

To znači da je $f \in \mathcal{P}$ pa je $f \in \mathcal{L}$ i

$$\lim \int_a^b f_n(x) dx = \int_a^b f(x) dx, \text{ tj. } (L) \int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx.$$

Vrijedi i općenitije; ako je f integrabilna prema Riemannu na omeđenom skupu $S \subseteq \mathbb{R}^n$, onda je f i (L)-integrabilna na tom skupu i oba su integrala jednaka.

Može se pokazati da skup svih (L)-integrabilnih funkcija na \mathbb{R}^n tvori vektorsku rešetku.

Kao primjer funkcije koja je (L)-integrabilna, a nije integrabilna može poslužiti Dirichletova funkcija $\chi: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$. Već je spomenuto da funkcija χ nije integrabilna na tom intervalu prema Riemannu. Međutim, ona je (L)-integrabilna i

$$(L) \int_0^1 \chi(x) dx = 0, \text{ jer je funkcija } \chi \text{ skoro svuda jednaka nuli.}$$

Teorem o monotonj konvergenciji. Neka je $f_n, n \in \mathbb{N}$, skoro svuda monoton niz funkcija iz \mathcal{L} tako da je niz $\int f_n$ omeđen. Tada niz $f_n(x)$ konvergira za skoro svaki x i, ako je $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ skoro svuda, onda je $f \in \mathcal{L}$ i $\int f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n$.

Lebesgueov teorem o dominirajućoj konvergenciji. Neka je $f_n, n \in \mathbb{N}$, niz funkcija iz \mathcal{L} koji konvergira za skoro svaki x i neka je za svaki n $|f_n(x)| \leq g(x)$ za skoro svaki x , gdje je g neka funkcija iz \mathcal{L} . Ako je $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ za skoro svaki x , onda je $f \in \mathcal{L}$ i $\int f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n$.

LIT.: V. lit. za Diferencijalni račun (TE3, str. 299). — M. K. Гребенча, С. И. Новоселов, Курс математического анализа. Москва 1951 (том 1), 1953 (том 2). — Б. М. Будак, С. В. Фомин, Кратные интегралы и ряды. Москва 1965. — N. B. Haaser, J. A. Sullivan, Real analysis. New York 1971. — D. Blanuša, Viša matematika II dio, 2. svezak. Tehnička knjiga, Zagreb 1974. — S. Kurepa, Matematička analiza. Tehnička knjiga, Zagreb, 1. knjiga, 1970; 2. knjiga, 1971; 3. knjiga, 1975. — S. Mardešić, Matematička analiza u n -dimenzionalnom realnom prostoru. Školska knjiga, Zagreb, I dio, 1974; II dio, 1977.

P. Papić

ISPARIVANJE, laboratorijska ili industrijska operacija u kojoj se iz neke otopine dovođenjem topline uklanja otapalo u obliku pare da bi se otopina koncentrirala. Prema kinetičko-molekularnoj teoriji topline zagrijavanjem se molekulama tekućine dovodi kinetička energija, pa tekućina isparuje kad molekule dobivaju dovoljno kinetičke energije da savladaju kohezijske sile i tlak nad tekućinom.

Razlikuje se isparivanje ključanjem i ishlapljivanjem. Tekućina isparuje ključanjem kad se tlak pare u tekućini izjednači s tlakom nad površinom tekućine. Temperatura pri kojoj tekućina ključa, naziva se temperaturom ključanja ili vrelištem. Temperatura ključanja ovisi o tlaku nad površinom tekućine. Porastom tlaka nad površinom tekućine temperatura ključanja raste, a smanjenjem tlaka opada. Tekućina ishlapljuje kad je tlak pare u tekućini veći od parcijalnog tlaka te pare u okolici, a manji od ukupnog tlaka okolice.

U tehnici se pod isparivanjem podrazumijeva tehnološka operacija kojom se zagrijavanjem do temperature ključanja otopina uparuje, tj. dio otapala prevodi u parovito stanje da bi se povećala koncentracija otopljene krute tvari u otopini. U primjeni tog postupka mora se zadovoljiti uvjet da otopljene krute tvari samo u zanemarljivo malim količinama ulaze u plinsku fazu.

Od davnine čovjek za koncentriranje otopina upotrebljava najrazličitije posude koje zagrijava vatrom na otvorenom ložištu. Najčešće su to bile tave i kotlovi. Tek 1692. godine A. Smith predlaže da se tave griju vodenom parom. T. Wood uvodi 1785. dvostruko dno na tavama, a Ph. Taylor cijevne grijače 1818. E. Ch. Howard primjenjuje 1813. isparivanje pod vakuumom, što znatno pojeftinjuje čitav postupak isparivanja. Poslije tog važnog Howardovog patentala Roth uvodi spiralna grijača tijela, Robinson (1844) horizontalne ogrjevne površine, a M. Walker (1852) kratke vertikalne cijevi kao ogrjevna tijela.

N. Rillieux patentira 1843. dvostepenu isparnu stanicu, a 1851. trostepenu s horizontalnim ogrjevnim komorama. J. F. Cail konstruirao je iste godine isparivač s vertikalnim cijevima. Zatim N. Robert, F. Wellner i H. Jelinek usavršavaju postojeće konstrukcije isparivača i daju im oblik kakav su zadržali gotovo do danas.

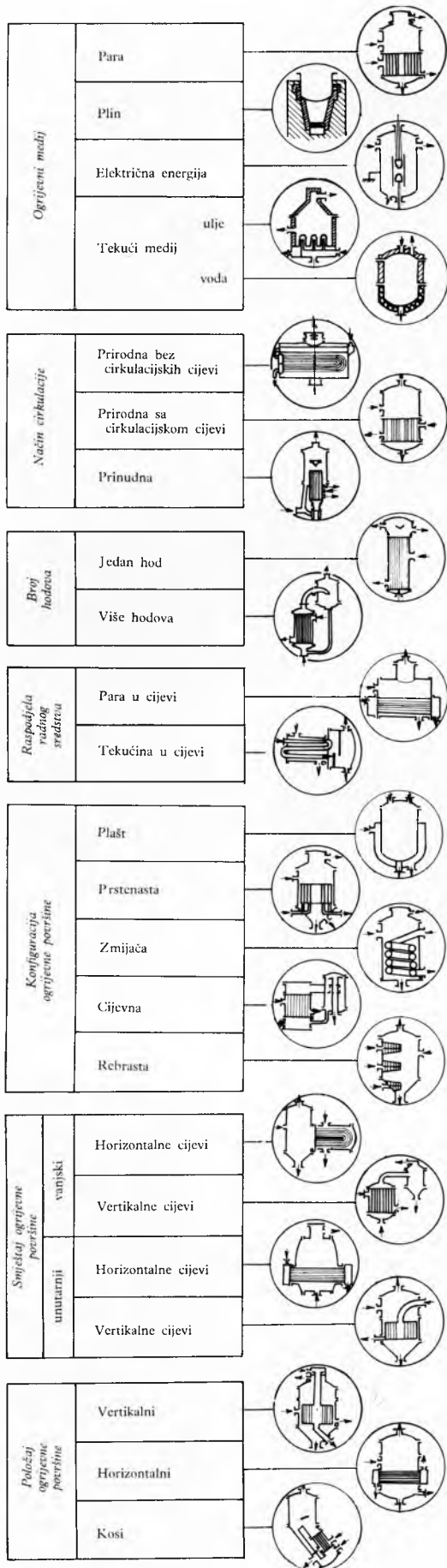
Poboljšanje prijelaza topline postignuto je u tankoslojnim isparivačima, na čijoj su izvedbi i usavršavanju radili Yaryan (1886), Lillie (1888) i posebno P. Kestner (1903). Veliki je napredak bilo uvođenje termokompresije. Bitnu ulogu u razvoju tog postupka isparivanja imali su Pelletan (1840) i Robertson (1872), te Prache i Boullon (1905), a Wiebel (1879) i Piccard (1883) uvode turbokompresiju.

Za razliku od destilacije (v. *Destilacija*, TE3, str. 232), u kojoj je produkt odvojen para u obliku kondenzata, u isparivanju se pod produktom podrazumijeva zaostala koncentrirana otopina. Otopina se uparuje u isparivačima pri atmosferskom tlaku ili pri tlaku većem ili manjem od atmosferskog. Para koja nastaje isparivanjem otopine naziva se *suparom*. Isparivači se najčešće zagrijavaju svježom vodenom parom ili suparom iz nekog drugog isparivača. To je *ogrjevna para*. Toplina za uparivanje otopine može se upotrijebiti jednostruko i višestruko. Postrojenja u kojima se otopina uparuje jednostrukom upotrebom ogrjevne pare nazivaju se jednostepenim isparivačkim stanicama, a isparivanje je jednostepeno. Kad se supara iz prethodnog isparivača upotrebljava za koncentriranje otopine u slijedećem isparivaču, govori se o višestepenim isparivačkim stanicama, a isparivanje se naziva višestepenim. Jednostepeno isparivanje odvija se pri stalnom tlaku. U višestepenim isparivačkim stanicama supara iz prvog isparivača upotrebljava se za zagrijavanje drugog, itd. U svakom narednom isparivaču otopina ključa pri nižem tlaku. Toplina se supare može višestruko upotrijebiti i termokompresijom. Osim toga, supara iz isparivačkih stanica često se upotrebljava za grijanje različitih drugih postrojenja izvan isparivačke stanice, te se tada zove oduzeta para (*ekstra para*).

Isparivači se primjenjuju u industriji u vrlo širokom opsegu. Jedna je od najstarijih primjena isparivača za dobivanje kuhinjske soli iz morske vode ili iz podzemnih naslaga kamenih soli, koje se otapaju u vodi, a otopina se zatim uparuje. Veoma je star i postupak proizvodnje sladora koji se vodom izlučuje iz sladorne repe, te se takva otopina uparuje. Isparivači se mnogo upotrebljavaju za koncentriranje alkalijских lužina i dobivanje alkalija u krutom obliku, za dobivanje različitih soli iz njihovih otopina (sulfata, karbonata, sulfita, bikromata itd.), u proizvodnji umjetnih gnojiva, za koncentriranje tutkala, želatina, ekstrakta za štavljenje i sl. Isparivači služe i u koncentriranju voćnih i povrtnih sokova i mlijeka, u proizvodnji vitamina C, u preradbi industrijskih otpadnih voda itd.

U isparivačima toplina prelazi s nosioca topline na uparivanu otopinu direktnim dodiranjem ili posredstvom neke stijenke, pri čemu se nosilac topline i otopina ne miješaju. U industrijskoj praksi važnost prvog načina je mala. Oblik i konstrukcija isparivača uvjetovani su svojstvima otopine i nosioca topline, te svojstvom materijala od kojeg je isparivač građen (sl. 1). Prilikom projektiranja isparivača treba obratiti pažnju na režim prijelaza topline, način izdvajanja pare iz tekućine i na što bolje iskorišćivanje energije.

Dio isparivača u kojem se izmjenjuje toplina jest ogrjevna komora, a dio u kojem se para razdvaja od tekućine naziva se parnim prostorom. Para se od tekućine mora nužno odvojiti da bi se spriječilo odnošenje tekućine. U protivnom su neizbježni gubici produkta (krute tvari ili koncentrirane otopine), onečišćenje supare i onečišćenje ili korozija površine na kojoj kondenzira supara. Izdvajanje pare iz tekućine u parnom prostoru naročito je važno kad se kapljice otopine hvataju za stijenke. To zahtijeva upotrebu cirkulacijske pumpe. Ako je cirkulacija nedovoljna, dolazi do odnošenja pare ili čiste tekućine u cirkulacijsku pumpu i ogrjevnu komoru. Djelotvornost isparivača može se ocijeniti prema ekonomičnosti utroška pare, a izražava se u kilogramima supare na kilogram utrošene ogrjevne pare.



Sl. 1. Podjela isparivača

Toplina se troši na zagrijavanje sirovine (otopine) do temperature ključanja, na izdvajanje otapala od produkta i na isparivanje otapala. Utrošak topline za zagrijavanje otopine može se znatno sniziti, ako se snizi temperatura ključanja ili ako se sirovina predgrijava već zagrijanim produktom koji izlazi iz isparivača. Utrošak ogrjevne pare može se najviše sniziti ako se za zagrijavanje upotrebljava supara. Taj se učinak postiže termokompresijom ili primjenom višestepenih isparivačkih stanica.

Pri izboru tipa isparivača, osim režima prijelaza topline, od posebne su važnosti fizička svojstva uparivane otopine i konačnog produkta. Također treba uzeti u obzir mogućnost kristalizacije otopine, eventualnu potrebu uklanjanja pjene ili taloga, promjenu kvalitete produkta i koroziju. Ako je pri uparivanju otopine koja kristalizira potrebno dobiti kristale jednake veličine, izbor isparivača je ograničen. Obično se tada upotrebljava isparivač s prinudnom cirkulacijom otopine. Često se u isparivačima iz otopine izdvajaju kristali koji na ogrjevnoj površini stvaraju talog, pa smanjuju prijelaz topline. Topljivost tih kristala povećava se porastom temperature. Taloženje kristala na stjenkama u isparivaču može se smanjiti ili potpuno spriječiti podizanjem razine otopine koja ključa u isparivaču. Povećanjem temperature smanjuje se topljivost taloga nastalog taloženjem netopljivih soli na ogrjevnoj površini. Stvaranje taloga može se smanjiti ili sasvim izbjeći na isti način kao i stvaranje nakupina kristala. Za uparivanje otopine koja lako kristalizira ili koja daje talog, upotrebljavaju se isparivači u kojima intenzitet cirkulacije ne ovisi o uvjetima ključanja. U isparivačima se pojavljuju i druga onečišćenja u obliku taloga, a stvaraju se kao rezultat korozije, kao naslage pri kondenzaciji para ili se dovode kao krute tvari sa sirovinom. Otopine, čije se otopljene tvari pri povišenim temperaturama razlažu, uparuju se pri nižem tlaku da bi se smanjila temperatura isparivanja. Katkad se isparivači grade od posebnih materijala da bi se izbjeglo onečišćenje produkta ili katalitičko djelovanje nekih materijala. Treba uzeti u obzir djelovanje korozije ako ona znatno smanjuje prijenos topline i zahtijeva primjenu visokokvalitetnih nerđajućih konstrukcijskih materijala. Korozija i erozija obično su mnogo jače u isparivačima nego u ostaloj opremi nekog tehnološkog postrojenja zbog velikih brzina strujanja otopine i pare, česte prisutnosti lebdjećih čestica čvrste tvari u otopini i povećanja koncentracije uparivane otopine.

U industriji se najčešće kao nosilac energije upotrebljava vodena para. Isparivači koji se zagrijavaju vodenom parom gotovo su isključivo cijevni isparivači, u kojima ogrjevnu površinu čine cijevi. Cijevi su obično smještene u snopovima, a katkad mogu biti zmijoliko savijene. Općenito, međutim, cijevi tako savijene nisu prikladne jer kondenzat pokriva veći dio površine, tako da je koeficijent prolaza topline razmjerno malen. Stoga se upotrebljava parni plašt ili grijači elementi s ravnim cijevima.

ZAGRIJAVANJE ISPARIVAČA

Načini zagrijavanja isparivača. Prema izvoru i načinu prijenosa topline isparivači se mogu zagrijavati na različite načine: a) Sunčevim zračenjem; b) neposredno plamenom, vrućim plinovima ili zagrijanim tekućinama; c) posredno plamenom, vrućim plinovima, zagrijanim tekućinama ili električnom strujom provođenjem topline kroz stijenku; d) posredno vodenom parom koja za vrijeme zagrijavanja kondenzira kako bi se iskoristila i entalpija isparivanja. U industrijskoj praksi najčešće se upotrebljava zagrijavanje vodenom parom.

Zagrijavanje Sunčevim zračenjem najčešće se upotrebljava u solanama. Ishlapljivanjem morske vode može se dobiti natrij-klorid, kuhinjska sol (v. *Natrij*), ali i pitka voda ako se vodena para kondenzira na nekoj prikladnoj površini iznad tekućine (najčešće staklo) i kondenzat odvodi u spremnik. Sunčeve se zrake mogu pomoću zrcala i leća koncentrirati i tako povećati brzinu isparivanja ili ishlapljivanja neke otopine.

Isparivanje uz zagrijavanje vrućim plinovima ili tekućinama bez posredstva stijenke većinom je ubrzano ishlapljivanje pri

temperaturi nižoj od vrelišta. Upotrebljava se za koncentriranje korozivnih otopina, za koje se ne može naći stijenka otporna prema koroziji, a dovoljno tanka za dobar prijelaz topline. Kad su za isparivanje potrebne visoke temperature, upotrebljavaju se plinovi izgaranja.

Za zagrijavanje direktnim plamenom u otopinu se stavlja plamenici, u koje se dovodi ogrjevni plin i komprimirani zrak. Njihova se smjesa pali iskrskom električne svjeće. Plamenici se urone na dubinu na kojoj se najbolje izmjenjuje toplina između plamena i tekućine. Tako se, npr., preporučuje da se plamenici promjera 5cm urone u otopinu na dubinu do 25cm, a plamenici promjera 25cm na dubinu 50cm. Taj je način zagrijavanja često mnogo ekonomičniji od zagrijavanja vodenom parom.

Kad se u isparivaču žele postići više temperature, za zagrijavanje se mogu upotrijebiti neke organske tekućine s visokim vrelištima. Takve tekućine, npr. bifenil, difenileter ili njihova smjesa (Dowterm), tada struje kroz ogrjevnu komoru isparivača. S difeniloksidom se pri umjerenim tlakovima mogu postići prilično visoke temperature. Ponekad se kao ogrjevna sredstva mogu upotrijebiti rastopljene soli ili živine pare.

Otopine se mogu zagrijavati električnom strujom, uglavnom pomoću otpornika koji su konstruktivno prilagođeni uvjetima procesa. Zagrijavati se može i induciranom strujom u stijenka isparivača. Električno se zagrijavanje danas upotrebljava samo za manje učine i tada kad njegove prednosti (laka regulacija, čistoća itd.) pokrivaju visoke energetske troškove.

Uređaji su za posredno isparivanje plamenom preko čvrste stijenke jednostavni. Sastoje se od vatrišta i ogrjevne površine, koju s jedne strane zagrijavaju plinovi, a s druge se strane nalazi otopina. Glavni im je nedostatak niska vrijednost koeficijenta prijelaza topline s plina na stijenke isparivača. Takvi su uređaji glomazni, te se u radu s agresivnim otopinama moraju upotrebljavati skupi materijali s manjom mehaničkom i termičkom otpornošću (lijevano željezo). Važan je nedostatak i slaba mogućnost regulacije, što je posljedica velikih toplinskih kapaciteta.

Zagrijavanje vodenom parom najvažniji je način zagrijavanja isparivača. Zbog relativno visokog koeficijenta prijenosa topline mogu se upotrijebiti relativno male ogrjevne površine. Za razliku od plinova izgaranja, koji sa sobom nose pepeo, čađu i druge primjese, vodena je para skoro uvijek čista i ne onečišćuje ogrjevnu površinu. Para se dovodi cijevima od parnog kotla do isparivača, a regulacija količine nosioca energije vrlo je jednostavna. Ako je za isparivanje potrebna samo para niže temperature, može se upotrijebiti para koja je već djelomično ekspandirala u parnoj turbini s oduzimanjem ili u protutlačnoj turbini (v. *Parne turbine*).

Prolaz topline pri isparivanju

Količina topline Q , koja u vrijeme t prijeđe s nekog medija (tekućine ili plina) temperature ϑ_2 na neki drugi medij temperature ϑ_1 kroz površinu A , može se definirati na slijedeći način:

$$Q = k A \Delta\vartheta t, \quad (1)$$

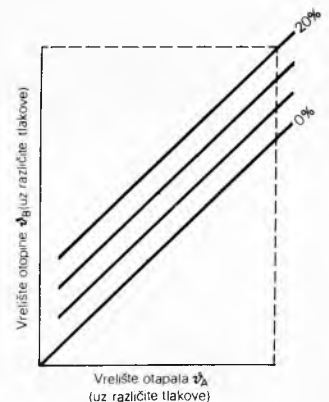
gdje je $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$, a k je koeficijent prolaza topline. U operaciji isparivanja najčešće se radi o prijelazu topline s ogrjevnog medija na otopinu posredstvom neke čvrste stijenke. U ukupnom prolazu topline valja razlikovati prijenose topline s ogrjevnog medija na stijenku i sa stijenke na otopinu, koji su karakterizirani koeficijentima prijenosa topline α_1 i α_2 , te provođenje topline kroz stijenku, koje ovisi o debljini stijenke x i koeficijentu vodljivosti λ . Vrijednost koeficijenta prolaza topline dobiva se iz izraza:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2)$$

Na temelju jednadžbe (1) koeficijent prolaza topline može se eksperimentalno odrediti na temelju predane količine topline Q i temperaturne razlike $\Delta\vartheta$ između ogrjevnog medija i otopine.

Tako određeni koeficijent vrijedi, međutim, samo za isparivanje u nekom određenom uređaju. Općenito, određivanje koeficijenta prolaza topline, a pomoću toga i topline potrebne za isparivanje, vezano je uz poznavanje koeficijenata α i λ . Često je njihovu točnu vrijednost vrlo teško ili nemoguće eksperimentalno odrediti. Isto je tako teško odrediti i točnu temperaturnu razliku $\Delta\vartheta$ između ogrjevnog medija i otopine.

Temperatura zasićene vodene pare, koja se najčešće upotrebljava kao ogrjevni medij, može se vrlo točno odrediti na temelju mjerenja njenog tlaka. Međutim, na temelju mjerenja tlaka otapala (supare) u parnom prostoru iznad otopine dobit će se samo približna vrijednost temperature otopine, pa se pomoću tako dobivene temperaturne razlike može izračunati samo tzv. prividni koeficijent prijelaza topline. Razlozi za netočnost određivanja su u tome što je vrelište otopine više zbog prisutnosti otopljenih tvari i zbog povećanog hidrostatskog tlaka u dubljim slojevima otopine. Zbog toga bi za određivanje točne prosječne temperature otopine trebalo mjeriti temperaturu na vrlo mnogo različitih mjesta u otopini. To je, naravno, u praksi neizvedivo, ali se prividni koeficijent prijelaza topline može ponekad korigirati. Tako se, npr., primjenom Dühringova pravila može ocijeniti ovisnost povišenja vrelišta otopine o koncentraciji. Ustanovilo se, naime, da pri različitim tlakovima vrelišta čistog otapala prema vrelištima otopine pokazuju linearnu ovisnost. Mjerenjem tlaka otapala u parnom prostoru iznad otopine i poznavanjem ovisnosti vrelišta otapala o tlaku moguće je, prema tome, odrediti povišenje vrelišta otopine uz bilo koji tlak u parnom prostoru. Ako je, npr., iznad otopine izmjeren tlak para otapala, uz koji bi čisto otapalo klučalo na temperaturi ϑ_A , vrelište 20%-tne otopine bit će na temperaturi ϑ_B (sl. 2).



Sl. 2. Povišenje vrelišta otopina različitih koncentracija s obzirom na čisto otapalo uz različite tlakove

Prijenos topline od vrućih plinova na ogrjevnu stijenku. U tehnici isparivanja direktnim se loženjem zagrijavaju uglavnom kotlovi i tave. Kako je toplinska vodljivost plinova znatno niža od vodljivosti tekućina, toplinski je otpor plina veći, pa je to ograničavajući faktor za prijenos topline. Zbog toga je za izračunavanje prijenosa topline prilikom zagrijavanja vrućim plinovima naročito važno poznavati koeficijent prijenosa topline od plina na stijenku. Prema A. Schacku i Z. Rantu za prijenos topline od vrućih plinova koji struje u kanalu kružnog presjeka na stijenku kanala, taj se koeficijent izračunava iz izraza:

$$\alpha = \left(3,60 + 0,22 \frac{\vartheta}{100} \right) \frac{w^{0,75}}{d^{0,25}}, \quad (3)$$

gdje je ϑ temperatura vrućih plinova, w srednja brzina strujanja plinova izgaranja u normalnim okolnostima, a d unutrašnji promjer kanala. Tako izračunatom koeficijentu mora se pridodati i koeficijent prijenosa topline zračenjem da bi se dobio ukupni koeficijent prijenosa topline od vrućeg plina na stijenku kanala.

Prijenos topline od vodene pare na ogrjevnu stijenku. Vodena para ulazi u ogrjevni prostor obično u zasićenom stanju, rjeđe kao slabo pregrijana para. Na vanjskoj površini ogrjevnih cijevi para kondenzira i predaje toplinu stijenka cijevi.

Kondenzat se sakuplja na dnu ogrjevnog prostora i odatle se odvodi.

Ako kondenzat (voda) kvasi stijenku cijevi, on se pojavljuje kao tanki sloj. To je kondenzacija u obliku tankog filma kondenzata (tzv. filmska kondenzacija). Ako tekućina ne kvasi stijenku, na površini stijenke stvaraju se sitne kapljice tekućine. To je kapljičasta kondenzacija. Te kapljice padaju sa stijenke ili se slijevaju niz nju. Veći dio površine takve stijenke stalno je *gol*, pa vodena para može svoju toplinu predati stijenci neposredno i toplina ne mora, kao u filmskoj kondenzaciji, proći kroz film kondenzirane pare. Zbog toga je u kapljičastoj kondenzaciji prijenos topline intenzivniji.

W. Nusselt je izveo teorijske relacije za određivanje koeficijenta prijenosa topline između čiste zasićene vodene pare i hladne površine. On je pretpostavio da po cijeloj debljini filma kondenzata postoji laminarno gibanje uz rashladnu površinu, koje uzrokuje sila gravitacije, a zanemario je mogući utjecaj brzine strujanja vodene pare na debljinu filma kondenzata. Uz postavku da je brzina kondenzata uz stijenku jednaka nuli, a na granici između kondenzata i pare maksimalna, dobivene su teorijske jednadžbe za debljinu filma kondenzata u nekoj točki površine. Uz pretpostavku da je razlika temperatura pare i stijenke u svim točkama konstantna, dobiva se izraz za srednji koeficijent prijenosa topline, koji za okomite cijevi iznosi:

$$\alpha = 0,943 \left| \frac{q^2 g r \lambda^3}{l(\vartheta_p - \vartheta_{st})\mu} \right|^{0,25} \quad (4)$$

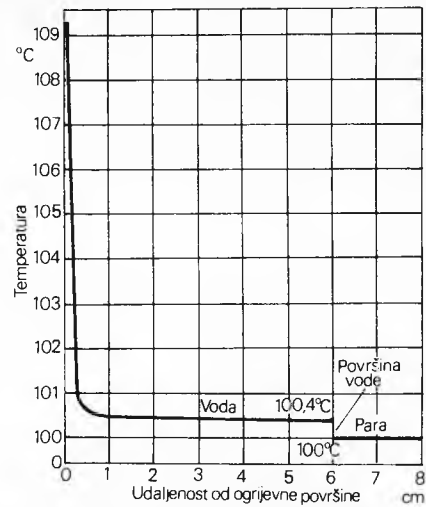
gdje je q gustoća kondenzata, g ubrzanje sile gravitacije, r entalpija kondenzacije, λ koeficijent toplinske vodljivosti kondenzata, l duljina cijevi, ϑ_p temperatura zasićene pare, ϑ_{st} temperatura na površini cijevi, a μ dinamička viskoznost kondenzata. Eksperimentalno je utvrđeno da se dobivaju točniji rezultati ako se u jednadžbu uvrsti koeficijent 1,13 umjesto 0,943. Za vodoravne cijevi konstanta se mijenja u 0,725, a umjesto duljine u jednadžbu se uvrštava promjer cijevi. Najveći je problem odrediti temperaturu na stijenci.

Koeficijenti prijenosa topline pri kapljičastoj kondenzaciji mogu biti i dvadeset puta veći od onih koje daje Nusseltova jednadžba (4). Međutim, kapljičasta kondenzacija nastupa samo onda kada se na površini cijevi nalazi neka tvar koja sprečava kvašenje, kao što su masne kiseline i mineralna ulja. U praksi se mora računati s filmskom, odnosno mješovitom kondenzacijom, kojoj je koeficijent prijenosa topline reda veličine $5800 \dots 11500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Prijenos topline s ogrjevne stijenke na otopinu. Isparivanje tekućine ključanjem odvija se na graničnoj površini između tekućine i nastale pare. Para se najčešće pojavljuje u obliku mjehurića koji se stvaraju na za njih najpovoljnijim mjestima na ogrjevnoj površini. Kad mjehurići pare dostignu određenu veličinu, odvajaju se od ogrjevne površine i dižu kroz tekućinu. U tzv. lokalnom ključanju mjehurići isčeznu prije nego što stignu do površine tekućine, jer tekućini nije dovedeno dovoljno topline da u cijelom svom volumenu postigne temperaturu ključanja. U tzv. ključanju sa čistim isparivanjem mjehurići stižu do površine tekućine.

Uz ogrjevnu površinu postoji tanki granični sloj tekućine kojoj se temperatura naglo smanjuje s povećanjem udaljenosti od te površine (sl. 3). Debljina toplinskog graničnog sloja ovisi o toplinskom toku, tlaku, obliku ogrjevne površine i fizičkim karakteristikama tekućine. Mjehurići pare stvaraju se uglavnom na mjestima, gdje im je već u zametku osiguran makar i neznatan polumjer zakrivljenosti. Takva se mjesta nalaze na ogrjevnoj površini punoj mikroskopskih uvala i grebena. Na takvim mjestima dovoljno je da se tekućina pregrije nekoliko stupnjeva iznad vrelišta da bi se dobio potreban pretlak pare za zametak mjehurića. Ta se mjesta nazivaju kljajalištima mjehurića. Sitne čestice nečistoća u tekućini mogu djelovati kao kljajališta. Stvaranje mjehurića olakšava i prisutnost mjehurića drugog plina, koji služe kao jezgre za njihovo stvaranje. Uočeno je, naime, da je razlika temperatura između ogrjevnog medija i tekućine, koja je dovoljna za ključanje, najmanja na početku ključanja. Plinovi, koji su na po-

četku ključanja adsorbirani na ogrjevnoj površini, olakšavaju stvaranje mjehurića pare sve dok se s njima postepeno ne udalje iz otopine.



Sl. 3. Primjer toplinskog graničnog sloja u isparivaču u obliku spremnika

Nastali mjehurić raste zbog isparivanja pregrijane tekućine. Kad mjehurić dovoljno naraste, odvaja se od ogrjevne površine i diže kroz tekućinu. Na istom se mjestu stvaraju novi mjehurići, kojima frekvencija stvaranja ovisi o toplinskom opterećenju ogrjevne površine. U toku dizanja mjehurića kroz tekućinu njegov volumen raste, jer se nastavlja isparivanje tekućine u mjehurić s njegove površine. Pretežni dio pare u mjehuriću nastaje upravo za vrijeme njegovog gibanja prema površini tekućine. Veličina mjehurića u času odvajanja od ogrjevne površine ovisi o površinskoj napetosti tekućine, o uzgonu mjehurića kroz tekućinu i o kvasivosti površine, koja je određena vrstom tekućine i stanjem ogrjevne površine, njenim onečišćenjima, hrapavošću itd. Na odvajanje mjehurića od ogrjevne površine znatan utjecaj ima sila tromosti, koja se javlja zbog naglog, gotovo eksplozivnog širenja mjehurića i s tim povezanog potiskivanja tekućine. Rast mjehurića u tekućini koja se ne nalazi uz ogrjevnu površinu otežan je zbog površinske napetosti tekućine.

Na prijenos topline utječu mnogi faktori. Za bolji prijenos topline veoma je važno da tekućina koja isparuje dobro kvasi ogrjevnu površinu. Tada će se mjehurići nastale pare stiskati uz ogrjevnu površinu i lako se od nje odvajati. Nasuprot tome, ako tekućina slabo kvasi ogrjevnu površinu, mjehurići nastale pare rastegnuti će se po površini i odvajati se od nje tek kad poprime relativno veliki volumen. Mjehurići pare tada otežavaju prijenos topline s ogrjevne površine na tekućinu, jer je koeficijent prijenosa topline pare malen. Tako je, npr., koeficijent prijenosa topline s ogrjevne stijenke na živu 10...20 puta manji od koeficijenta prijenosa topline s ogrjevne površine na vodu uz jednako toplinsko opterećenje i tlak.

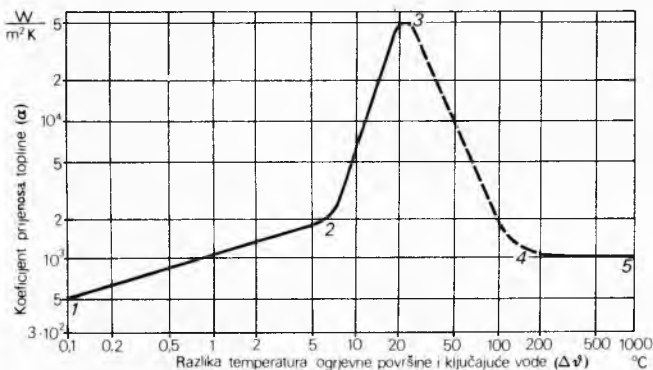
Na prijenos topline utječu i primjese u uparivanoj tekućini. Vodene otopine imaju obično niže vrijednosti koeficijenta prijenosa topline nego čista voda. Povećanjem viskoziteta čistih tekućina ili otopina koeficijent prijenosa topline također se smanjuje. Prijenos topline povećava se i smanjenjem površinske napetosti. Tako, npr., dodatak male količine (1%) sulfonafola smanjuje površinsku napetost za ~45%, a vrijednost koeficijenta prijenosa topline povećava se za ~23%.

Položaj ogrjevne površine utječe na koeficijent prijenosa topline time što uvjetuje opći karakter strujanja ključajuće tekućine. Miješanjem tekućine povećava se prijenos topline pri malom toplinskom opterećenju. Pri velikom toplinskom opterećenju formiranje i podizanje pare pobuđuje prirodno burno miješanje tekućine. Tada je utjecaj umjetnog miješanja na prijenos topline neznatan.

Na ključanje i isparivanje utječe i strujanje tekućine uzduž ogrjevne površine. U isparivačima s parnim plaštem tekućina

se zagrijava uz ogrjevnu površinu, postaje lakša i diže se, pa se toplina prenosi samo slobodnom konvekcijom. U cijevnim isparivačima do ključanja dolazi na stijenka cijevi kroz koje struji tekućina. Toplina se tada prenosi prinudnom konvekcijom, pa brzina strujanja tekućine u cijevi utječe na rast i otkidanje mjehurića od ogrjevne površine.

Koeficijent prijenosa topline α s ogrjevne površine na ključajuću tekućinu ne pokazuje linearnu ovisnost o njihovoj razlici temperatura $\Delta\vartheta$. Pri slabijim toplinskim opterećenjima i manjim razlikama temperature parnih mjehurića gotovo nema, a isparivanje se odvija na slobodnoj površini tekućine u parni prostor iznad nje (dio krivulje 1—2, sl. 4). Prijenos topline od ogrjevne površine do slobodne površine tekućine odvija se prirodnom konvekcijom. Povećanjem toplinskog opterećenja raste temperaturna razlika a time i broj mjehurića, a pojavljuju se i mjehurići pare, koji povećavaju cirkulaciju ključajuće tekućine. Zbog toga se povećava i koeficijent prijenosa topline (dio krivulje 2—3). Zbog ograničene brzine dizanja mjehurića kroz tekućinu, ogrjevna površina prekriva se postepeno slojem pare, pa mjehurasto isparivanje prelazi u isparivanje u tankom sloju (filmu). Budući da para ima nižu toplinsku vodljivost od tekućine, bitno je otežan prijenos topline, pa se koeficijent prijenosa topline znatno smanjuje (dio krivulje 3—4). Konačno se stvori skoro neprekinuti sloj pare između tekućine i ogrjevne površine, koji zbog loše toplinske vodljivosti pare djeluje kao toplinska izolacija (dio krivulje 4—5). Parni sloj je nestabilan te se iz njega stalno odvajaju veliki mjehurići pare nepravilnog oblika i putuju prema površini tekućine. Kako se toplina potrebna za isparivanje mora dovesti s ogrjevne površine kroz toplinski slabo vodljiv sloj pare, potrebno je ogrjevnu površinu jako pregrijati. Pri tom se dio topline prenosi i zračenjem s ogrjevne površine, kroz paru na tekućinu koja se isparuje.

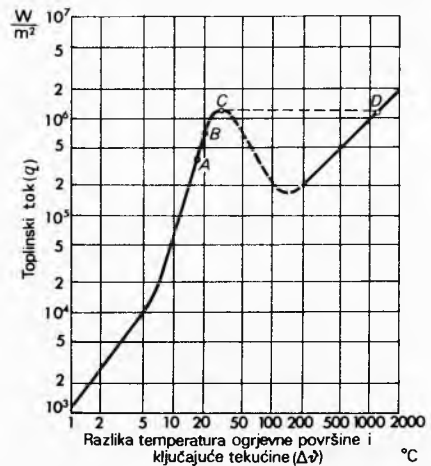


Sl. 4. Ovisnost koeficijenta prijenosa topline α o razlici temperatura ogrjevne površine i ključajuće vode

Na sličan način, kao i koeficijent prijenosa topline, ovisi i toplinski tok (količina topline prenesena kroz jediničnu površinu u jedinici vremena) o temperaturnoj razlici između stijenke i otopine (sl. 5). Povećanjem temperaturne razlike ne raste nužno uvijek i toplinski tok. Normalno pogonsko stanje visokopterećene ogrjevne površine varira zbog neizbježnih promjena u pogonu između točaka A i B. Ako su te promjene velike (iznad točke C), toplinski tok će opasti. Nakon toga može se toplinski tok povećati samo velikim povišenjem temperaturne razlike (točka D). U točki D doći će do progorivanja pogona. Zbog toga je u tehnici isparivanja neobično važno poznavati maksimum na krivulji ovisnosti koeficijenta prijelaza topline o temperaturnoj razlici.

Isparivanje je tekućine u cijevima grijanim izvana složen proces. Tekućina, koja ranije nije bila predgrijana, počinje se zagrijavati nakon ulaska u cijev. Toplina se kroz tekućinu prenosi konvekcijom. Temperatura vrelišta ovisi o hidrostatskom tlaku. Dovođenjem topline, kad već započne ključanje, prvo se stvaraju mjehurići pare, koji se zatim spajaju i poprimaju sve veći volumen, tako da sve više ispunjavaju cijev. Ako je tekućina bila predgrijana prije ulaska u cijev, ubrzo se stvaraju mjehurići pare i tekućina ključa po cijeloj dužini cijevi. Smjese

pare i tekućine diže se kroz okomite cijevi zbog podizanja mjehurića pare. Povećanjem dužine okomitih cijevi može se do neke granice povećati brzina strujanja otopine, koja znatno utječe na vrijednost koeficijenta prijenosa topline.

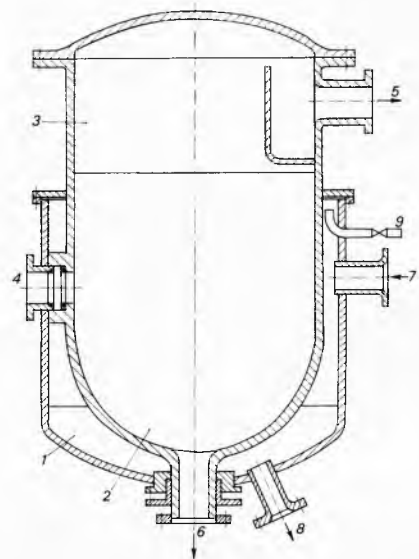


Sl. 5. Ovisnost toplinskog toka q o razlici temperatura ogrjevne površine i ključajuće tekućine

Razdvajanje smjese pare i tekućine ovisi o količini pare u tekućini. Ako je znatan udio pare u cijevi, odvojit će se potpuno od tekućine, te će para i tekućina samostalno strujati kroz cijev. U vodoravnim ili kosim cijevima para struji iznad tekućina, u okomitim cijevima para se diže kroz središnji dio cijevi, a tekućina struji uz stijenku.

VRSTE ISPARIVAČA

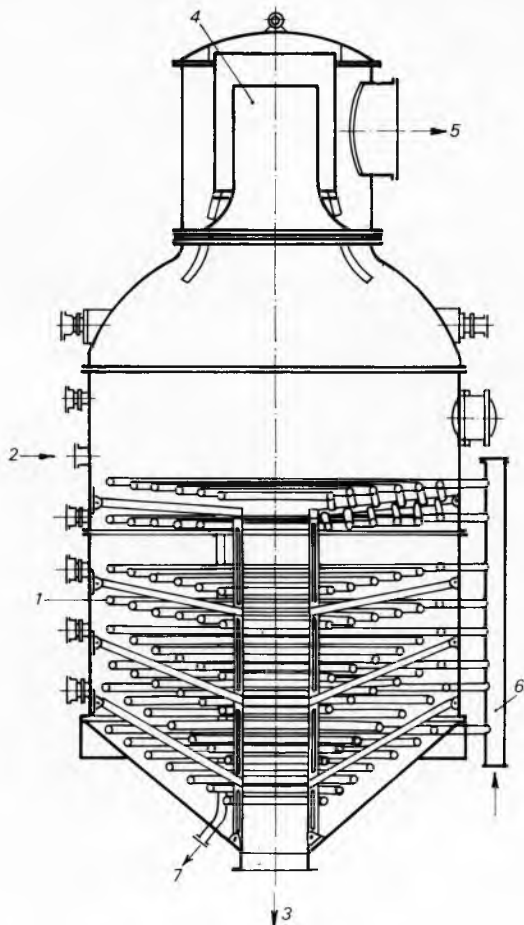
Isparivač s parnim plaštem. Isparivač s parnim plaštem (sl. 6) ima oblik okomitog cilindra, oko kojeg je obavijen parni plašt. Takvi isparivači rade diskontinuirano, a mogu biti otvoreni (atmosferski tlak) ili zatvoreni (podtlak). U nekim isparivačima s plaštem ugrađena je miješalica pomoću koje se struže talog sa stijenki. Nedostaci su im periodičnost u radu, nizak stupanj energetske korisnosti, mali kapacitet, velika težina i količina materijala utrošenog za njihovu konstrukciju. Zbog tih nedostataka takvi se isparivači ne izrađuju serijski.



Sl. 6. Isparivač s parnim plaštem. 1 parni plašt, 2 prostor za otopinu, 3 parni prostor, 4 staklo za promatranje, 5 izlaz supare, 6 izlaz koncentrirane otopine, 7 ulaz ogrjevne pare, 8 izlaz kondenzata, 9 izlaz plinova iz parnog plašta

Isparivač sa zmijolikim cijevima. Isparivač s ogrjevnom površinom u obliku zmijolikih cijevi (sl. 7) složene je kon-

strukcije. Njegov stupanj energetske korisnosti bolji je nego u isparivaču s plaštem. Taj uređaj nije prikladan za uparivanje otopina koje kristaliziraju, jer se ogrjevna površina teško čisti od nataloženih kristala. U užim zmijolikim cijevima otežan je odvod kondenzata, pa se stvaraju parni čepovi. Montaža tih isparivača je složena, a zahtijevaju i česti remont. Upotrebljavaju se za uparivanje agresivnih tekućina, a stijenke isparivača izrađuju se iz materijala otpornih na djelovanje tih tekućina.



Sl. 7. Isparivač sa zmijačom. 1 cijevi zmijače, 2 ulaz rijetke otopine, 3 izlaz koncentrirane otopine, 4 hvatač kapljica, 5 izlaz supare, 6 kolektor ogrjevne pare, 7 izlaz kondenzata

Isparivač s okomitim kratkim cijevima. Taj tip isparivača (sl. 8) jedan je od najstarijih u industrijskoj praksi. Prvi ih je konstruirao N. Robert 1850. godine, pa se veoma često u praksi takvi uređaji nazivaju Robertovim isparivačima. Danas se upotrebljavaju naročito u industriji šećera.

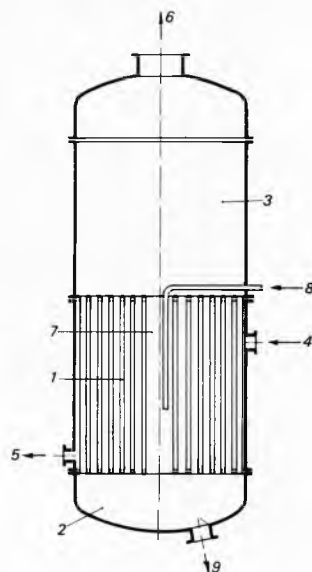
Ogrjevnu komoru tih isparivača tvori okomiti snop cijevi promjera 50-58 mm i duljine 1,2-1,8 m. Ispod snopa cijevi nalazi se dno uređaja, koje može biti konično, plosnato itd. Iznad ogrjevne komore nalazi se cilindrični parni prostor. Otopina, koju treba koncentrirati, nalazi se u dnu aparata i u cijevima. Otopina u cijevima ključa zbog zagrijavanja cijevi vodenom parom. Vodena se para kondenzira na vanjskoj površini cijevi, a kondenzat se odvodi iz ogrjevnog prostora. Prilikom dizanja kroz cijevi supara povlači sa sobom i tekućinu, od koje se separira u parnom prostoru. Supara izlazi kroz gornji otvor, a otopina se kroz središnju povratnu cijev vraća u dno isparivača i ponovno ulazi u ogrjevne cijevi. Tako u isparivaču nastaje intenzivna prirodna cirkulacija otopine, koja povoljno utječe na prijelaz topline u ogrjevnoj komori. Rijetka otopina, koju treba koncentrirati u isparivaču, ulazi kroz otvor, koji se može nalaziti na različitim mjestima na isparivaču. Koncentrirana otopina odvodi se kroz otvor na dnu isparivača.

Da se održi ravnomjerna cirkulacija otopine kroz isparivač, površina presjeka središnje povratne cijevi mora biti

jednaka zbroju površina presjeka svih cijevi za isparivanje. Intenzitet prinudne cirkulacije i vrijednost koeficijenta prijelaza i prolaza topline u isparivačima tog tipa ovisi o razini tekućine u cijevima. Najviše vrijednosti tih koeficijenata postižu se kad je razina smjese pare i tekućine približno na polovici visine cijevi. Snižanjem te razine stijenke se cijevi nepotpuno moče, lakše se onečišće, i smanjuje se brzina isparivanja.

Cirkulacija u standardnim isparivačima s kratkim cijevima ovisi o uvjetima ključanja otopine. Kad se ključanje prekine, talože se čvrste čestice koje lebde u otopini. To je razlog što se aparati tog tipa rijetko primjenjuju za isparivanje uz kristalizaciju. Taj se nedostatak može znatno smanjiti ako se u cirkulacijsku cijev postavi propelerna miješalica. Propeler se postavlja što moguće niže da bi se smanjila kavitacija. Upotrebom miješalice kapacitet isparivača može se udvostručiti. U donjem dijelu isparivača može se tada postaviti odvojak za odvođenje kristala soli. Da se izbjegne taloženje soli prilikom uparivanja otopina koje kristaliziraju, razina tekućine u isparivaču treba biti znatno iznad gornjeg ruba cijevi.

Prednosti isparivača s okomitim kratkim cijevima jesu visoki koeficijent prolaza topline pri velikoj razlici temperature između ogrjevne stijenke i otopine, lako čišćenje od kamenca i drugih taloga te niska proizvodna cijena. Glavni su im nedostaci slabi prolaz topline pri malim temperaturnim razlikama i niskoj temperaturi ključanja, slab prolaz topline pri uparivanju viskozih tekućina, velika ogrjevna površina i težina, te relativno dugo zadržavanje produkta u isparivaču.



Sl. 8. Isparivač s okomitim kratkim cijevima. 1 ogrjevna komora, 2 dno, 3 parni prostor, 4 ulaz ogrjevne pare, 5 izlaz kondenzata, 6 izlaz supare, 7 cijev za povrat otopine, 8 ulaz rijetke otopine, 9 izlaz koncentrirane otopine

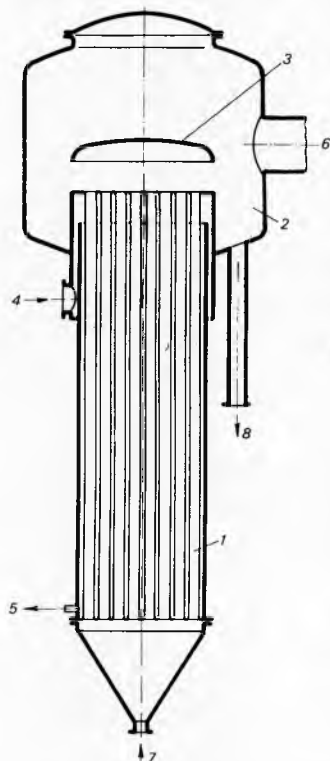
Isparivači s okomitim kratkim cijevima primjenjuju se za koncentriranje čistih otopina, dobivanje kristalnog produkta (ako se radi s miješalicom), koncentriranje neagresivnih ili slaboagresivnih tekućina i koncentriranje otopina koje gotovo ne stvaraju talog i koji se može mehanički skinuti s ogrjevne površine.

Isparivač s okomitim dugim cijevima. U tom se isparivaču postiže uspješnije isparivanje otapala zahvaljujući dugim cijevima i relativno visokim koeficijentima prijelaza topline. Sastoji se od relativno velike ogrjevne komore i malog parnog prostora (sl. 9). Obično se razina tekućine u parnom prostoru ne održava konstantnom, a vrijeme zadržavanja otopine u aparatu iznosi svega nekoliko sekunda. Promjer je okomitih cijevi najčešće 50 mm, ali može biti i <20 mm. Duljina cijevi iznosi 6-10,5 m. Za razliku od isparivača s okomitim kratkim cijevima, otopina samo jednom prolazi cijevima kroz ogrjevnu komoru. Rijetka otopina ulazi u cijevni snop s donje strane. Smjesa pare i otopine separira se u posudi za separaciju.

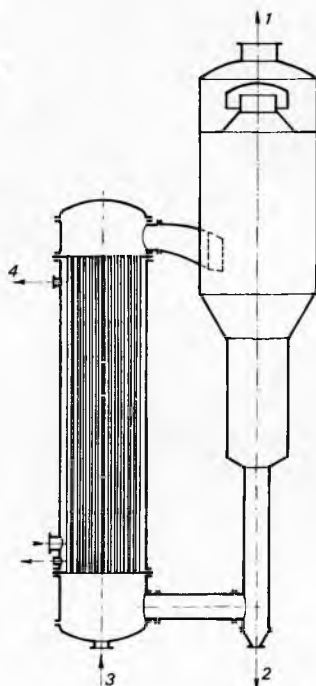
U isparivačima tog tipa mogu se, npr., koncentrirati lužine. Tako se pri 37°C iz 50%-tne natrijeve lužine s ulaznom temperaturom od 150°C dobiva skoro bezvodna lužina u isparivaču s niklenim cijevima duljine 6 m i vanjskog promjera

22mm. Naročito je važna primjena tih isparivača u industriji papira za uparivanje lužina u natronskom postupku.

Veću brzinu cirkulacije moguće je postići u isparivačima koji se upotrebljavaju u industriji mlijeka (sl. 10). U njima je povećan parni prostor i koncentrirana tekućina kaplje s njihovog donjeg dijela. Temperatura otopine pri prolazu kroz cijev nije stalna. U donjem dijelu cijevi otopina obično proključa. Kako je brzina nadolazeće otopine veoma niska, nizak je i koeficijent prolaza topline u zoni ključanja. Podižući se kroz cijev otopina ključa, pri čemu se od točke ključanja temperatura u cijevi počinje smanjivati jer se snizuje statički tlak i dolazi do gubitaka zbog trenja i ubrzanja. Na gornjem kraju cijevi smjesa pare i tekućine dostiže temperaturu koja je jednaka temperaturi u parnom prostoru.



Sl. 9. Isparivač s dugim okomitim cijevima. 1 ogrjevna komora, 2 suparni prostor, 3 naletni zastor, 4 ulaz ogrjevne pare, 5 izlaz kondenzata, 6 izlaz supare, 7 ulaz rijetke otopine, 8 izlaz koncentrirane otopine

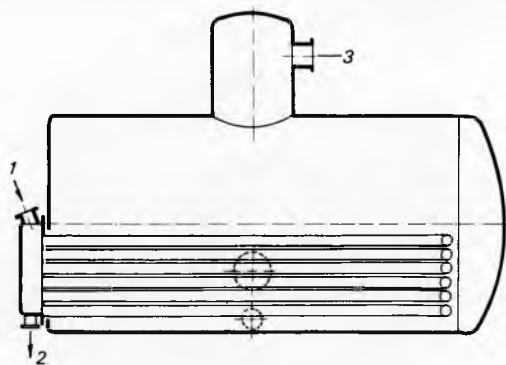


Sl. 10. Isparivač s dugim okomitim cijevima i vanjskom ogrjevnom komorom, 1 izlaz supare, 2 izlaz koncentrirane otopine, 3 ulaz rijetke otopine, 4 odzračivanje

faza u smjesi pare i tekućine zbog smanjenja površinske napetosti. Na taj se način povećava temperatura ključanja otopine (sl. 11). Brzina strujanja tekućine povećava se skoro do brzine pare, što uzrokuje povećanje pada tlaka u cijevi. Ako se količina površinski aktivnih tvari povećava, raste koeficijent prolaza topline i do 100%, a smanjuje se temperaturna razlika između stijenke i otopine; sve to utječe da je za isti kapacitet potrebna manja ogrjevna površina.

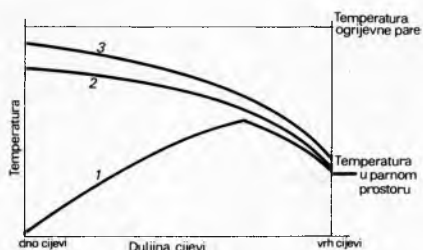
Isparivač s vodoravnim cijevima. Taj se isparivač sastoji od položene cilindrične posude (sl. 12). U donjem dijelu posude, u koju se puni otopina, nalazi se horizontalni cijevni sustav u obliku slova U. Krajevi tih cijevi uvaljani su u cijevnu stijenku. Na vanjskoj strani cijevne stijenke nalaze se dvije komore koje su međusobno povezane U-cijevima. U jednu komoru ulazi vodena para, a u drugoj se skuplja njen kondenzat. Cijevni sustav može se izvući radi čišćenja ili pregleda. Isto tako postoji mogućnost da se upotrijebe ravne cijevi uvaljane u cijevne stijenke na dva kraja bubnja. Tada je moguće otklanjanje kamenca i bez izvlačenja cijevi.

Prednosti isparivača s vodoravnim cijevima jesu velika ogrjevna površina i veliki koeficijent prolaza topline. Primjenjuju se za uparivanje otopina iz kojih se ne izdvajaju soli i ne stvara kamenac. Za takve se otopine mogu upotrijebiti uređaji s U-cijevima.



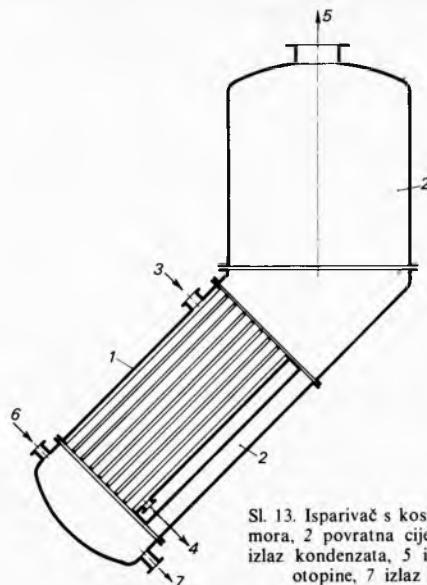
Sl. 12. Isparivač s vodoravnim cijevima. 1 ulaz ogrjevne pare, 2 izlaz kondenzata, 3 izlaz supare

Isparivač s kosim cijevima. Ti su uređaji slični isparivačima s okomitim kratkim cijevima, ali im ogrjevna komora ima kosi položaj (sl. 13). Razlika je u tome što se povratna cijev nalazi izvan ogrjevnog sustava, pa se ne grije. To je povoljnije, jer se u cijevi ne stvaraju mjehurići pare koji bi dizanjem ometali protivno strujanje otopine. Rijetka otopina dovodi se u uređaj neposredno ispod cijevi, a gusta se otopina oduzima ispod povratne cijevi. Zbog kosog položaja ogrjevne komore i



Sl. 11. Promjena temperature otopine u toku isparivanja u cijevima. 1 otopina koja ne ključa na ulazu u cijev, 2 otopina koja ključa na ulazu u cijev, 3 otopina koja ključa na ulazu u cijev (sadrži 0,01% površinski aktivne tvari)

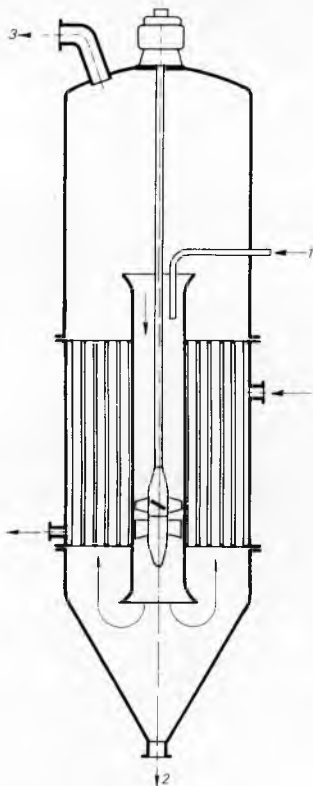
Smanjenjem temperaturne razlike snizuje se i koeficijent prolaza topline. Položaj točke ključanja otopine u cijevima ovisi o uvjetima rada, fizičkim svojstvima sirovine i njevoj ulaznoj temperaturi, o brzini ulaza u isparivač i o toplinskom opterećenju (količini topline prenesenoj u jedinici vremena kroz jedinicu površine). Ako se u sirovinu doda neznatna količina (0,01%) površinski aktivne tvari, stvara se tješnja veza između



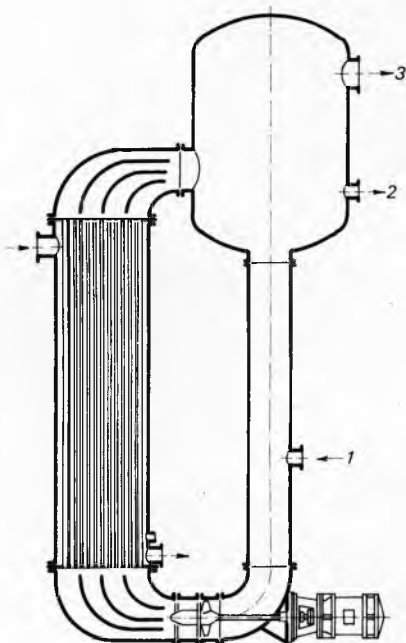
Sl. 13. Isparivač s kosim cijevima. 1 ogrjevna komora, 2 povratna cijev, 3 ulaz ogrjevne pare, 4 izlaz kondenzata, 5 izlaz supare, 6 ulaz rijetke otopine, 7 izlaz koncentrirane otopine

izdvojene cirkulacijske cijevi olakšano je čišćenje i održavanje uređaja.

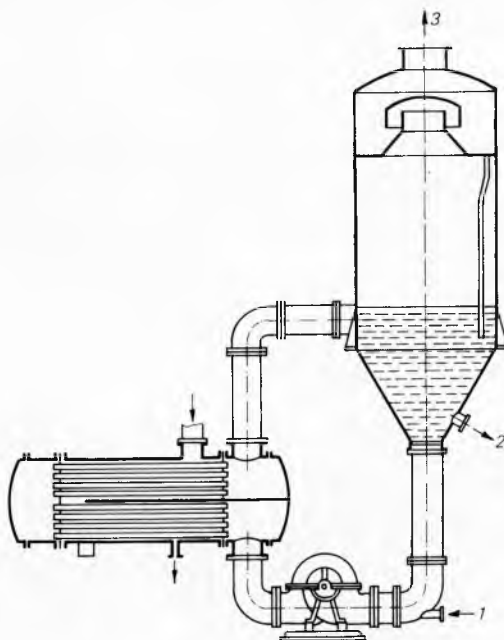
Isparivač s prinudnom cirkulacijom. U do sada opisanim isparivačima otopina prirodno cirkulira kroz elemente za zagrijavanje. Brzina cirkulacije ovisi o konstrukciji uređaja i pogonskim uvjetima. Ako je iz bilo kojeg razloga poželjno ili potrebno postići veću brzinu cirkulacije nego što je pruža prirodna cirkulacija, primjenjuje se prinudna cirkulacija uključivanjem cirkulacijske pumpe u optok otopine.



Sl. 14. Isparivač s prinudnom cirkulacijom. 1 ulaz rijetke otopine, 2 izlaz koncentrirane otopine, 3 izlaz supare



Sl. 15. Isparivač s prinudnom cirkulacijom, vanjskom ogrjevnom komorom i okomitim cijevima. 1 ulaz rijetke otopine, 2 izlaz koncentrirane otopine, 3 izlaz supare



Sl. 16. Isparivač s prinudnom cirkulacijom, vanjskom ogrjevnom komorom i vodoravnim cijevima. 1 ulaz rijetke otopine, 2 izlaz koncentrirane otopine, 3 izlaz supare

Isparivači s prinudnom cirkulacijom otopine mnogo se primjenjuju u industrijskoj proizvodnji. U optok otopine u tim isparivačima ugrađuje se cirkulacijska pumpa (sl. 14). Cirkulacija otopine pumpom se održava konstantnom, ne ovisi o brzini isparivanja, te su zbog toga takvi isparivači vrlo pogodni za uparivanje otopina koje pri tome kristaliziraju. Brzina je strujanja otopine u cijevima od $1,2\text{ms}^{-1}$ (za otopine soli koncentracije $>5\%$ u bakrenim ili mesinganim cijevima) do 3ms^{-1} (za slabo lužnate otopine u niklenim cijevima). Ako korozija ne ubrzava eroziju, brzine mogu biti i veće.

U isparivačima s prinudnom cirkulacijom mogu se dobiti visoke vrijednosti koeficijenta prolaza topline. Većina isparivača s prinudnom cirkulacijom ima vanjsku ogrjevnu komoru koja je smještena ispod linije punjenja. Često je u isparivačima tog tipa ogrjevna komora vodoravna, a okomita se upotrebljava kad to dozvoljava visina prostorije. U okomitim komorama (sl. 15) gubici zbog trenja obično su manji, lakše se čiste i zamjenjuju cijevi.

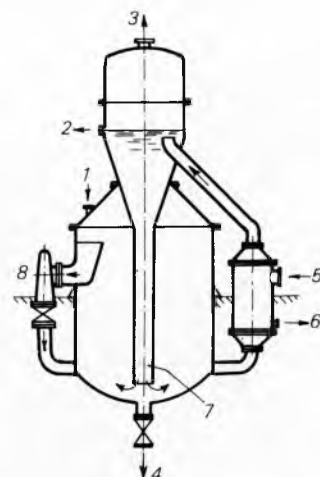
Konstrukcija parnog prostora ovisi o svojstvima produkta. To katkad može biti jednostavni centrifugalni separator ili kristalizacijska komora. Isparivač koji se često primjenjuje u proizvodnji kuhinjske soli konstruiran je tako da otopina s kristalima cirkulira kroz cijeli uređaj (sl. 16). Ako se, npr., kao sirovina upotrebljava otopina zasićena s NaCl i CaSO_4 , mali kristali CaSO_4 s primjesama NaCl lebde u otopini i miješaju se u isparivaču sa svježom otopinom, pa služe kao središta kristalizacije.

U isparivaču za kristalizaciju (sl. 17) otopina se zagrijava, uparuje i kristalizira u odvojenim prostorima. Kristali-

zirana čvrsta tvar lebdi u otopini u komori koja je smještena ispod parnog prostora. Taj je tip isparivača prilagođen za rast krupnog kristala.

U isparivačima s prinudnom cirkulacijom, tlak cirkulacijske pumpe mora biti toliki da se svladaju hidraulički otpori koji nastaju kad je ulaz sirovine iz suprotnog smjera u parnoj komori smješten iznad razine tekućine. Pad tlaka zbog trenja povezan je s ključanjem ili turbulencijom u parnom prostoru. Cirkulacija otopine može biti znatno otežana ako para dospije u usisni cjevovod pumpe. To se dešava kad se siše tekućina slabo separirana od pare ili kad se stvaraju vrtlozi pri priključcima na usisni cjevovod pumpe.

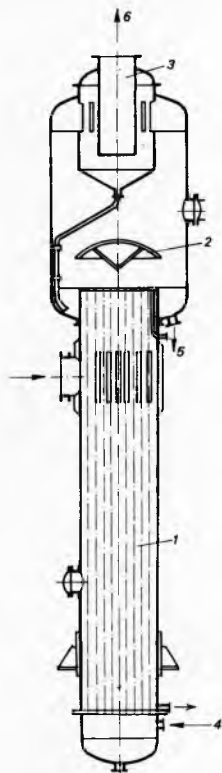
Glavne prednosti isparivača s prinudnom cirkulacijom jesu visoki koeficijent prolaza topline, povećana brzina cirkulacije,



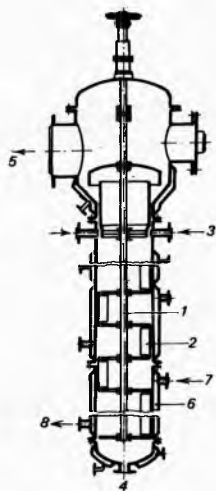
Sl. 17. Isparivač za kristalizaciju. 1 ulaz rijetke otopine, 2 izlaz matične otopine, 3 izlaz supare, 4 izlaz kristalne kaše, 5 ulaz ogrjevne pare, 6 izlaz kondenzata, 7 silazna cijev, 8 cirkulacijska pumpa

relativno sporo taloženje kristala, sporo stvaranje taloga, te malo onečišćenje ogrjevne površine na strani otopine. Osnovni nedostaci isparivanja s prinudnom cirkulacijom jesu visoki troškovi, povećani utrošak energije zbog rada cirkulacijske pumpe i pojačano djelovanje korozije. Najčešća poteškoća koja nastaje u radu isparivača s prinudnom cirkulacijom jest začepljenje cijevi zbog taloženja soli koje su se odvojile od stijenki isparivača. Isparivači tog tipa upotrebljavaju se za dobivanje kristalnih produkata, uparivanje agresivnih kemikalija i viskoznih otopina.

Tankoslojni isparivač razlikuje se od isparivača s prirodnom ili prinudnom cirkulacijom u tome što u njemu otopina ne cirkulira, već se isparuje u jednosmjernom prolazu kroz ogrjevnu komoru. U središnjem dijelu cijevi struji supara, koja zbog površinskog trenja povlači sa sobom tekućinu. Tekućina se giba u obliku vrlo tankog sloja (filma) po unutrašnjoj strani cijevi i pri tome isparuje. Razlikuju se istosmjerni isparivači s tankim filmom koji se diže ili pada. U uređaju s dižućim filmom (sl. 18) promjer cijevi za isparivanje iznosi 15...25mm, a duljina 7...9m. Supara, koja izlazi iz cijevi, sadrži kapljice tekućine koje se u separatoru izdvajaju iz pare pomoću odbojnika i centrifugalnog hvatača kapljica. Djelovanjem centrifugalne sile kapljice tekućine odbacuju se prema obodu; koncentrirana tekućina struji prema dolje, a para se odvodi iz uređaja u gornjoj strani. Tankoslojni isparivači osjetljivi su na izmjenu režima rada i zahtijevaju održavanje najpovoljnije razine otopine u cijevima. Ako je razina niža od najpovoljnije, tekućina ne oplakuje gornji dio površine cijevi i on praktično ne sudjeluje u izmjeni topline. Na tom se dijelu površine hvata kamenac. Kad je, međutim, razina viša od najpovoljnije, na velikom dijelu površine cijevi otopina se samo grije, pa se smanjuje visina zone ključanja, gdje je prolaz topline intenzivniji.



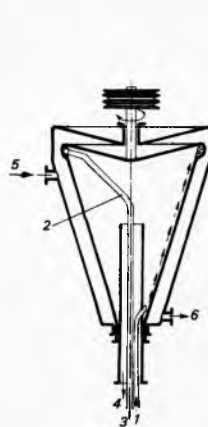
Sl. 18. Tankoslojni isparivač. 1 ogrjevna komora, 2 odbojnik, 3 hvatač kapljica, 4 ulaz rijetke otopine, 5 izlaz koncentrirane otopine, 6 izlaz supare



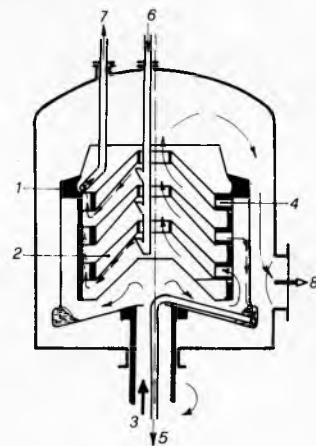
Sl. 19. Tankoslojni isparivač s okvirnom miješalicom. 1 miješalica, 2 pomična krilca miješalice, 3 ulaz rijetke otopine, 4 izlaz koncentrirane otopine, 5 izlaz supare, 6 parni prostor, 7 ulaz ogrjevne pare, 8 izlaz kondenzata

vertikalnog cilindričnog tijela okruženog parnim plaštem. Unutar tijela rotira miješalica s pomičnim krilcima. Rijetka otopina se dovodi pomoću dozirne pumpe i pri otezanju niz stijenke otopina se zahvaća krilcima miješalice. Stvara se turbulentni film otopine, koji se zbog centrifugalne sile priljubljuje k stijenkama isparivača. Prilikom isparivanja stvara se na stijenkama čvrsti produkt, koji se krilcima struže, pada na dno, te odvodi iz isparivača. Ti se isparivači upotrebljavaju za koncentriranje viskoznihi otopina.

Tanki, jednoslojni slojevi otopine mogu se dobiti i djelovanjem centrifugalne sile u centrifugalnom isparivaču (sl. 20). Rijetka otopina ulazi kroz cijev na užoj strani koničnog rotora i penje se pod utjecajem jakog centrifugalnog polja u tankom sloju (debljine oko 0,1mm) uz ogrjevnu površinu. Pri tom dio otapala isparuje, a koncentrat se zbog centrifugalne sile skuplja na obodu šireg dijela konusa i odvodi iz isparivača. Ogrjevna para kondenzira na vanjskoj strani rotora. Kut pri vrhu konusa određuje se prema vrsti tekućine i može iznositi 18°...90°. Ogrjevna površina tih isparivača iznosi 0,1...2,0m², a obodna brzina najšireg dijela rotora 30ms⁻¹.



Sl. 20. Centrifugalni isparivač. 1 ulaz rijetke otopine, 2 odvodna cijev za koncentriranu otopinu, 3 izlaz koncentrirane otopine, 4 izlaz supare, 5 ulaz ogrjevne pare, 6 izlaz kondenzata



Sl. 21. Centrifugalni isparivač Centri-Therm. 1 rotor, 2 konusni elementi, 3 ulaz ogrjevne pare u isparivač, 4 ulaz ogrjevne pare u konusne elemente, 5 izlaz kondenzata, 6 ulaz rijetke otopine, 7 izlaz koncentrirane otopine, 8 izlaz supare

Na istom se principu osniva, iako je konstruktivno drugačije izveden, isparivač Centri-Therm (sl. 21). On se sastoji iz posude i rotirajućeg dijela s konusnim elementima smještenim jedan ispod drugog. Ogrjevna para se dovodi odozdo kroz šuplju osovinu i ulazi u konusne elemente, preko čije površine struji otopina.

U tankoslojnim isparivačima teško je postići ravnomjernu debljinu filma u cijevima koja je potrebna za djelotvoran rad. Ti su isparivači veoma osjetljivi na neravnomjerno zagrijavanje. Nisu prikladni za otopine koje kristaliziraju jer postoji opasnost da kristali začepe cijevi, a čišćenje je cijevi malog promjera vrlo teško. Za njihov smještaj potrebne su velike radne prostorije. Zbog toga ti isparivači sve više prepuštaju svoje mjesto isparivačima s cirkulacijom otopine.

POSTROJENJA ZA ISPARIVANJE

Jednostepeni isparivači. Do sada opisani isparivači jesu jednostepeni i upotrebljavaju se za koncentriranje relativno manjih količina otopine kad je ogrjevna vodena para jeftina ili kad je supara toliko onečišćena da se ne može upotrijebiti u daljem procesu. Najjednostavniji način isparivanja jest diskontinuirano isparivanje. Isparivač se puni otopinom koja se najprije zagrijava do ključanja, da bi se zatim uparila do potrebne koncentracije. Isparuje se uglavnom na atmosferskom ili na tlaku nižem od atmosferskog, a rijetko se kad primjenjuju viši tlakovi. Taj način isparivanja mnogo se upotrebljava za koncentriranje manjih količina sirovine. U industriji se za

Ti se uređaji primjenjuju za koncentriranje otopina malog viskoziteta i otopina koje sadrže termički nestabilne tvari, jer je vrijeme zadržavanja otopine u uređaju kratko.

Pri isparivanju viskoznihi, gustih otopina rad uređaja s podižućim filmom znatno je otežan zbog neravnomjernog podizanja filma. Zbog toga je svrsishodnije upotrijebiti uređaje s padajućim filmom. U njima se sirovina dodaje odozgo i teče u obliku filma po cijevima pod djelovanjem sile teže. Tako se dobije mnogo jednoličnija debljina filma otopine u cijevima, a površina cijevi stalno se moči otopinom. Separator je smješten ispod ogrjevne komore.

Tankoslojni isparivač s filmom koji se miješa (sl. 19) konstruirala je tvrtka Samesreuther i Co. Isparivač se sastoji iz

uparivanje velikih količina sirovine upotrebljavaju isparivači s kontinuiranim djelovanjem, u koje se sirovina dovodi i iz kojih se produkt odvodi stalnom brzinom.

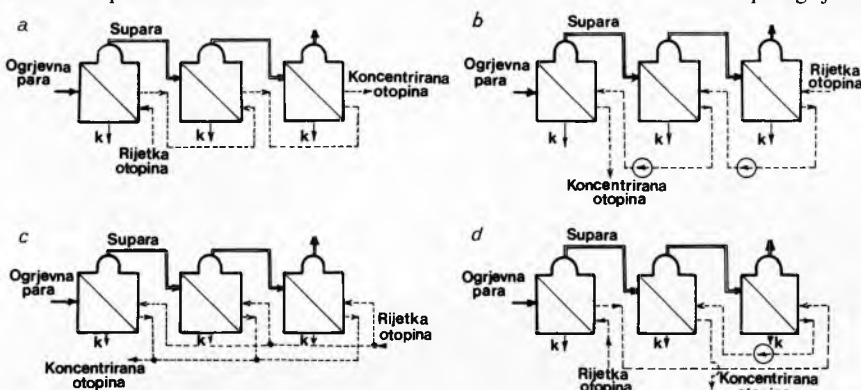
Višestepene isparivačke stanice sastoje se od dva ili više isparivača. Supara iz prvog isparivača upotrebljava se za uparivanje otopine u slijedećem isparivaču, i tako redom dalje. Zbog toga je potrošak ogrjevne pare po jednom isparivaču mnogo manji od potroška u jednostepenom isparivanju i teorijski je obrnuto proporcionalan broju isparivača višestepene isparivačke stanice.

S obzirom na strujanje otopine postoje različite mogućnosti povezivanja isparivača u višestepenoj isparivačkoj stanici. Razlikuje se istostrujno, protustrujno, paralelno i mješovito povezivanje isparivača.

U **istostrujnom spoju** isparivača u trostepenoj isparivačkoj stanici (sl. 22a) otopina i ogrjevna para ulaze u prvi isparivač u kojem se otopina upari do određene koncentracije. Supara prvog isparivača služi kao ogrjevna para drugog isparivača, a koncentriranje se otopine iz prvog isparivača nastavlja u drugom. To se ponavlja sve do zadnjeg isparivača u isparivačkoj stanici. Tlak u prostoru iznad otopine sve je manji od jednog isparivača do drugog. U prvi isparivač dovodi se najviše topline, a u svakom slijedećem količina je dovedene topline sve manja.

U **protustrujnom spoju** (sl. 22b) otopina ulazi najprije u isparivač u kojem je para najnižeg tlaka i najniže temperature, a zatim se u slijedećim isparivačima koncentrira na sve višoj temperaturi i tlaku. Nedostatak je protustrujnog spoja u tome što ima mnogo pumpi za potiskivanje otopine iz jednog isparivača u drugi.

U **paralelnom spoju** (sl. 22c) otopina se dijeli na toliko struja koliko je isparivača u stanici. U svakom se isparivaču otopina uparuje od početne koncentracije do one koja se zahtijeva, dakle jednostepeno. Tlak se razlikuje od jednog isparivača do drugog, pa su i temperature ključanja otopine u svakom isparivaču različite.



Sl. 22. Načini povezivanja isparivača u višestepenim isparivačkim stanicama. Struja otopine iz jednog u drugi isparivač označena je crtkano, a struja supare dvostrukom crtom. a istostrujni spoj, b protustrujni spoj, c paralelni spoj, d mješoviti spoj, k kondenzat

U isparivačkim stanicama s **mješovitim spojem** pokazuju se prednosti, a izbjegavaju se mane ostalih načina povezivanja isparivača. U spoju kombiniranom od istostrujnog i protustrujnog spoja (sl. 22d) otopina najprije ulazi u isparivač u koji se dovodi najviše topline i koji se nalazi na najvišem tlaku. Otopina zatim odlazi u isparivač s najnižom temperaturom i konačno se vraća u srednji isparivač. Takvi ili slični načini spajanja prikladni su za uparivanje otopina kojima pri kraju isparivanja veoma naraste dinamički viskozitet, pa su za intenzivniji prolaz topline u zadnjoj fazi koncentracije otopine potrebne više temperature. Upotrebom istostrujnog spoja u jednom dijelu višestepene isparivačke stanice štedi se na pumpama, jer ih je više potrebno za protustrujni spoj (sl. 22b i 22d). Izbor načina povezivanja isparivača diktiraju tehnološki i pogonski uvjeti.

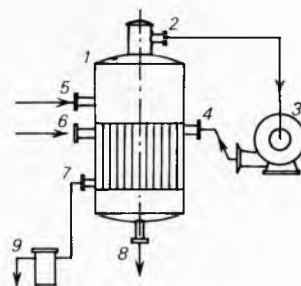
Najjednostavniji spoj jest istostrujni koji upotrebljava pumpu samo za dovođenje sirovine u prvi isparivač. Za dalju

cirkulaciju nisu potrebne pumpe jer se transport otopine odvija zbog razlike tlakova u isparivačima. Rijetka otopina dolazi u dodir s ogrjevnom površinom najviše temperature, a koncentrirana otopina s površinom najniže temperature. To može biti korisno kad se radi s organskim otopinama i emulzijama, kojima osjetljivost prema temperaturi raste s povećanjem koncentracije. Međutim, uparivanje koncentriranije otopine na sve nižoj temperaturi može biti i štetno, jer se, zbog povećanja viskoznosti otopine, otežava izmjena topline. Zbog superpozicije utjecaja povećanja koncentracije i sniženja temperature, otopina u zadnjem isparivaču može dostići takvu viskoznost da pogon postane nemoguć. Da se to izbjegne, mora se tada povećati ogrjevna površina ili razlika temperatura.

Protustrujni spoj nije prikladan za uparivanje otopina koje su u većim koncentracijama osjetljive na više temperature, jer koncentrirana otopina dolazi u dodir s ogrjevnom površinom najviše temperature. Međutim, to ne smeta u uparivanju otopina anorganskih tvari, koje su prema višim temperaturama manje osjetljive. To je često i prednost jer zbog visokih temperatura, na kojima se nalazi koncentrirana otopina, njena viskoznost nije velika, pa je prolaz topline povoljan. Porastom temperature viskoznost otopina viših koncentracija opada, zbog čega se uvjeti prolaza topline poboljšavaju. Otopina se mora zagrijati do ključanja na ulazu u svaki isparivač. Velika je mana tog spoja što se pred svaki isparivač mora postaviti pumpa.

Paralelni spoj upotrebljava se pri isparivanju koje je praćeno kristalizacijom. Kako u tom spoju nema prolaza otopine iz jednog isparivača u drugi, ne postoji ni opasnost od začepjenja vodova. Međutim, ulaz i izlaz otopine mora se posebno regulirati za svaki isparivač, pa je pogon takve isparivačke stanice kompliciran s obzirom na ostale načine povezivanja isparivača.

Opisani spojevi u višestepenim isparivačkim stanicama imaju jednaku potrošnju topline. Razlike mogu postojati samo u vezi s predgrijavanjem otopine ili u načinu iskorišćivanja viška



Sl. 23. Isparivanje uz termokompresiju pomoću kompresora. 1 isparivač, 2 izlaz supare, 3 kompresor, 4 ulaz komprimirane supare, 5 ulaz rijetke otopine, 6 ulaz ogrjevne pare, 7 izlaz kondenzata, 8 izlaz koncentrirane otopine, 9 kondenzni lonac

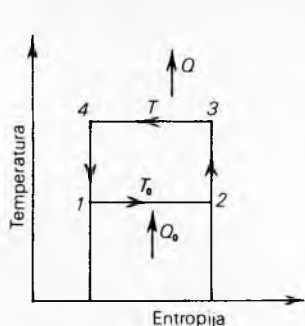
topline isparivačke stanice. Za zagrijavanje otopine u protustrujnom spoju između pojedinih isparivača može se crpiti toplina iz viška topline stanice (topline kondenzata, koncentrirane otopine, supare zadnjeg isparivača ili ogrjevne pare). Ako se iskoriste svi viškovi topline, bit će toplinski utrošak svakog spoja jednak. Međutim, u praksi se to rijetko može provesti.

U velikim industrijskim postrojenjima višestepena isparivačka stanica može biti samo jedan od potrošača pare, pa se mora težiti najpovoljnijoj opskrbi svih takvih potrošača uz najpovoljniji izbor načina proizvodnje pare. Ako postoje potrošači ogrjevne pare nižeg tlaka od onog potrebnog za isparivačku stanicu, korisno je da se opskrbljuju suparom iz odgovarajućeg isparivača u isparivačkoj stanici, ali se time ne smije poremetiti stabilnost procesa isparivanja.

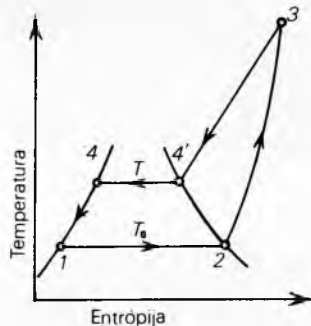
Termokompresija. Supara, koja nastaje isparivanjem iz otopine u isparivaču, sadrži znatnu energiju, koju radi ekonomičnog vođenja procesa isparivanja treba upotrijebiti za za-

grijavanje isparivača. Međutim, temperatura supare iz nekog isparivača uvijek je niža od temperature ogrjevne pare upotrijebljene za zagrijavanje istog isparivača. Da se supara upotrijebi za isparivanje, potrebno joj je temperaturu povisiti na temperaturu ogrjevne pare. To se može postići termokompresijom, postupkom u kojem se komprimiranjem supare povisuje tlak, a time i temperatura. Tako zagrijana supara dovodi se u isparivač kao ogrjevna para, predaje svoju toplinu i izlazi iz isparivača najčešće kao kondenzat (sl. 23).

Termokompresija je desnokretni kružni proces koji se može prikazati idealiziranim desnokretnim Carnotovim kružnim procesom (sl. 24). Takav proces nazvan je toplinska pumpa ili dizalica topline. Stvarni proces (sl. 25) razlikuje se, međutim, od idealiziranog procesa. Tekućina 1 (na sl. 25) zagrijavanjem se prevodi u zasićenu paru 2 koja se komprimira, pri čemu prelazi u pregrijano stanje 3. Pregrijana para odvođenjem topline ponovno prelazi u zasićeno stanje 4', a zatim se pri konstantnoj temperaturi uz dalje odvođenje topline ukapljuje 4, te prigušivanjem dolazi opet u početno stanje 1.



Sl. 24. Idealan proces u toplinskoj pumpi



Sl. 25. Način rada toplinske pumpe (para kao radni medij)

Za vrijeme kondenzacije pare odvodi se toplina Q pri temperaturi T , a ta je toplina veća od topline Q_0 , koju je potrebno dovesti vodi tokom isparivanja pri temperaturi T_0 . Da bi proces bio moguć, potrebna je mehanička energija L koja je proporcionalna površini ograničenoj krivuljama promjene stanja (sl. 24 i 25). Ta je energija jednaka razlici odvedene i dobivene topline, pa je uz pretpostavku da se ostvaruje Carnotov proces proporcionalna razlici temperatura $T - T_0$. Budući da je odvedena toplina Q korisna toplina u procesu, jer se ona u isparivaču predaje otopini, iskoristivost (stupanj djelovanja) procesa iznosi:

$$\eta = \frac{Q}{L} = \frac{T}{T - T_0} \quad (5)$$

Odvedena je toplina Q , naime, proporcionalna temperaturi T (sl. 24). Iskoristivost u takvom procesu veća je od 1, što znači da se više topline odvodi iz procesa nego što se u obliku mehaničke energije dovodi u proces. Nije to, međutim, neki perpetuum mobile, jer u ukupnu bilancu energije treba uračunati energiju pare na temperaturi T_0 . Iskoristivost u procesu bit će to viša što je manja razlika temperatura $T - T_0$, jer će tada i mehanička energija za komprimiranje biti mala. Ako se, npr., temperatura nekog medija povisi komprimiranjem od $T_0 = 293 \text{ K}$ na $T = 373 \text{ K}$, iskoristivost iznosi:

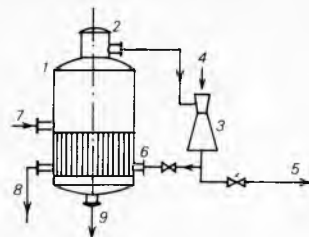
$$\eta = \frac{373}{373 - 293} = 4,663, \quad (6)$$

što znači da se upotrebom mehaničke energije od 1 kJ može dovesti u isparivač toplinske energije od $4,663 \text{ kJ}$. Takav idealizirani kružni proces ne može se u praksi ostvariti zbog pojava nepovratljivosti, pa će u stvarnosti biti postignuta manja iskoristivost od one koja se dobiva prema relaciji (5).

Uređaj za termokompresiju jeftiniji je od toplinske pumpe jer se sastoji samo od termokompresora i naročito spremnika, kolone za izdvajanje štetnih sastojaka iz supare. Termokompresija se u praksi uglavnom provodi turbokompresorima, jer se radi o većim volumenima pare (iznad $1,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) u području

niskih tlakova (ispod $0,15 \text{ MPa}$). U pogonu termokompresora parnom turbinom ispušna para turbine dodaje se komprimiranoj supari. Ako je količina pare koja se troši za pogon turbine jednaka ili manja od količine pare koja se dodaje supari, u pogonu nije potreban kondenzator supare. To se može postići samo uz naročito povoljne prilike, kao što su visoki tlak i temperatura svježije pare. Tlak ogrjevne pare i kompresijski omjer ne smiju biti previsoki. Turbokompresori rade veoma često bez hlađenja supare, jer je svako odvođenje topline gubitak za proces isparivanja. Komprimirana para može se hladiti bez odvođenja topline iz sustava uštrcavanjem tople vode koja se isparuje, a para se hladi. Uštrcana voda povećava količinu pare, što je korisno, jer količina supare nije dovoljna za održavanje stacionarnog pogona. Upotreba termokompresije veoma je povoljna u isparivanju čistih tekućina, pogotovo ako se ne taloži kamenac na ogrjevnim stijenjkama. U termokompresiji najviše se energije troši za pogon kompresora.

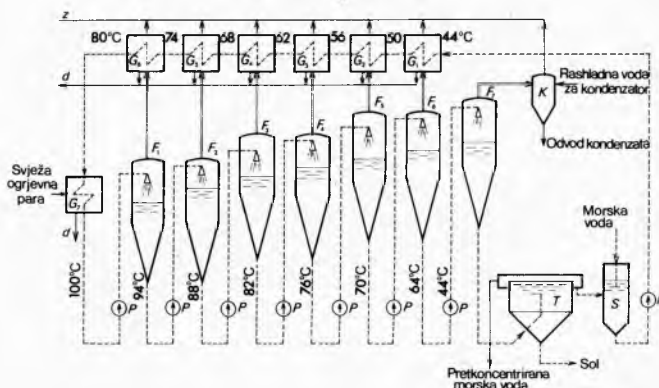
Termokompresija s injektorom (sl. 26), u kojoj se para višeg tlaka upotrebljava za komprimiranje supare, jeftinija je i jednostavnija. U injektor ulazi radna para višeg tlaka ($0,6 \dots 1 \text{ MPa}$). Para u mlaznici expandira i tlak joj padne nešto ispod tlaka supare. Zbog toga se supara usisava u injektor. Dio kinetičke energije smjese radne pare i supare pretvara se u difuzoru injektora u energiju tlaka. Tlak je na kraju difuzora nešto viši od tlaka u ogrjevnom prostoru isparivača. Višak pare, koji se pri tome dobiva, može se upotrijebiti za druge svrhe. Termokompresija pomoću injektora primjenjuje se kad je za isparivanje potrebna niska temperatura. To se uglavnom odnosi na uparivanje gotovo svih organskih otopina i emulzija. Posebno je u isparivanju s termokompresorom važna toplinska izolacija. Termokompresor i sve cijevi, prirubnice i ventili moraju biti dobro toplinski izolirani.



Sl. 26. Isparivanje uz termokompresiju pomoću injektora. 1 isparivač, 2 izlaz supare, 3 injektor, 4 radna para, 5 višak pare, 6 ulaz u ogrjevnu komoru, 7 ulaz rijetke otopine, 8 izlaz kondenzata, 9 izlaz koncentrirane otopine

Unatoč relativno kasnom uvođenju termokompresije u industriju, njena primjena je vrlo česta. Naročito se mnogo upotrebljava pri isparivanju. Isparivači s termokompresijom upotrebljavaju se u proizvodnji soli, aluminijske, u industriji celuloze, piva itd.

Višestruki trenutni isparivač. U trenutnom (naglom, engl. flash) isparivaču ne postoji ogrjevna površina, tj. takvi se isparivači ne zagrijavaju. U njima vlada podtlak, pa se ranije zagrijana otopina nakon ulaska u trenutni isparivač naglo uparuje zbog niskog tlaka. Supara iz isparivača upotrebljava se za zagrijavanje svježije otopine u zagrijačima. Takvi se isparivači odlikuju velikim kapacitetom i često se zbog toga upotrebljavaju za uparivanje morske vode (sl. 27). Kroz čitav



Sl. 27. Višestruki trenutni isparivač. F isparno tijelo, G zagrijač, K kondenzator, P pumpa, S spremnik, T taložnik, d odvod kondenzata, z odzračivanje

uređaj cirkulira koncentrirana morska voda, kojoj se u spremniku S dovodi smjesa svježe morske vode i pretkoncentrirane morske vode dobivene u bazenima solane, u kojima morska voda ishlapljuje djelovanjem Sunčeva zračenja i vjetrova. Tom prilikom izlučuju se kristali CaSO_4 koji lebde u tekućini. Iz prihvatnog spremnika S zasićena otopina tjerana pumpom P ulazi u niz zagrijača $G_1 \dots G_6$, u kojima se zagrijava sumporom iz isparivača. Do konačnog zagrijavanja dolazi u zagrijaču G_7 direktnim ubrizgavanjem pare, a do uparivanja u isparivačima $F_1 \dots F_7$. Zagrijači se nalaze u atmosferskom tlaku i otopina u njima ne ključa. Međutim, od jednog isparivača do drugog tlak je sve manji, pa se otopina naglo upari u svakom od njih na sve nižoj temperaturi. Supara, koja pri tome nastaje, upotrebljava se u zagrijačima za zagrijavanje cirkulacijske tekućine. Sitni kristali soli, koji se izlučuju za vrijeme uparivanja, služe u isparnim tijelima kao kristalizacijske jezgre. U taložniku T veliki i teški kristali soli (NaCl) padaju na dno i odvođeni se kao kristalna kaša u centrifugu. Otopina na gornjem rubu taložnika, u kojoj lebde fini kristali, sadrži korisne sastojke, pa se prerađuje u različite produkte (npr. soli za kupanje). Iz te otopine mogu dobiti i kalij, magnezij i brom. Potrošnja svježe pare po kg isparene vode iznosi 0,38 kg. Potrošnja pare po jednom isparivaču smanjuje se povećanjem njihovog broja.

LIT.: И. И. Гельперин, Выпарные аппараты. Государственное научно-техническое издательство химической литературы, Москва, Ленинград 1947. — Q. D. Kern, Process heat transfer. McGraw-Hill, New York 1950. — R. J. Clarke, Process engineering in the food industries. Heywood & Company, London 1957. — Т. А. Колач, Д. В. Радун, Выпарные станции, государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва 1963. — Z. Rant, Испаривание и упаривание. Техническая книга, Загреб 1965. — S. K. Šušić, M. E. Guralj, Osnovi tehnologije šećera. Naučna knjiga, Beograd 1965. — А. Н. Плавовский, В. М. Рамми, С. З. Каган, Процессы и аппараты химической технологии. Издательство «Химия», Москва 1968. — H. W. McAdams, Prostriranje topline. Građevinska knjiga, Beograd 1969. — А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии. Издательство «Химия» Москва 1971. — F. Bošnjaković, Nauka o toplini. Tehnička knjiga, Zagreb 1976. — L. W. McCabe, C. J. Smith, Unit operations of chemical engineering. McGraw-Hill, Kogakusha, LTD, Tokyo 1976. — R. J. Welty, E. Ch. Wicks, E. R. Wilson, Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. John Wiley and Sons, New York 1976.

E. Perlov-Narančić B. Tripalo

ISPITIVANJE GRAĐEVNIH MATERIJALA I KONSTRUKCIJA

postupci kojima se utvrđuju fizička i kemijska svojstva građevnih materijala, odnosno kojima se utvrđuje ponašanje građevnih konstrukcija pri djelovanju, u prvom redu vanjskih mehaničkih sila.

Građevni materijal uvjetuje svojim svojstvima i svojstva građevnih konstrukcija. Svojstva konstrukcije, osim toga, ovise o njezinom obliku. Zbog toga proučavanje svojstava materijala mora prethoditi proučavanju svojstava konstrukcije. To zahtijeva detaljno ispitivanje svojstava materijala. Za proučavanje konstrukcija, međutim, potrebna je u prvom redu teorijska analiza, a kad se u takvoj analizi naiđe na nesavladive poteškoće, ispitivanje konstrukcija postaje prijeko potrebno. Ono je često potrebno i poželjno kao potvrda teorijske analize i ispravnosti izvedbe.

Za ispitivanja materijala i konstrukcija primjenjuju se raznovrsne metode, već prema svrsi ispitivanja i prema vrsti materijala i konstrukcija. Neke od tih metoda potpuno su identične i za ispitivanje materijala i za ispitivanje konstrukcije kad se radi o konstrukcijama od jednakog materijala (npr. metode bezrazornog ispitivanja), pa je zbog toga teško odrediti granicu između te dvije vrste ispitivanja. Neke metode ispitivanja razvile su se u posebne znanstvene discipline, npr. fotoelasticimetrija (v. *Fotoelasticimetrija*, TE5, str. 525), dimenzionalna analiza (v. *Dimenzionalna analiza*, TE3, str. 340), holografija (v. *Holografija*), tenzometrija (v. *Tenzometrija*) itd.

Kad se govori o ispitivanju materijala, obično se misli na ispitivanje tehničkih materijala koji kao sirovine, poluproizvodi ili konačni proizvodi služe za proizvodnju dobara. Ispitivanje građevnih materijala obuhvaća materijale koji se upotrebljavaju u građevnoj tehnici.

Veliko je značenje i važnost ispitivanja tehničkih materijala u suvremenom životu, jer se ispitivanje provodi s ciljem da se utvrde neke karakteristike materijala koje do sada nisu bile poznate ili da se provjeri da li karakteristike materijala odgovaraju postavljenim zahtjevima.

Postoje organizacije i institucije koje se bave propisivanjem karakteristika tehničkih materijala te kontrolom tih karakteristika koje se utvrđuju različitim postupcima ispitivanja. Radi toga svaka zemlja, prema svojim prilikama, donosi propise i pravilnike o kvaliteti i karakteristikama materijala koji se primjenjuju u pojedinim granama tehnike, a isto tako utvrđuje postupke ispitivanja. U nekim se zemljama propisi i pravilnici o karakteristikama i kvaliteti tehničkih materijala, o njihovoj primjeni, te postupci ispitivanja označuju oznakama koje su obično kratica institucije koja izdaje te propise ili kratica koja znači propis i pravilo (npr. DIN za *Deutsche Industrie Norm*, ACI za *American Concrete Institute*, CNIPS za *Центральный научно-исследовательский институт промышленного строительства*). U nas je to JUS, što je kratica za *Jugoslavenski standard*. Obično uz tu kraticu stoji i oznaka o kojem je standardu ili propisu riječ, i to prema klasifikaciji koja može biti označena brojevima (npr. DIN 1048), slovima (npr. BSS 102) ili mješovito (npr. JUS BC.002).

Posljednjih nekoliko desetljeća nastoje se u čitavom svijetu ujednačiti postupci ispitivanja materijala, pa su u tu svrhu osnovane međunarodne komisije i udruženja u koje ulaze predstavnici pojedinih društava iz različitih zemalja, ili službeni predstavnici nacionalnih organizacija za ispitivanje i kvalitetu materijala. Kao rezultat svojega rada komisije sastavljaju prijedloge za propise i pravilnike, standarde, norme itd., te ih daju na pregled i predlažu za prijem u pojedinim zemljama. Takve su međunarodne komisije ISO (*International Organization for Standardization*), RILEM (*Réunion internationale pour les essais de matériaux et construction*), CEB (*Comité Européen pour le Béton*).

Kad se govori o ispitivanju građevnih materijala, onda se obično pod tim razumiju materijali koji služe kao sirovine ili poluproizvodi u građevnoj tehnici. To su obično materijali u čvrstom agregatnom stanju u različitim oblicima: prah (cement), sitnež (šljunak, drobljenac) ili u komadima (opeka). Voda je česti građevni materijal u tekućem stanju, koja služi za proces hidratacije s cementom, vapnom i sadrom. Ima i drugih materijala u tekućem stanju koji se upotrebljavaju u graditeljstvu, a u tekućem su stanju, kao npr. dodaci betonu ili tekući sastojak dvokomponentnih sintetskih materijala. Kao građevni materijal pojavljuju se i veći komadi koji se gotovi ugrađuju u građevinu i predstavljuju gotove dijelove objekta, kao što su različite ploče, kanalske cijevi, vodovodne cijevi od silikatnih materijala ili od sintetskih materijala, sanitarna keramika itd. Ima također građevnih materijala koji stižu na gradilište u svicima (bitumenska ljepenka) ili namotajima (čelična žica za prednapregnuti beton).

Ugrađeni građevni materijal mora posjedovati određena svojstva: čvrstoću, tvrdou, otpornost protiv habanja, nepropusnost za vodu i plinove, mora biti dobar toplinski izolator, mora dobro prigušivati zvuk, ne smije biti higroskopan itd. No isto tako prilikom obrade i ugrađivanja mora imati neka svojstva koja su često u suprotnosti s potrebnim svojstvima ugrađenog materijala. Npr., poželjno je da beton pri ugradbi ima što veću podatljivost koja se postiže povećanjem količine vode, ali se s povećanjem količine vode smanjuje njegova otpornost na tlak, na habanje itd. Treba, prema tome, uskladiti karakteristike materijala da se zadovolji što više zahtjeva, uzimajući u obzir i fazu obrade, ugradnje, i konačnu namjenu građevnog materijala. Dakako, da su za pojedine građevine unaprijed poznata svojstva koja mora imati materijal i da su ona za pojedine građevine različita. Npr., za pregradne se zidove u stambenim zgradama zahtijeva da budu od materijala koji ima dobra toplinska i zvučna izolacijska svojstva, dok se npr. od betona za slapište brane hidroelektrane zahtijeva da bude otporan na udarce kamenih čestica, na djelovanje mraza, da bude nepropustan itd.

Vjerojatno nema područja proizvodnje gdje bi se na materijale postavljali tako različiti zahtjevi kao u graditeljstvu, i stoga je proučavanje i propisivanje svojstava tih materijala i njihovo ispitivanje od velikog značenja. Ne treba pri tom ispustiti iz vida da su investicije u građevinske objekte približno 1/3 od ukupnih investicija i da su zbog toga troškovi za proučavanje i ispitivanje građevnog materijala opravdani i potrebni.

Vrste materijala i njihova svojstva koje je potrebno ispitivati vrlo su brojni. Tome odgovara raznolikost i množina postupaka za ispitivanje građevnih materijala, a i brojnost propisa i standarda kojima su karakteristike materijala dogovorene, propisane ili preporučene. Vremenom se gledanja i zahtjevi o pojedinim svojstvima materijala mijenjaju, na temelju novih spoznaja i iskustava, tako da se standardi i propisi obnavljaju i nadopunjuju. Znatnije promjene i izmjene nisu česte i nije rijetko da neki propis o kvaliteti ostaje nepromijenjen desetak i dvadesetak godina. Tada su i pripreme za izmjenu takvog propisa dugotrajnije, šire i obuhvatnije, jer se propisom o kvaliteti nekog materijala ponajviše utječe na njegovu proizvodnju i potrošnju. O propisima, osim toga, neposredno ovisi i ekonomičnost proizvodnje takvog građevnog materijala. S pojavom novih građevnih materijala potrebno je utvrditi i postupke ispitivanja tih materijala. Razumljivo je stoga da broj postupaka ispitivanja, a time i broj normi, standarda i propisa stalno raste. Koji put je potrebno više godina, a i više desetljeća, da se ispita veza između svojstava materijala, koja se u praksi prate, i rezultata kratkotrajnih ispitivanja. Ne treba zaboraviti na još jednu specifičnost graditeljstva, naime, građevinski objekti u prosjeku imaju znatno duži vijek trajanja nego strojevi i uređaji drugih tehničkih grana. Npr., računa se da trajnost stambenih zgrada iznosi 50...100 godina, reprezentativnih građevina nekoliko stoda-