. Če je nameščena med grelnikom in diskom s prej omenjenimi podatki, proti grelniku pa je zaslonjena s še eno svetlo ploščico, je npr. le še za 14°C bolj vroča od diska. Še bolje je, če lahko merilna ploščica sega v zarezo v rotorju (taka zareza mora imeti rotacijsko simetrijo). Njeno indikacijo, kakršna koli je že, pa lahko tudi umerimo v odvisnosti od prave temperature rotorja, pri fiksni geometriji.

Ventili, potrebni za manipuliranje z destilandom in produkti, bi lahko bile kar navadne steklene pipe s teflonskimi čepi. V kovinski izvedbi bi bili uporabni standardni vakuumski ventili z vitilonom, ki pa so dragi in manj primerni za čiščenje. V zvezi s črpalkami, ki spravljajo produkte iz vakuuma na atmosfero, so potrebni še protipovratni ventili. Med deli naprave z nekoliko različnimi tlaki (npr. med razplinjevalno in destilacijsko komoro ali med dvema destilatorjema v seriji) so potrebne tekočinske zapore - preprosti sifoni z destilandom.

Problem so tudi tekočinske črpalke. Potrebne so za obtok medijev v sistemu. Črpalke, ki zajemajo v vakuumu, ne morejo sesati, temveč jim mora tekočina dotekati zaradi težnosti. V ta namen uporabljajo zobniške črpalke posebne izvedbe. Za črpanje destilanda z atmosfere v vakuum uporabljajo batne črpalke v seriji z ventilom, ki se odpira pri določenem tlaku. Obstaja tudi izvedba z magnetnim pogonom bata. Laboratorijsko napravo za molekularno destilacijo pa lahko zasnujemo tudi tako, da za pretakanje tekočin izkoristimo naravni padec, ventile in tlačne razlike iz atmosfere v vakuum.

Standardni material, ki v napravah za molekularno destilacijo pride v stik z mediji, je nerjavno jeklo in steklo. Seveda pa so za spajanje raznorodnih konstrukcijskih materialov, za tesnjenje med elementi in za cevne povezave potrebni še elastomeri, termoplasti in duroplasti. Za pravo izbiro se moramo ozirati na medije, ki pridejo v poštev za destilacijo, a tudi na organska topila, potrebna za čiščenje naprav.

Pri molekularni destilaciji gre večinoma za frakcionacijo, separacijo, čiščenje raznih organskih snovi, npr. maščob, olj, voskov in smol biološkega izvora, težje hlapnih snovi v petrokemiji, polimerov in drugih sin-

tetičnih organskih snovi. Omenimo še za vakuumsko tehniko pomembna silikonska olja, fomblin in poli-fenileter. Za večino teh destilandov lahko z gotovostjo trdimo, da ne napadajo umetnih snovi bolj kot organska topila manjše molekularne mase.

Topila, ki jih uporabljajo v vakuumski tehniki za čiščenje (predvsem razmastitev) kovinskih delov in posod, so večinoma vnetljiva, pri določeni koncentraciji v zraku lahko tudi eksplozivna. Pri 20°C ima najvišji parni tlak dietileter (587 mbar), sledijo aceton (240 mbar), benzen (107 mbar), etanol (61 mbar), izopropilni alkohol (51 mbar) in toluen (31 mbar). Ob odprtem plamenu ali iskri lahko zmes z zrakom vzplamti že pod sobno temperaturo (pri etru celo -30°C).

Zato so pogosto bolj priporočljivi klorirani ogljikovodiki, ki niso gorljivi. V tej zvezi največ omenjajo trikloreten (80 mbar pri 20°C, vrelišče pri 87°C, topi maščobe, mineralna olja, voske, smole, kavčuk, deluje pa narkotično, ker so pare v večji koncentraciji strupene), nadalje pa še tetraklorogljik (117 mbar, vrelišče 77°C) in celo kloroform (240 mbar, 61°C). Ne omenjajo tetrakloretena (=perkloretilen), ki je sicer znano, lahko hlapno topilo za kemično čiščenje. V poštev pridejo še nekateri freoni, ki so tudi nevnetljivi: trifluortrikloreten ali R 113 (vrelišče 48°C) in difluortetrakloreten (vrelišče 93°C).

Centrifugalne destilacijske naprave lahko po končani destilaciji praviloma očistimo tako, da pustimo skoznje nekaj časa cirkulirati kako nevnetljivo topilo, pri čemer je lahko rotor še vroč. Paziti pa je treba le, da ne pride v napravi do nadtlaka. V zvezi s tem in tudi sicer je dobro, da imamo tlačno odvisno stikalo, ki avtomatično izključi gretno rotorja pri določenem višjem tlaku. Na koncu lahko posušimo napravo, tako da skoznjo pihamo zrak. Če izpuh odvajamo iz zaprtega sistema po napeljavi iz delovnega prostora, se povsem izognemo zdravstveni škodljivosti.

3 Sklepi

V prispevku smo navedli nekaj podatkov, možnosti in napotkov za konstrukcijo treh ključnih sklopov naprav za molekularno destilacijo: za prenos hitrega vrtenja v vakuumu, za kontrolirano ogrevanje rotorja ter za transport tekočin. Preučili smo tudi materiale za tesnjenje. Pri njihovi izbiri smo upoštevali, da pridejo v stik z mediji in čistili, hkrati pa morajo biti vakuumsko ustrezni.

4 Literatura

- /1/ J.L. Ryans, D.L. Roper, Process Vacuum System Design & Operation, McGraw-Hill, 1986
- /2/ Wutz, Adam, Walcher, Theorie und Praxis der Vakuumtechnik, Frid. Vieweg, Braunschweig, 1981

Popravki

Tudi v drugem delu prispevka o vakuumski molekularni destilaciji (Vakuumist, št. 4, letnik 19, 1999, 16-19) ni šlo brez tiskarskih napak. Popravki so naslednji:

2. vrstica za naslovom 2; narobe: "takega toka", pravilno: "toka tekočinske plasti po rotorju"

naslov 2.1; narobe: "vrtečen", pravilno "vrtečem"

9. vrstica po sliki 1; narobe: "β", pravilno: "η"

pred enačbo na koncu strani 17 manjka minus, pravilna številka enačbe pa je (5)

8. vrstica na st. 19: literatura ni /1/, temveč je knjiga Redhead, Hobson, Kornelsen, The physical basis of ultrahigh vacuum, Chapman & Hall, London, 1968. Isto velja za navedbi /1/ v vrstici pred enačbo (15) in v 3. vrstici pred (16).