

UDK 66.047.1

Sušenje raztopin v razpršilnih sušilnicah

MIRKO OPARA

1. UVOD

Sušenje v razpršilnih sušilnicah je eden od razširjenih postopkov za pridobivanje različnih snovi iz raztopin ali suspenzij. Z velikim uspehom se uporablja predvsem v kemični, živilski, farmacevtski in keramični industriji.

V razpršilni sušilnici vstopajočo kapljevino s posebnimi napravami razpršimo na drobne kapljice. Kapljice se gibljejo skozi tok vročega sušilnega plina (zraka, dimnih plinov, vodne pare itd.). Zaradi velike površine kapljic prihaja med njimi in sušilnim plinom do intenzivne izmenjave toplote in snovi. Čas sušenja je zelo kratek in traja od 5 do 30 sekund. Osušena snov ima obliko majhnih, navadno okroglih delčkov, ki so porozni, včasih celo votli. Velikost osušenih delčkov je v glavnem odvisna od razprševanja in navadno ne presega premera 1 mm. Za razprševanje uporabljamo tlačne in pnevmatične šobe ter rotirajoče razprševalnike. Pri protismernem toku plinaste in kapljevite oziroma trdne faze so osušeni delčki v stiku z najbolj vročim sušilnim plinom in se lahko precej segrejejo. Protismerni tok je uporaben za sušenje snovi, ki so odporne proti visokim temperaturam. Za sušenje snovi, ki jim visoke temperature škodujejo, je primernejši istosmerni tok.

S sušenjem v razpršilnih sušilnicah v mnogih primerih skrajšujemo tehnološki proces, saj ni treba postopkov kakor npr.: centrifugiranja, filtracije, mletja itd. Največja slabost razpršilnih sušilnic so razmeroma drage in zapletene naprave za ločitev osušene snovi od sušilnega plina. Poraba toplote je v razpršilnih sušilnicah odvisna od pogojev sušenja in znaša od 3,5 do 6 MJ na 1 kg izparjene vode [1].

2. HLAPELJE VODE IZ KAPLJIC SOLNIH RAZTOPIN

Kapljice so v razpršilnih sušilnicah v neposrednem stiku z vročim sušilnim plinom. Na njihovi površini hlapi voda. Nastala para prestopa v sušilni plin, iz sušilnega plina pa prestopa toplota na kapljice. Zaradi hlapenja vode neprestano raste koncentracija soli v kapljicah. Le-ta je največja na površini kapljic. S površine se sol premešča v notranjost z difuzijo, ki je posledica razlik med koncentracijami, in s cirkulacijo, ki je predvsem posledica trenja med kapljico in sušilnim plinom. Na

cirkulacijo v začetku sušenja vpliva tudi razprševanje. Cirkulacija skupaj z difuzijo izenačuje koncentracije po vsem volumnu kapljice. S prenosom toplote pogojena razlika temperatur v kapljicah je zaradi dobre toplotne prevodnosti kapljev in cirkulacije v kapljicah zelo majhna [2].

Ce je temperatura raztopine ob vstopu v sušilnico različna od temperature mokrega termometra, ki ustreza stanju sušilnega plina, se kapljice ohlajajo ali segrevajo tako dolgo, dokler ne dosežejo te temperature. Temperatura mokrega termometra je pri hlapenju vode iz raztopin s povišanjem temperature vrenja višja kakor pri hlapenju čiste vode.

Čas sušenja, v katerem se temperatura kapljic približuje temperaturi mokrega termometra, in čas sušenja pri tej temperaturi sta odvisna od pogojev sušenja in lastnosti raztopine. Temperatura kapljic se zelo hitro izenačuje s temperaturo mokrega termometra, zato je količina v tem času izhlapele vode navadno neznatna v primerjavi s celotno količino vode, ki jo pri sušenju izženemo iz vstopajoče raztopine.

Koncentracija soli v kapljicah med sušenjem neprestano raste. Na površini kapljic je koncentracija vedno nekoliko večja kakor v jedru, zato je površina kapljice najprej nasičena s soljo. Z nadaljnjim sušenjem voda še naprej hlapi s površine in se začnejo izločati kristali soli.

Hlapenje vode s površine kapljic je med drugim odvisno tudi od relativne hitrosti med površino kapljic in sušilnim plinom. Relativne hitrosti so največje na sprednjem delu kapljice in najmanjše na površini, ki leži nekoliko nad njenim središčem. Ker je hlapenje intenzivnejše na področju večjih relativnih hitrosti, je koncentracija soli največja na sprednji površini, kjer se začnejo izločati tudi prvi kristali. Kristali se med seboj povezujejo v trdno in bolj ali manj porozno skorjo, ki raste po površini kapljice.

Kapljice v industrijskih razpršilnih sušilnicah zaradi razprševanja in turbulence sušilnega plina močno rotirajo. Rotacija ruši profil koncentracij, ki nastaja zaradi različnih hitrosti hlapenja vode po površini kapljic. Koncentracija soli je zaradi tega po vsej površini kapljice praktično enaka in izločitev prvega kristala sovпада s tvorbo kompletne skorje. Odsek sušenja do pojava prvih kristalov oziroma tvorbe kompletne skorje imenujemo prvi odsek sušenja. Enačimo ga lahko s hlapenjem vode s proste površine.

S pojavom prvih kristalov in tvorbo skorje se začne hlapenje naglo zmanjševati. Začne se drugi odsek sušenja, ki je močno odvisen od lastnosti skorje. Voda hlapi iz nasičene raztopine, ki je v ravnotežju s pravkar izločenimi kristali. Gladina raztopine se s hkratnim izločanjem kristalov čedalje bolj pomika v notranjost nastajajočega delčka. Hlapenje več ne poteka na površini, ampak v notranjosti delčka. Skorja postaja debelejša in vodna para mora difundirati v sušilni plin skozi vedno daljše in ožje pore v skorji.

Iz sušilnega plina prestopa na delčke več toplote, kolikor je porabi uparjanje vode, zato začne temperatura delčkov rasti. Če je skorja zelo zaprta, je hlapenje tako počasno, da se raztopina v delčkih segreje na vrelišče. Pri vrenju raztopine nastala vodna para ne more dovolj hitro skozi skorjo prestopati v tok sušilnega plina. V notranjosti delčkov se pojavi nadtlak. Zaradi tega trdne in krhke skorje navadno počijo in delček se razleti, elastične pa nabreknejo [3]. Tudi pri bolj poroznih skorjah se raztopina v jedru delčkov proti koncu sušenja tako segreje, da se njena temperatura močno približa vrelišču raztopine.

3. PRENOSNE ENOTE

Pri razprševanju raztopin nastaja veliko število kapljic, ki so po velikosti zelo različne. Ta se med sušenjem spreminja, saj se premer kapljic zaradi hlapenja vode manjša, pa tudi velikost delčka se iz že omenjenih razlogov lahko spreminja. Natančna določitev površine, skozi katero poteka izmenjava toplote in snovi, je zelo težavna, zato jemljemo, da je volumen sušilnice v sorazmerju z izmenjevalno površino A . Za sušilnico valjaste oblike s prerezo S in višino Z velja:

$$SZ = CA \quad (1)$$

V gornji enačbi je C konstanta.

Masni tok vodne pare, ki v diferencialnem odseku sušilnice višine dz prehaja iz raztopine v sušilni plin, dobimo po enačbi:

$$dq_v = \beta (x_{Ge} - x_G) dA \quad (2)$$

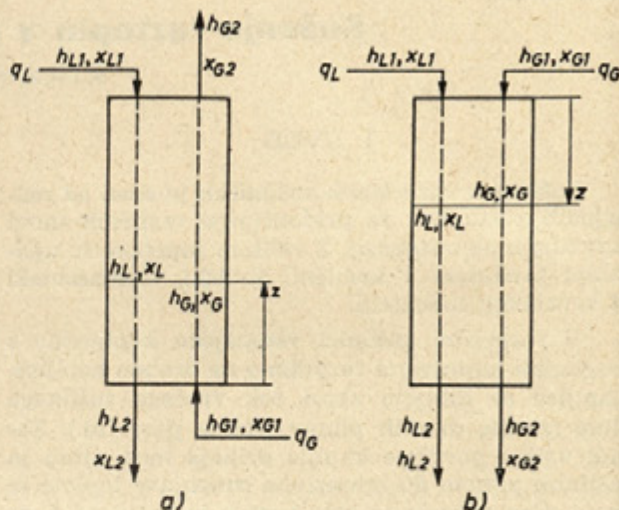
kjer pomenijo:

- q_v — masni tok vodne pare,
- β — koeficient snovne izmenjave,
- x_G — vlažnost sušilnega plina, maso vodne pare v masni enoti suhega plina,
- x_{Ge} — vlažnost sušilnega plina na površini kapljic ali delčkov,
- dA — površino kapljic ali delčkov v diferencialnem odseku sušilnice višine dz .

Spremembo koncentracije raztopine in vlažnosti sušilnega plina v diferencialnem odseku sušilnice višine dz zapišemo z masno bilanco za vodo ozir. vodno paro:

$$q_G dx_G = -q_L dX_L \quad (3)$$

Višino sušilnice merimo v smeri gibanja sušilnega plina, sl. 1.



Sl. 1. Shema razpršilne sušilnice
a) protismerni tok, b) istosmerni tok

Ker se količina vode ozir. vodne pare v toku raztopine in v toku sušilnega plina spreminja, računamo z masnimi tokovi suhih snovi in vse specifične veličine preračunamo na masno enoto suhe snovi. V gornji enačbi pomeni torej:

- q_G — masni tok suhega sušilnega plina,
- q_L — masni tok raztopljenih in pozneje kristaliziranih soli,
- X_L — koncentracijo, maso vode na masno enoto soli.

S primerjavo enačb (2) in (3) ugotovimo, da obe izražata isti masni tok vodne pare, zato ju izenačimo:

$$q_G dx_G = \beta (x_{Ge} - x_G) dA \quad (4)$$

Če enačbo (1) diferenciramo in vstavimo v enačbo (4), dobimo:

$$dz = \frac{dx_G}{x_{Ge} - x_G} \frac{C q_G}{\beta S} \quad (5)$$

Enačbo (5) integriramo po vsej višini sušilnice in posamezne izraze poimenujemo:

$$\int_0^Z dz = Z \quad \text{— višina sušilnice}$$

$$\int_{x_{G1}}^{x_{G2}} \frac{dx_G}{x_{Ge} - x_G} = N \quad \text{— število prenosnih enot}$$

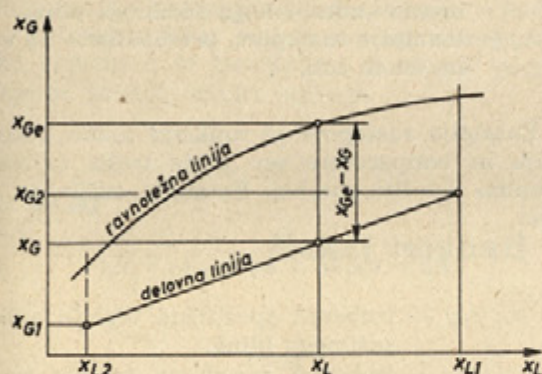
$$\frac{C q_G}{\beta S} = H \quad \text{— višina prenosne enote}$$

Z gornjimi okrajšavami lahko enačbo (5) zapišemo:

$$Z = NH \quad (6)$$

Zadnja enačba rabi za dimenzioniranje sušilnic. Pri tem je treba iz eksperimentalnih podatkov poznati višino ene prenosne enote, število prenosnih enot pa izračunamo za vsakokratne pogoje obratovanja posebej.

Za izračun števila prenosnih enot N moramo poznati vsaki vlažnosti sušilnega plina v jedru plina x_G ustrezno vlažnost sušilnega plina na mejni površini faz x_{Ge} . Stanja v jedru obeh tokov leže na delovni liniji, stanja na mejni površini faz pa na ravnotežni liniji, sl. 2. Za izračun števila prenosnih



Sl. 2. Delovna in ravnotežna linija v diagramu $-x_G, x_L$

enot moramo torej poznati delovno in ravnotežno linijo. Iz enačbe masne bilance za poljuben prerez sušilnice za protismerni tok:

$$q_G (x_G - x_{G1}) = q_L (x_L - x_{L2}) \quad (7a)$$

in za istosmerni tok:

$$q_G (x_G - x_{G1}) = q_L (x_{L1} - x_L) \quad (7b)$$

vidimo, da je delovna linija v diagramu $-x_G, x_L$ premica. Določena je z znanim stanjem obeh tokov ob vstopu in izstopu iz sušilnice. Določitev ravnotežne linije pa je težavnejša.

V prvem odseku sušenja je vlažnost sušilnega plina x_{Ge} ravnotežna vlažnost, ki ustreza stanju raztopine na površini kapljic. Na površini kapljic imata raztopina in sušilni plin enako temperaturo. Ravnotežna vlažnost sušilnega plina x_{Ge} je odvisna od molnih mas vodne pare M_v in sušilnega plina M_G , celotnega tlaka p ter od parcialnega tlaka vodne pare nad raztopino p_{ve} :

$$x_{Ge} = \frac{M_v}{M_G} \frac{p_{ve}}{p - p_{ve}} \quad (8)$$

Parcialni tlak vodne pare p_{ve} je tlak vrenja raztopine, ki je odvisen od temperature in koncentracije raztopine. V enačbi (8) sta temperatura in kon-

centracija raztopine med seboj neodvisni spremenljivki in ju lahko poljubno izbiramo, zato je treba za določitev ravnotežne vlažnosti sušilnega plina x_{Ge} in s tem ravnotežne linije najprej poiskati medsebojno odvisnost temperature in koncentracije raztopine na površini kapljic.

Profila temperatur in koncentracij v kapljicah za zdaj še ni mogoče določiti. Vzemimo, da je cirkulacija v notranjosti tako močna, da sta temperatura in koncentracija po vsem volumnu kapljice konstantni in enaki poprečni temperaturi in koncentraciji raztopine v opazovanem trenutku. Celotni upor proti izmenjavi toplote in snovi prenesemo s tem na stran plina.

Ohlajanje ali segrevanje kapljic na temperaturo mokrega termometra ima normalno majhen vpliv na celoten potek sušenja, zato vzamemo, da sušenje že od začetka poteka pri temperaturi mokrega termometra. Kapljica ima temperaturo mokrega termometra, ko se ves toplotni tok, ki iz sušilnega plina prestopa na kapljico, porabi za uparjanje vode:

$$a (t_G - t_L) dA = r \beta (x_{Ge} - x_G) dA \quad (9)$$

Povrh znanih veličin se pojavljajo v enačbi (9) še:

- a — toplotna prestopnost,
- t_G — temperatura sušilnega plina,
- t_L — temperatura raztopine,
- r — uparjalna toplota.

Temperatura mokrega termometra pri hlajenju vode iz raztopin s povišanjem temperature vrenja tudi pri nespremenjenem stanju sušilnega plina ne ostane konstantna. Koncentracija soli v kapljicah z nadaljnjim sušenjem raste, zato raste od nje odvisna temperatura vrenja raztopine in s tem tudi temperatura mokrega termometra.

Toplotno prestopnost in koeficient snovne izmenjave dobimo iz brezdimenzijskih števil po enačbah [4]:

$$\begin{aligned} Nu &= 2,0 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/4} \\ Sh &= 2,0 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/4} \end{aligned} \quad (10)$$

Posamezna brezdimenzijska števila so

- $Nu = \frac{a d}{\lambda}$ Nusseltovo število; d — premer kapljice, λ — toplotna prevodnost;
- $Re = \frac{w d}{\nu}$ Reynoldsovo število; w — hitrost, ν — kinematična viskoznost;
- $Pr = \frac{\nu}{a}$ Prandtlovo število; a — temperaturna prevodnost;
- $Sh = \frac{\beta_p d}{D}$ Sherwoodovo število; β_p — koeficient snovne izmenjave, D — difuzijski koeficient;

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{Schmidtovo število.}$$

Iz enačbe (10) izhaja, da je razmerje toplotne prestopnosti in koeficienta snovne izmenjave (za $Re^{1/2} \gg 2,0$) neodvisno od premera kapljic:

$$\frac{\alpha}{\beta_p} = c_p \varrho \left(\frac{a}{D} \right)^{1/2} \quad (11)$$

kjer sta: c_p — izobarna specifična toplota,
 ϱ — gostota.

Koeficient snovne izmenjave β_p , ki se pojavlja v enačbi (10) v Sherwoodovem številu, se nanaša na diferenco parcialnih tlakov v mejni plasti in ga je treba preračunati na razliko vlažnosti sušilnega plina. Pri tem je treba upoštevati, da mejno površino faz prestopa samo ena od udeleženi snovi. To je vodna para, ki nastaja zaradi dovoda toplote in difundira iz vlažne površine v sušilni plin. V nasprotni smeri difundira sušilni plin, vendar ga mejna površina faz ne prepušča, saj se plin ne topi v vodi oziroma raztopini. Obstajati mora torej konvektivni tok sušilnega plina od površine kapljic proti jedru plinov, ki kompenzira difuzijo plinov proti vlažni površini. Za ta primer velja Štefanov zakon:

$$dq_v = dA \frac{\beta_p}{R_v T} \left(p_{ve} - p_v \right) \frac{p}{p - p_{em}} \quad (12)$$

Izraz:

$$p - p_{em} = \frac{p_{ve} - p_v}{\ln \frac{p - p_v}{p - p_{ve}}}$$

pomeni srednji parcialni tlak suhega sušilnega plina v mejni plasti, R_v — plinsko konstanto vodne pare in T — absolutno temperaturo.

Koeficient snovne izmenjave β_p preračunamo na β z izenačenjem desnih strani enačb (2) in (12). Dobljeni izraz za β in enačbo (11) vstavimo v enačbo (9) ter dobimo:

$$\frac{\mu + x_{Ge}}{\mu + x_G} = \exp \left[\frac{c_{Mp}}{M_v} \left(\frac{a}{D} \right)^{1/2} \frac{t_G - t_L}{r} \right] \quad (13)$$

kjer je: $\mu = M_v/M_G$ in c_{Mp} — molna specifična toplota pri konstantnem tlaku.

Izraz $\left(\frac{a}{D} \right)^{1/2}$ je za hlapenje vode v zrak praktično enak 1 in ga navadno izpuščamo.

Po enačbi (13) izračunamo vsaki temperaturi raztopine ustrežajočo koncentracijo v prvem odseku sušenja. V njej se pojavljajo še druge spremenljivke, ki pa jih lahko izrazimo s temperaturo in koncentracijo raztopine. Vlažnost sušilnega plina

x_G zamenjamo s koncentracijo raztopine po enačbi (7). Vlažnost sušilnega plina x_{Ge} je po enačbi (8) določena s tlakom vrenja raztopine. Odvisnost tlaka vrenja raztopine od temperature in koncentracije za vsako raztopino posebej poiščemo. Temperaturo sušilnega plina dobimo iz energijske bilance za poljubni prerez sušilnice. Za protismerni tok velja:

$$q_G (h_G - h_{GI}) = q_L (h_L - h_{LI}) \quad (14a)$$

in za istosmerni tok:

$$q_G (h_G - h_{GI}) = q_L (h_{LI} - h_L) \quad (14b)$$

kjer pomenita:

h_G — entalpijo sušilnega plina, preračunano na masno enoto suhega sušilnega plina,

h_L — entalpijo raztopine, preračunano na masno enoto soli.

Entalpija raztopine je funkcija njene koncentracije in temperature ter jo je treba za vsako raztopino določiti posebej. Entalpija sušilnega plina je:

$$h_G = c_{pG} t_G + x_G (c_{pp} t_G + r_o) \quad (15)$$

kjer so: c_{pG} — izobarna specifična toplota suhega sušilnega plina,

c_{pp} — izobarna specifična toplota vodne pare,

r_o — uparjalna toplota vode pri 0 °C.

Po izračunu medsebojne odvisnosti temperature in koncentracije raztopine v prvem odseku sušenja lahko po enačbi (8) za vsako koncentracijo raztopine določimo ravnotežno vlažnost sušilnega plina na površini kapljic. S tem pa že poznamo ravnotežno linijo in jo lahko narišemo v diagramu — x_G, X_L .

Toplotno-snovna izmenjava na kapljicah je po številnih eksperimentih razmeroma natančno raziskana, zato prvi odsek sušenja računsko lahko spremljamo precej natančno. Mehanizem toplotno-snovne izmenjave je v drugem odseku sušenja mnogo bolj zapleten in močno odvisen od lastnosti raztopljenih soli ozir. skorje. Pri računanju drugega odseka smo v glavnem vezani na izkustvene podatke o obratovanju sušilnic. Iz takih podatkov sklepamo, da je hitrost sušenja sorazmerna z vlažnostjo materiala. Vlažnost materiala pomeni razmerje količine vode in količine suhe snovi, zato je v našem primeru enaka koncentraciji X_L . Če sorazmernostno konstanto označimo s K , lahko za diferencialni odsek sušilnice višine dz zapišemo:

$$dq_v = K X_L dA \quad (16)$$

Izenačimo desni strani enačb (2) in (16):

$$\beta (x_{Ge} - x_G) = K X_L \quad (17)$$

Če je koeficient snovne izmenjave na strani sušilnega plina β konstanten, je konstantno tudi razmerje:

$$\frac{K}{\beta} = M \quad (18)$$

in enačbo (17) zapišemo krajše:

$$x_{Ge} - x_G = MX_L \quad (19)$$

Ker pomeni x_{Ge} ravnotežno vlažnost sušilnega plina na površini delčkov, je enačba (19) enačba ravnotežne linije. Po enačbi (7) sta x_G in X_L med seboj linearno odvisna, zato je tudi odvisnost x_{Ge} od X_L , po enačbi (19) linearna. Ravnotežna linija drugega odseka sušenja je v diagramu $-x_G, X_L$ premica. Ravnotežna linija drugega odseka sušenja je podaljšek ravnotežne linije prvega odseka sušenja, zato lahko konstanto M izračunamo iz znanih pogojev na koncu prvega odseka sušenja.

UDK 669.181

Nekaj novosti pri pridobivanju jekla

VIKTOR PROSENC

Uvod

Po klasičnih postopkih za izdelavo kvalitetnih jekel je možno doseči določeno maksimalno kvaliteto ob tehnološko in ekonomsko možnih pogojih. Za povečanje storilnosti oziroma proizvodnje so jeklarji stopnjevali velikost agregatov tj. rafinacijskih peči in hkrati vseh potrebnih pomožnih naprav. Tem prizadevanjem je bila odrejena neka tehnična in ekonomska meja, čez katero zmogljivosti ni bilo mogoče stopnjevati.

Vzporedno je šel razvoj po drugi poti tako, da so stopnjevali hitrost metalurških procesov. S tem se je skrajšal čas za dokončanje šarže, ob nepovečanih napravah povečala proizvodnja in obdržala ali celo izboljšala kvaliteta. Sem spadajo že znani načini pridobivanja jekla z dodajanjem kisika za rafinacijo ali z uporabo močno reaktivnih sintetičnih žlinder. Pri tem so jeklarji pogosto kombinirali vzporedno delo v talilni in rafinacijski martinovski in obločnih električnih pečeh. Tako so dosegli pri proizvodnji bolj kvalitetnih jekel množine sicer normalne za množinska in manj kvalitetna jekla.

Za doseganje največjih kvalitetnih zahtev pa vse to pogostoma še ne zadošča. Predvsem je šla težnja v jeklarstvu in tudi kovinarstvu v smeri očiščevanja jekla od plinov, kisika, dušika in vodika, s čimer bi se izboljšale tudi mnoge mehanske in druge fizikalne lastnosti. Po klasičnih rafinacijskih postopkih pa je mogoče dosegati samo neke omejene neznatne količine plinov v jeklu, katerih nato vzlic vsem izboljšavam ni mogoče več zmanjšati, ker so pogojene s fizikalnimi zakonitostmi posameznih delovnih metod. Tako so na primer količine plinov v jeklu odvisne od parcialnih tlakov istih plinov v atmosferi nad talino. Ob zmanjšanju tlakov se zmanjša tudi množina plina v kovini. Te tehnične možnosti skušajo izkoriščati pri novih načinih za pridobivanje jekel ob hkratnem uvajanju še nekaterih dodatnih tehnoloških sprememb.

LITERATURA

1. Lykov, M. V., Leončik, B. I.: Raspylitel' nie sušilki. Mašinostroenie, Moskva 1966.
2. Schlünder, E. U.: Temperatur- und Massenänderung verdunstender Tropfen aus reinen Flüssigkeiten und wässrigen Salzlösungen. International Journal of Heat and Mass Transfer, 7 (1964), šte. 1. str. 49/73.
3. Charlesworth, D. H., Marshall, W. R.: Evaporation From Drops Containing Dissolved Solids. A. I. Ch. E. Journal, 6 (1960), šte. 3, str. 9/23.
4. Ranz, W. E., Marshall, W. R.: Evaporation From Drops. Chemical Engineering Progress, 48 (1952), šte. 3, str. 141/146 in šte. 4, str. 173/180.

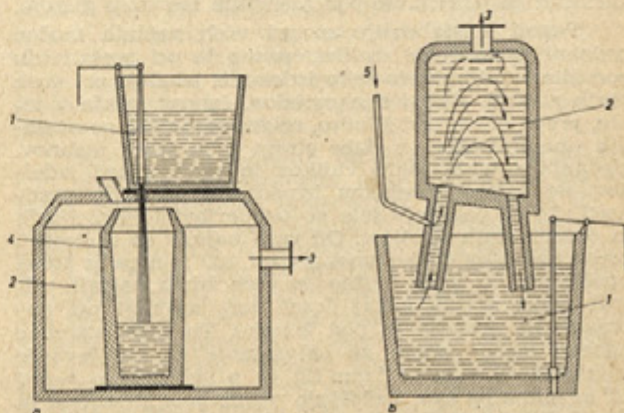
Avtorjev naslov:

mag. ing. Mirko Opara,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani

Načela nekaterih novih načinov za rafinacijo jekla

[1], [2], [3], [4]

Prvi koraki za zmanjšanje plinov v jeklu so bili namenjeni vakuumiranju taline, ki so jo sicer obdelali po klasičnih načinih, nato pa med vlivanjem skozi vakuumsko komoro iz nje odstranjevali pline. Ti načini so shematično prikazani z dvema skicama na sliki 1. Znanih je sicer več tehničnih izvedb za vakuumiranje jekla, vendar je osnovno načelo pri vseh podobno. Popolnoma podobna je tudi vakuumska induksijska peč, ki je tu vgrajena v vakuumsko komoro in rabi za pretaljanje hladnega vložka ali pa pri delu s tekočim vložkom talino samo drži v tekočem stanju med



Sl. 1. Shematični prikaz vakuumiranja jekla

- a — vakuumsko vlivanje blokov, b — vakuumiranje jekla s prečrpavanjem
1 — ponev s tekočim jeklom, 2 — vakuumska posoda, 3 — priključek na vakuumske črpalke, 4 — kokila, 5 — dodatni transportni plin