

koje često ide i cijela strojarnica) vrlo je složen izvedbeni zadatak i jako komplicira mnoge detalje na brodu (prolazi cijevi, kabela i ventilacijskih kanala kroz pregrade, izvedba poklopaca i vrata itd.). c) Kondicioniranje zraka na trgovačkim je brodovima uglavnom namijenjeno poboljšanju životnih uvjeta posade, a na ratnom je brodu to po važnosti na drugom mjestu. Mnogi elektronički uređaji borbenog sistema mogu funkcionirati samo uz intenzivno hlađenje, čak i u zimskim uvjetima. Zato neki sistemi za hlađenje moraju biti u pogonu i kada je radi komfora posade potrebno zagrijavati prostor. d) Na ratnim se brodovima redovito nalazi trakt za radiološku dekontaminaciju članova posade koji su kontaminirani radioaktivnim česticama. Ti se traktovi sastoje od najmanje tri prostorije koje su smještene jedna uz drugu, a međusobno su odvojene posebnim nepropusnim vratima. e) U ranijim razdobljima na ratnim se brodovima nije pazilo na onečišćavanje mora otpadnim vodama i materijama. Prema međunarodnim konvencijama o zaštiti mora od onečišćavanja sva ograničenja sada vrijede i za ratne brodove, što se mnogostruko odražava na nova i sve složenija rješenja prikupljanja nečistoća (kaljuže i otpadna ulja, sanitarni sistem i sl.)

NEKONVENCIONALNI RATNI BRODOVI

Nekonvencionalni ratni brodovi novija su generacija ratnih brodova na razvoju kojih se još intenzivno radi. Takva nekonvencionalna plovila održavaju se iznad površine vode na osnovi dinamičke plovnosti, glisiranja, lebdenja ili leta po



Sl. 20. Hidrokrilni raketni patrolni brod

i iznad kopna, kao što su lebdjelice ili brodovi na zračnom jastuku (sl. 22) i brodovi letjelice s krilima varijabilnog oblika.

Dosadašnje analize eksperimentalnih nekonvencionalnih brodova s obzirom na ponašanje na razvijenom moru, te s obzirom na brzinu, potrošak energije, masu, korisni teret, mogućnosti upotrebe u borbi i cijenu, pokazuju da, osim prve grupe, svi ostali imaju vrlo ograničene mogućnosti za borbenu upotrebu i da budu zamjena za konvencionalne brodske forme. Zbog toga se donekle mijenja stav u mnogim ratnim mornaricama svijeta prema kojem je bilo predviđeno da se brzi napadni brodovi, korvete i manje fregate zamijene nekonvencionalnim plovilima.

Do sada se nisu ispunila očekivanja da će se uvođenjem nekonvencionalnih brodova ukloniti mnogi, sada već nepremostivi nedostaci deplasmanskih brodova i konvencionalnih pogona. Tako nekonvencionalni brodovi ostaju kao rješenje za buduće razdoblje, ali uz bitnu izmjenu pristupa njihovu projektiranju i gradnji. Najvažnije razlike između ratnog broda budućnosti i većine izvedenih, čak i najnovijih projekata, sastoji se u bitnoj preorijentaciji s defenzivnog ratnog broda (kakav je bio do sada zbog velike izloženosti protivniku)



Sl. 22. Ratni brod lebdjelica (hovercraft)



Sl. 21. Projekt raketnog broda s dinamičkim učinkom površine (SES)

površini ili iznad površine vode, a trebala bi u nekim specifičnim namjenama da zamijene tradicionalne deplasmanske brodove koji više ne mogu udovoljiti sve težim novim zahtjevima.

Nekonvencionalna se plovila mogu svrstati u tri glavne grupe: a) plovilo se giba po površini vode i u stalnom je dodiru s vodom, kao što su vitki brodovi vrlo izduženog oblika, katamarani i dvotrupni brodovi male oplakivane površine; b) plovilo se giba iznad površine vode, ali je u dodiru s njom, kao što su hidrokrilni brodovi s fiksnim ili upravljivim krilima (sl. 20), brodovi s učinkom površine (sl. 21) i kombinacije tih dvaju rješenja; c) brodovi koji se gibaju iznad površine vode i nisu s njom u doticaju, a mogu se gibati

na izrazito ofenzivno rješenje, što se, u prvom redu, postiže borbenim sistemom broda novije koncepcije, ali i izvedbom broda u cjelini.

V. Kristić

REAKCIJSKE PEĆI, kemijski reaktori (v. *Procesna aparatura*) za provedbu jediničnih procesa (v. *Procesna tehnika*) na visokim temperaturama, obično višim od 400 °C.

Glavnu skupinu reakcijskih peći čine peći za nekatalitičke reakcije čvrstih tvari međusobno i s plinovima. Osim njih, u

reakcijske se peći ubrajaju i uređaji za plinske reakcije na visokim temperaturama, koje se mogu svrstati u dvije skupine: peći za homogene plinske reakcije i kontaktne peći za plinske reakcije na čvrstim katalizatorima. Važnu skupinu čine i elektrotermijske peći (v. *Aluminij*, TE 1, str. 182; v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 182; v. *Gvožđe*, TE 6, str. 330; v. *Kalcij*, TE 6, str. 642).

PEĆI ZA NEKATALITIČKE REAKCIJE ČVRSTIH TVARI

Takve se peći mogu razvrstati u jamne peći, konvertore, plamene i etažne peći, peći za prženje praha, peći za taljenje u lebdećem stanju, rotacijske peći, peći za nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju i peći za izravno grijanje recirkulacijom nosilaca toplote. Osim toga, među takve se peći često ubrajaju komorne i tunelne peći za pečenje keramike (v. *Keramika*, TE 7, str. 63) te neki uređaji za sinteriranje (v. *Sinteriranje*). Takve se peći upotrebljavaju za prženje, pečenje i taljenje.

Prženje u reakcijskim pećima služi za pretvorbu metalnih sulfida u okside, sulfate ili kloride. Metali se ne mogu ekonomično dobivati od sulfidnih sirovina, a kako su sirovine za dobivanje neželjeznih metala najčešće sulfidi, prženje je u metalurgiji vrlo važan postupak (v. *Antimon*, TE 1, str. 308; v. *Bakar*, TE 1, str. 652; v. *Cink*, TE 2, str. 648; v. *Germanij*, TE 6, str. 124; v. *Olovo*, TE 9, str. 593; v. *Selen*; v. *Telur*; v. *Vanadij*; v. *Živa*). Osim toga, prženjem sulfidnih ruda nastaju i plinovi bogati sumpor(IV)-oksidom, pa je prženje važno i za proizvodnju sumpornih spojeva, osobito sulfatne kiseline (v. *Sumpor*).

Zbog topljivosti neželjeznih metala u troskama, sirovine moraju biti što više koncentrirane, tj. flotirane (v. *Flotacija*, TE 5, str. 460), pa peći za njihovo prženje moraju biti sposobne za preradbu finoiznatog materijala (npr. veličine čestica 0,1...2,5 mm). To su u prvom redu peći za prženje u fluidiziranom sloju. Takve se peći upotrebljavaju skoro uvijek kad prženac ne mora biti talina.

Za prženje kojim treba proizvesti prženac kao kompaktnu masu ili talinu u prvom su redu pogodne rotacijske peći s pregradom na ispusnom rubu bez sustava za hlađenje i peći za taljenje u lebdećem stanju. U svim drugim slučajevima potrebno je hlađenje da bi se dobio prženac bez promjene agregatnog stanja. Hladi se odvođenjem toplote zračenjem, recirkulacijom već isprženog materijala, upotrebom većih količina zraka nego što je potrebno za potpuno izgaranje, povratom otpadnih plinova, dodavanjem vode ulaznom materijalu, izravnim odvođenjem toplote i dr.

Razvijaju se nove metode hlađenja peći prikladnih za prženje iznad temperatura likvidus-linije ili čak za odvođenje proizvoda u parnoj fazi, a svrha im je zaštita uređaja. One omogućuju rad peći s manjim ograničavanjem intenziteta procesa pa i bez tog ograničavanja. To se postiže smanjenjem dimenzija peći radi smanjenja toplinskih gubitaka, dovođenjem zraka obogaćena kisikom, prethodnim sušenjem materijala i povećanjem površina za odvijanje reakcija. Tako se povećavaju brzine reakcija i koncentracija proizvoda, a proširuju se i mogućnosti iskorištavanja otpadnih plinova za proizvodnju vodene pare.

Pečenje obuhvaća reakcije čvrstih tvari kao što je npr. obradba na visokim temperaturama u proizvodnji keramike. U te se procese ubraja kalcinacija kojoj je svrha razgradnja nekih spojeva i odvajanje isparljivih sastojaka iz tih tvari, kao npr. razgradnja karbonata uz odvođenje ugljik(IV)-oksida (proizvodnja živog vapna), odvođenje kristalne vode (pečenje gipsa) i ugljikovodika (u preradbi fosfatnih sirovina). Pečenje se uglavnom primjenjuje u industriji nemetala.

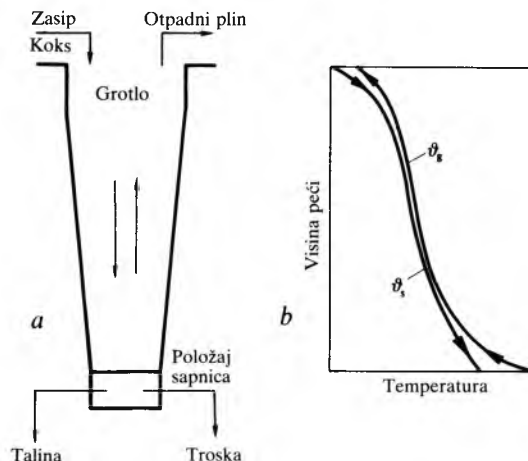
Taljenje. Pod taljenjem se u ovom članku razumijevaju redukcijski procesi kojima se od oksidnih metalurških sirovina proizvodi talina metala, a također procesi dobivanja kamenaca od sulfidnih metalnih ruda.

Jamne peći imaju oblik okomite jame ili rova, pa se nazivaju i rovnim pećima. Temeljna je karakteristika takvih peći protustrujno gibanje njihovih procesnih faza (čvrste tvari i plinova). Danas se one upotrebljavaju kao metalurške peći za redukcijsko taljenje (sl. 1a) prilikom dobivanja metala od oksidnih ruda ili rudnih koncentrata. Općenito su glavne faze procesa: ugrijavanje i redukcija oksidne sirovine, proizvodnja redukcijskog plina nepotpunim izgaranjem koksa dovođenjem predgrijanog zraka ili zraka obogaćena kisikom, taljenje redukcijom dobivenog metala te odvođenje rastaljenog metala i troske.

Zasip peći (smjesa glavnih komponenata sirovine) i koks dovode se u peć s vrha, a zrak se dovodi kroz sapnice pri dnu. Protustruje čvrstog materijala i plina izmjenjuju toplinu i međusobno reagiraju uz povoljan tok temperatura (sl. 1b). To omogućuje postizanje visokih iscrpaka po jedinici volumena. Osim taline i troske u peći se proizvodi i grotleni plin koji se odvodi s vrha peći.

Jamne se peći najviše upotrebljavaju u proizvodnji sirovog željeza (*visoke peći*; v. *Gvožđe*, TE 6, str. 309) i u lijeva-

cama željeza (*kupolne peći*; v. *Mehanizacija lijevaonica*, TE 8, str. 304), ali i u proizvodnji neželjeznih metala. Među njima su najvažnije peći za istodobnu proizvodnju cinka i olova postupkom *Imperial Smelting* (ISP) (v. *Cink*, TE 2, str. 651) i za proizvodnju samog olova (v. *Olovo*, TE 9, str. 596). Rjeđe se jamne peći upotrebljavaju kao peći za taljenje, npr. u proizvodnji bakrenca u pirometalurškom postupku proizvodnje bakra (v. *Bakar*, TE 1, str. 652).



Sl. 1. Jamna peć. a profil peći, b temperaturni tok, θ_g temperatura plina, θ_s temperatura čvrste tvari

Procesi za proizvodnju neželjeznih metala u jamnim pećima razlikuju se od procesa u visokim pećima, jer se neželjezni metali moraju selektivno reducirati. Da se to postigne, u proces se uvodi neugrijani zrak pod malim pretlakom, ponekad obogaćen kisikom. Peći su mnogo manje od visokih peći, pa im je visina iznad sapnica za dovod zraka rijetko veća od 10 m. Poprečni je presjek takvih peći kvadratan, a duljina stranice nije veća od 1,8 m, što osigurava strujanje zraka kroz zasip. Jamne su peći za proizvodnju neželjeznih metala različitog oblika (sl. 2).

Grotleni plin iz jamnih peći za proizvodnju neželjeznih metala ne može se iskoristiti kao energent zbog male ogrjevne moći, pa se nakon pročišćavanja ispušta u atmosferu.

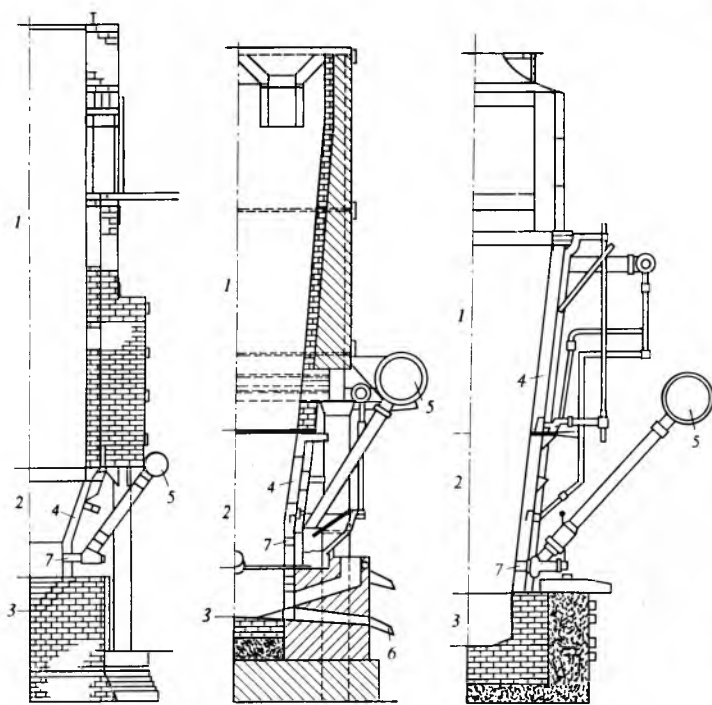
Konvertori su reaktori za provođenje procesa među talinama i plinovima, u kojima se od neželjenih primjesa, najčešće oksidacijom, dobiva proizvod koji je netopljiv u talini i koji se može izdvojiti kao troska. Obično su to egzotermne reakcije u prisutnosti dodataka, tzv. *stvaralaca troske* (vapno, pijesak), pa nije potrebno zagrijavanje, već ponekad i snižavanje temperature (npr. dodavanjem hladnog materijala).

Konvertori se upotrebljavaju u proizvodnji čelika, (v. *Čelik*, TE 3, str. 57), bakra (v. *Bakar*, TE 1, str. 654), nikla (v. *Nikal*, TE 9, str. 341) i, rjeđe, olova (v. *Olovo*, TE 9, str. 595).

Razlikuju se dva tipa konvertora: konvertori s propuhivanjem taline reakcijskim plinom (zrak, zrak obogaćen kisikom) i konvertori s brizganjem reakcijskog plina na površinu taline.

Konvertori s propuhivanjem mogu imati sapnice smještene u podnicu (npr. kao *Thomasov konvertor*; v. *Čelik*, TE 3, str. 59) i sapnice smještene sa strane (npr. kao *Pierce-Smithov konvertor*, sl. 3). Proces u takvim konvertorima osniva se na prijenosu kisika otopljenog u talini konvekcijom. Nedostatak je takvih konvertora što se proces u njima može intenzificirati samo povećanjem dovoda zraka ili obogaćenjem zraka kisikom. Povećanjem dovoda, međutim, pojačava se raspršivanje taline iz konvertora, a povećanje udjela kisika u zraku pojačava koroziju vatrostalnog materijala u blizini sapnica.

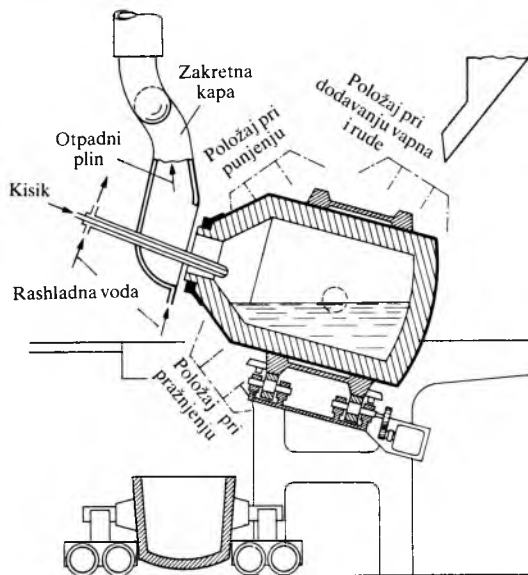
Konvertori s brizganjem reakcijskog plina na površinu taline mogu raditi u fiksnoj položaju (sl. 4), kao npr. konvertori *Linz-Donawitz* (*LD-konvertori*; v. *Čelik*, TE 3, str. 66), ili se oni mogu zakretati, kao npr. *Kaldo-konvertori*



Sl. 2. Profili jamnih peći. 1 jama, 2 gnijezdo, 3 tiganj, 4 hladionik, 5 cjevovod za zrak, 6 ispušt, 7 otvori za dovod zraka

(sl. 5). Takvi konvertori nemaju spomenutih nedostataka konvertora s propuhivanjem. U njima se, naime, djelovanjem ubrizganoga reakcijskog plina povećava transport tvari zbog velikih relativnih brzina strujanja plina.

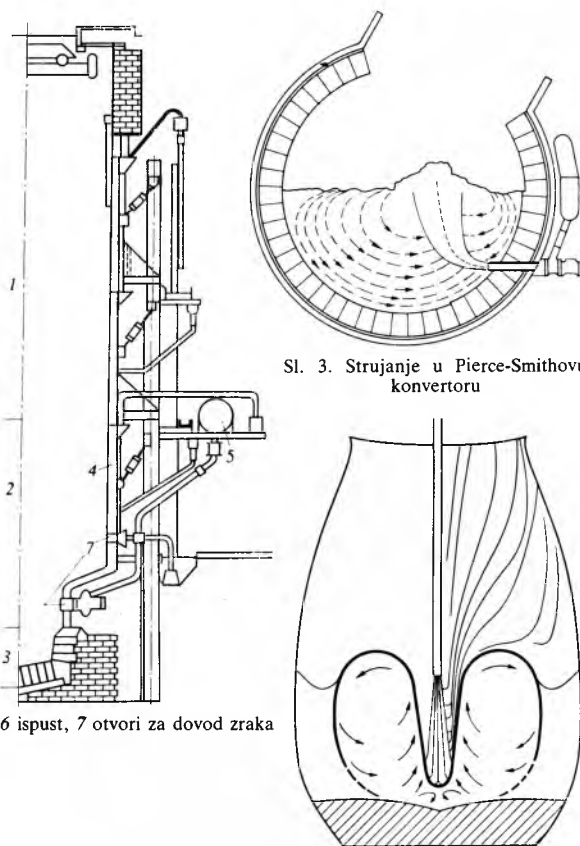
Diskontinuirani pogon glavni je nedostatak svih tipova konvertora.



Sl. 5. Kaldo-konvertor

Plamene peći služe za preradbu materijala koji ne gori, već se mora ugrijati gorućim plinovima. Unutrašnjost plamenih peći obložena je vatrostalnim ozidom. Kao gorivo upotrebljava se ugljena prašina, ložno ulje ili plinovi. Talina se zagrijava zračenjem ugrijanog svoda smještenog iznad kupke s talinom. Zbog toga se grije samo najviši dio kupke, pa je često potrebno miješanjem poboljšati prijelaz topline u talinu. U nekim se pećima to postiže propuhivanjem taline zrakom.

Postoje metalurške i nemetalurške plamene peći, a među metalurškim pećima treba razlikovati peći za crnu i peći za obojenu metalurgiju.



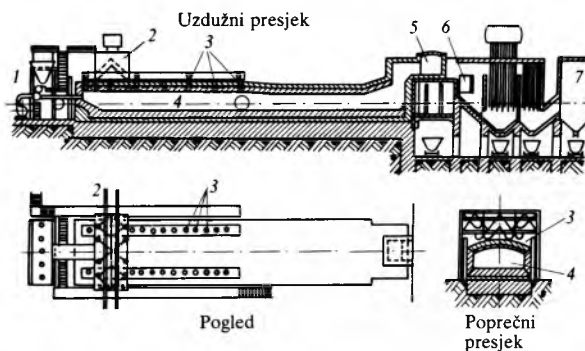
Sl. 3. Strujanje u Pierce-Smithovu konvertoru

Sl. 4. Strujanje u konvertoru s brizganjem na površinu

Metalurške plamene peći. Siemens-Martinova peć (v. Čelik, TE 3, str. 60) jedina je plamena peć koja se upotrebljava u suvremenoj crnoj metalurgiji.

U obojenoj metalurgiji najviše su se zadržale plamene peći za proizvodnju bakrenca (sl. 6). Ozid tih peći obično je od silikatnih opeka, a na mjestima koja su više napregnuta od magnezitnih opeka, dok su izljevi ozidani kromitnim opekama. Bočni zidovi obloženi su željeznim plaštevima koji se hlade vodom. Na ulazu u plameni prostor vlada temperatura 1400...1600 °C, a na kraju 1150...1200 °C, pa se izlazni plinovi mogu iskoristiti u prigrađenom parnom kotlu. Osim za proizvodnju bakrenca, plamene se peći upotrebljavaju u proizvodnji niklenog kamenca (v. Nikal, TE 9, str. 340) i za reduksijsko taljenje u proizvodnji kositra (v. Kositar, TE 7, str. 307).

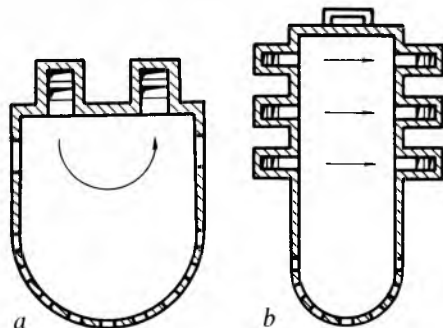
Nemetalurške plamene peći upotrebljavaju se kao peći za taljenje u proizvodnji stakla i vodenog stakla (v. Staklo). U proizvodnji stakla razlikuju se tri proizvodne faze: staljivanje (grubo taljenje), bistenje (izlučivanje plinova iz taline) i održavanje taline. Za staljivanje je potrebna temperatura



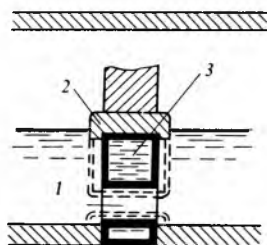
Sl. 6. Plamena peć za proizvodnju bakrenca. 1 plamenik s puhalom, 2 uređaj za punjenje, 3 cijevi za punjenje, 4 ognjište, 5 kanal za odvod plinova, 6 kanal za dovod plina u kotlovcu, 7 uređaj za otpušivanje plinova

~1450 °C, za bistrenje 1450...1500 °C, a za održavanje taline ~1100 °C. Zbog osjetljivosti strojeva za preradu stakla i zbog znatne ovisnosti viskoznosti rastaljenog stakla o temperaturi, potrebno je vrlo točno održavati temperaturu u fazi održavanja taline.

Plamene peći za šaržno taljenje stakla mogu biti peći s dugim (sl. 7a) i peći s kratkim plamenom (sl. 7b).



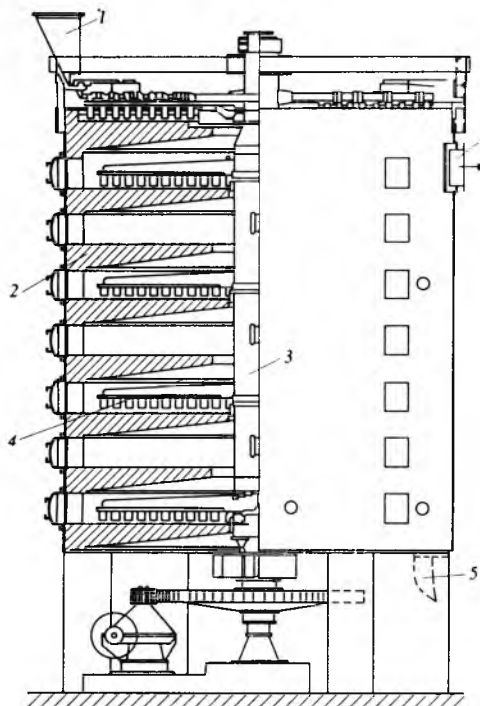
Sl. 7. Komora staklarske plamene peći s dugim (a) i kratkim (b) plamenom



Sl. 8. Vodom hlađena pregrada u peći za taljenje stakla. 1 talina, 2 pregrada, 3 rashladna voda

Plamene peći za kontinuirano taljenje stakla pregrađene su u tri komore za svaku od spomenutih triju procesnih faza. Postoji više konstrukcija tih pregrada. Jedna se od njih vidi na sl. 8. U toj se peći plamen vodi samo kroz komore za stajivanje i bistrenje. Vanjski je ozid od šamota, a unutrašnji od silikatnih opeka. Unutrašnji ozid nema veziva, jer staklo pri prvom taljenju prodire u reške gdje očvršćuje.

Etažne peći zatvoreni su sklopovi od više kružnih ognjišta (etaža), smještenih u okomitom nizu. U njima se odvijaju



Sl. 9. Lurgijeva etažna peć. 1 usipni lijevak, 2 kružno ognjište, 3 šuplje vratilo, 4 grablje sa zupcima, 5 odvod odgora, 6 odvod plina

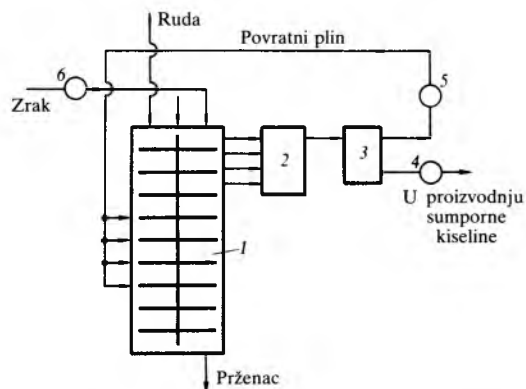
reakcije između čvrstih tvari i plinova koji se protustrujno gibaju. Za to je potrebno osigurati gibanje čvrste tvari na etažama: na jednoj od periferije prema sredini, a na sljedećoj od sredine prema periferiji, te padanje na nižu etažu. Da bi se to postiglo, te peći (sl. 9) imaju po sredini vratilo i na njemu užvršćene grablje. Plin potreban za proces usisava se odozdo.

Etažne peći imaju neke odlike koje opravdavaju njihovu upotrebu u nekim posebnim slučajevima. Te su odlike: dugo vrijeme zadržavanja materijala, laka regulacija procesnog režima i visok stupanj homogenizacije materijala zbog vrlo intenzivnog miješanja grabljama. Zbog toga su etažne peći prikladne za procese sa sporim reakcijama i na relativno niskim temperaturama, te za reakcije za koje su potrebne točne koncentracije plinova.

Etažne su peći zatvorene u čeličnim cilindrima koji su s unutrašnje strane obloženi vatrostalnim materijalom od kojeg su izrađene i etaže. I vratilo, sastavljeno od dviju koncentričnih cijevi, i grablje hlade se zrakom koji se vodi između cijevi vratila te kroz krakove grabalja. Da bi se osiguralo potrebno kretanje materijala na etažama, zubi su grabalja na susjednim etažama zakrenuti u suprotnim smjerovima, a otvori su za propadanje materijala smješteni naizmjenično oko ruba periferije i oko vratila. Promjer je etažnih peći 2...8 m, a broj etaža 3...16. Vrijeme zadržavanja materijala regulira se kutom nagiba zubi na grabljama i brzinom vrtnje vratila, koja iznosi 0,5...4 min⁻¹.

Etažne se peći upotrebljavaju i za egzotermne i za endotermne procese.

Etažne peći za egzotermne procese upotrebljavaju se samo za teško provedivo prženje sulfidnih ruda kao što su npr. molibden-sulfidne rude (v. *Molibden*, TE 8, str. 644). Tada se na najgornjoj etaži suši sirovina, koja se počinje pržiti na sljedećoj etaži, gdje se ugrije na temperaturu paljenja sumpornih para, kad počinje egzotermna reakcija koja se nastavlja na nižim etažama. Na najdonjoj etaži prženac se hladi zrakom koji se dovodi u peć. Tako se ujedno predgrijava zrak koji se uvodi u proces. Za poboljšanje procesa u peć se vraća dio ohlađenog izlaznog plina (temperatura 320 do 350 °C), koji je dio svoje topline predao vodi i pari u parnom kotlu (sl. 10).



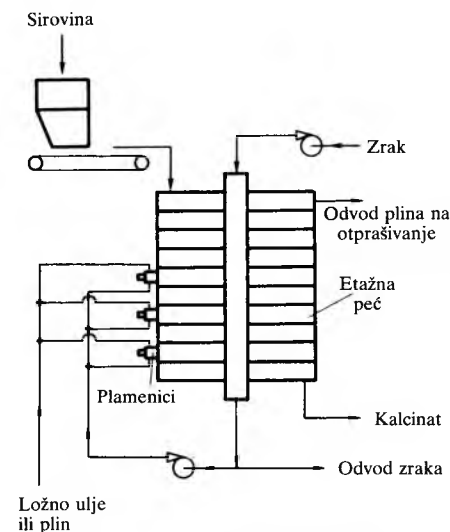
Sl. 10. Shema prženja u etažnoj peći s povratnim vođenjem plina. 1 etažna peć, 2 kolektor plina, 3 kotao za dimni plin, 4 ventilator za dimne plinove, 5 ventilator za povratni plin, 6 ventilator za svjež zrak

Etažne peći za endotermne procese moraju imati uređaje za grijanje s jednim ili više plamenika (sl. 11). Takve peći upotrebljavaju se za kalciniranje, klorirajuće prženje, raščinjavanje i redukciju.

Kalciniranje u etažnim pećima primjenjuje se u preradbi smitsonitnih i njima srodnih cinčanih ruda, magnezita, dolomita i boksita. Kalciniranje cinčanih ruda dolazi u obzir kad udio srebra i kadmija u rudi nije velik, jer su za njihovo izoliranje isparivanjem potrebne temperature koje su previsoke za etažne peći. Dolomit i magnezit kalciniraju se u etažnim pećima kad je potreban visokoreaktivan, nesinteriran

kalcinat, a boksit kad treba povišiti topljivost aluminij(III)-oksida, npr. za proizvodnju aluminijevih soli.

Klorirajuće prženje u etažnim pećima primjenjuje se u proizvodnji neželjeznih metala od prženaca dobivenih oksidacijskim prženjem piritnih i pirhotinskih ruda. Kao reagens služi kuhinjska sol. Taj se postupak isplati kad je udio neželjeznih metala u sirovini veći od 2%, a udio bakra manji od 0,8%.

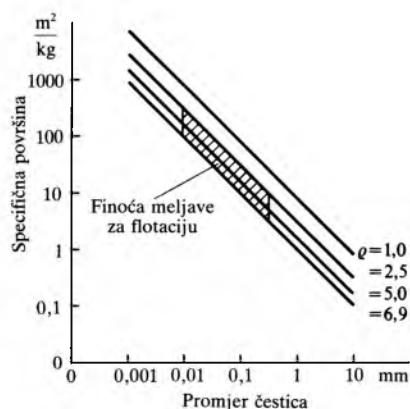


Sl. 11. Shema procesa etažne peći s grijanjem etaža zasebnim plamenicima

Raščinjavanje se u etažnim pećima primjenjuje za dobivanje vanadija i volframa iz troski. Osim oksidacije kisikom iz zraka, u etažnim se pećima provode i reakcije s natrij-karbonatom i natrij-kloridom.

Redukcija u etažnim pećima primjenjuje se u proizvodnji nikla od oksidnih ruda, i to u pećima promjera do 7 m, koje imaju do 16 etaža.

Peći za prženje praha služe za prženje za vrijeme slobodnog pada čestica s jedne etaže na drugu. Da bi se to ostvarilo, potrebno je da omjer specifične površine čestica i njihova promjera bude velik (sl. 12), što omogućuje potpunu reakciju za vrijeme slobodnog pada. Prženje je praha, dakle, moguće kad su dimenzije čestica vrlo male ($10 \cdots 150 \mu\text{m}$). Međutim, izlazni plinovi nose zbog toga znatan dio tih čestica, pa je plinove potrebno vrlo djelotvorno čistiti (v. Čišćenje plinova, TE 3, str. 115).

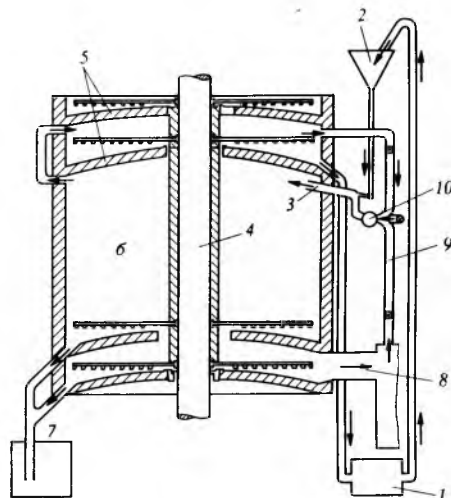


Sl. 12. Ovisnost specifične površine kuglastih čvrstih čestica o njihovom promjeru (gustoća ρ u kg/dm^3)

Zbog dobrog kontakta između čestica praha i plina postiže se veća brzina reakcije i bolje izgaranje, pa je udio sumpora u čvrstom proizvodu vrlo malen. U takvim se pećima postiže temperatura za $200 \cdots 250^\circ\text{C}$ viša nego u pećima s mirnim slojem, ali ona ne smije toliko porasti da se metal rastali.

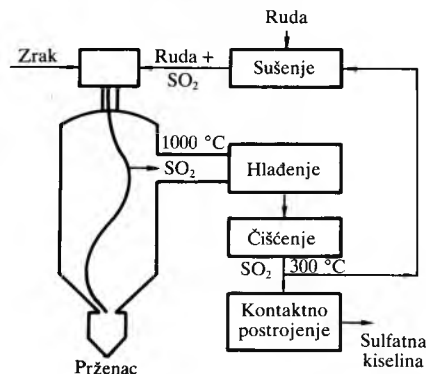
Prva peć za prženje praha izgrađena je u Kanadi (*Trail-peć*, sl. 13). Bila je to etažna peć s međuprostorom za prženje

praha u slobodnom padu. U gornjem se dijelu peći nalaze jedna ili dvije etaže za sušenje, a u donjem su dijelu dvije etaže za hlađenje proizvoda i za predgrijavanje reakcijskog plina. Za uspješno vođenje procesa čestice praha moraju biti manje od $75 \mu\text{m}$. Da bi se iskoristila velika brzina reakcije, a da se temperatura ne poviši iznad temperature tališta, u peć se vraća dio ohlađenih izlaznih plinova. Učin je takve peći velik, pa npr. peć za preradbu cinkova sjajnika, s promjerom 7 m i visinom 13 m, ima dnevni učin oko 320 t.



Sl. 13. Princip Trail-peći za prženje praha. 1 mlin za mljevenje osušenog ruda, 2 dovod osušenog praha, 3 gorionici praha, 4 šuplje vratilo s grabljama, 5 etaže za sušenje i predgrijavanje, 6 komora za prženje praha, 7 odvod prženca praha, 8 odvod plinova, 9 dovod vrućeg plina ventilatoru, 10 ventilator za zrak i vruće plinove

Da bi se izbjeglo fino mljevenje, potrebno za prženje u Trail-peći, razvijena je *Nichols-Freemannova peć* (*Flash-Roaster*, sl. 14), u kojoj se pomoću pneumatskog dovodnog agregata ostvaruje spiralno gibanje čestica. U toj se peći mogu pržiti sirovine s česticama manjim od $150 \mu\text{m}$, a također je potrebno dovoditi ohlađene izlazne plinove. Takve se peći upotrebljavaju samo za prženje pirita.



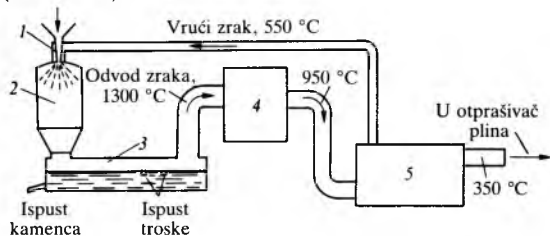
Sl. 14. Shema procesa Nichols-Freemannove peći

Peći za taljenje u lebdećem stanju. U osnovi se peći za taljenje u lebdećem stanju ne razlikuju od peći za prženje praha, osim što se proizvodi dobivaju kao taline i što se zbog visokih temperatura hlapljivi sastojci sirovine odjeljuju od nehlapljivih.

Jedan je od prvih postupaka taljenja u lebdećem stanju tzv. *autogeno taljenje*. To je postupak finske tvrtke *Outokumpu* za preradbu koncentrata bakrenih i niklenih ruda u kamence s velikim udjelom metala, a uz uklanjanje drugih komponenata isparivanjem i odjeljivanje nemetalnih primjesa u obliku troske. U reakcijsku se komoru (sl. 15) kroz plamenik dovodi osušeni fino samljeni koncentrat. Talina pada u ognjište iz kojega se kamenac i troska odijeljeno odvođe. Vrući se plinovi iz ognjišta odvođe u parni kotao, a

zatim u izmjenjivač toplote za zagrijavanje zraka potrebnog za proces u reakcijskoj komori. Velika specifična površina koncentrata od $20 \dots 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ omogućuje vrlo brzu kemijsku reakciju, ali je toplinsko opterećenje reakcijske komore ograničeno ($0,8 \dots 2,1 \text{ TJ h}^{-1} \text{ m}^{-3}$), jer je za veća opterećenja nemoguće osigurati dovoljnu turbulenciju suspenzije zraka i čvrstih čestica.

Rude s dodacima
($120 \dots 150^\circ \text{C}$)

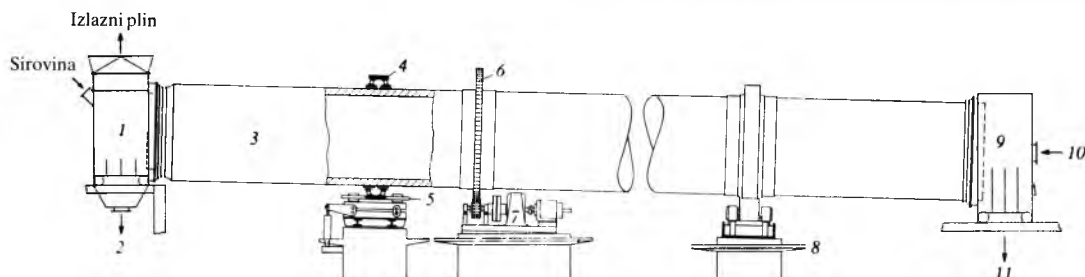


Sl. 15. Postupak autogenog taljenja (Outokumpu). 1 gorionik, 2 reakcijska komora, 3 ognjište, 4 komora za hlađenje plinova (parni kotao), 5 izmjenjivač toplote

Rotacijske peći

Rotacijske su peći čelični cilindri (sl. 16) s nagibom od $2 \dots 5\%$, iznutra obloženi vatrootalnim ozidom, koji rotiraju s brzinom vrtnje od $0,5 \dots 1,5 \text{ min}^{-1}$. U njima se materijal i plinovi vode u istom smjeru ili protustrujno. Materijal koji se prerađuje kreće se okretanjem peći od višega prema nižem dijelu, a plinovi služe ili samo kao nosioci toplote ili još i kao sudionici u kemijskim reakcijama. Proces u rotacijskim pećima moguć je samo uz mali stupanj punjenja ($8 \dots 20\%$ od volumena peći). U njima je moguće pogodnim uređajima za loženje održavati željeni temperaturni režim, a promjenom brzine vrtnje može se mijenjati trajanje zadržavanja materijala. Osim toga, u sloju materijala moguće je održavati atmosferu različitu od one u prostoru iznad tog sloja.

Suvremene rotacijske peći nastale su od rotacijskih komora koje su se u prošlom stoljeću upotrebljavale za kalciniranje sode. Prve rotacijske peći upotrijebljene su 1885. godine za proizvodnju cementa (v. *Cementi*, TE 2, str. 585) i u metalurgiji. Nakon prvoga svjetskog rata primjena se rotacijskih peći sve više širila. Danas se rotacijske peći upotrebljavaju za proizvodnju cementa, željeza i neželjeznih metala. Rotacijske peći za proizvodnju cementa grade se s vanjskim promjerom do 7 m, a za mokri postupak proizvodnje cementa i do duljine od 200 m.



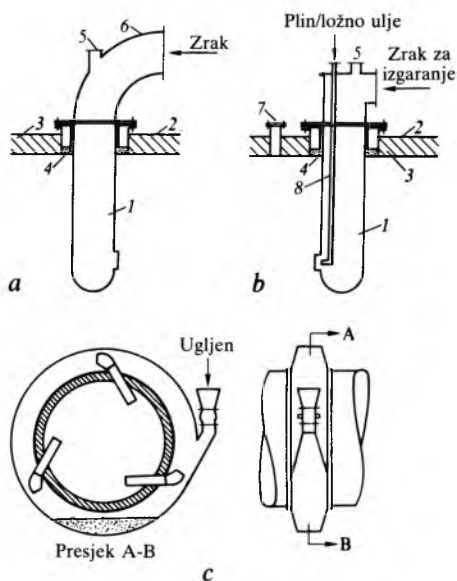
Sl. 16. Rotacijska peć. 1 dovodna glava peći, 2 odvod praha, 3 cilindar peći, 4 prsten oslonca, 5 tlačni valjak, 6 ozupčani vijenac, 7 pogonski sklop, 8 temeljna ploča s ležajnim osloncem, 9 odvodna glava peći, 10 dovod goriva, 11 odvod proizvoda

Konstrukcija rotacijskih peći. Glavni su dijelovi rotacijskih peći: plašt, ozid, unutrašnji uređaji, prsteni za vrtnju, oslonci, glave peći i pogonski sklop.

Plašt rotacijske peći izrađen je od električno zavarenih čeličnih limova debelih $20 \dots 40 \text{ mm}$ u glavnom dijelu, a do 100 mm na dijelu pod prstenima za pogon i valjanje. Plašt je napregnut na savijanje djelovanjem vrtnje, vlastite težine, ozida i materijala koji se prerađuje. Djelomično punjenje uvjetuje ovalnu deformaciju plašta.

Ozid peći od vatrootalnih je opeka, kojih sastav ovisi o vrsti procesa. U pećima za proizvodnju cementa upotrebljavaju se magnezitne opeke u zoni pečenja klinkera, a kisele u zoni predgrijavanja. U pećima za redukciju željeza vatrootalne su opeke od aluminij-oksida s malim udjelom željeza ili od korunda sa 75% aluminij-oksida.

Unutrašnji uređaji rotacijskih peći obuhvaćaju uglavnom uređaje za dodatno zagrijavanje. U suvremenim pećima izbjegava se upotreba uređaja za poboljšanje miješanja i transporta (lopatasti prekretači, uzdužna rebra), jer je njihova trajnost ograničena. Uređaji za dodatno zagrijavanje upotrebljavaju se u pećima za endotermne procese, kad grijanje s glave nije dovoljno. To mogu biti cijevi za ubrizgavanje zraka (sl. 17a), uljni ili plinski gorionici (sl. 17b) ili dodavači ugljena (sl. 17c).



Sl. 17. Uređaji za dopunsko grijanje rotacijskih peći. a cijev za dovod zraka, b gorionik, c dodavači ugljena; 1 cijev, 2 plašt peći, 3 ozid peći, 4 brtva od nabijene mase, 5 priključak za mjerenje, 6 priključno koljeno, 7 nastavak za paljenje, 8 dovod goriva

Prstenovi za vrtnju služe za ojačanje plašta peći na osloncima i na pogonskom dijelu. Za manje peći izrađuju se bešavno od jednog čeličnog odjeljka, a oni za veće peći od lijevanih segmenata, koji se električki zavaruju pod troskom.

Oslonci rotacijskih peći moraju ne samo preuzimati opterećenja za vrijeme pogona peći nego i osigurati nesmetanu

vrtnju. Oni se sastoje od para glatkih valjaka (sl. 18) s kliznim ležajima. Da bi se postigla statička jednoznačnost, ne bi smjelo biti više od dva oslonca. Kako je, međutim, dopušten maksimalni razmak između dva susjedna oslonca ($8 \dots 10D$) (gdje je D promjer peći), duge se peći oslanjaju na oslonce, kojih može biti i do šest. Udaljenost oslonaca od krajeva peći ne smije biti veća od $(2 \dots 2,5)D$, da bi se spriječilo preveliko savijanje fiksnih dijelova peći.

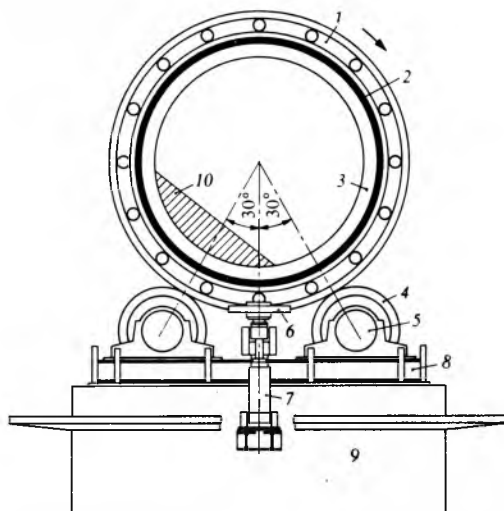
Glave rotacijskih peći stacionarni su dijelovi za dovod sirovine, goriva i zraka, te za odvod proizvoda i plinova. Njihova konstrukcija ovisi o načinu vođenja procesa (istosmjerno ili protusmjerno strujanje) i o vrsti goriva.

Pogonski sklop sastoji se od zupčanog vijenca na prstenu peći što ga preko zupčanika tjera elektromotor kojem se brzina vrtnje može kontinuirano regulirati. Snaga potrebna

za pogon rotacijske peći približno iznosi

$$P = 0,07 D^3 L \rho n \sin^3 \alpha, \quad (1)$$

gdje je D promjer peći, L njezina duljina, ρ gustoća procesnog materijala, n brzina vrtnje (min^{-1}), a α karakteristični kut koji ovisi o nagibu peći i kutu trenja materijala u peći.

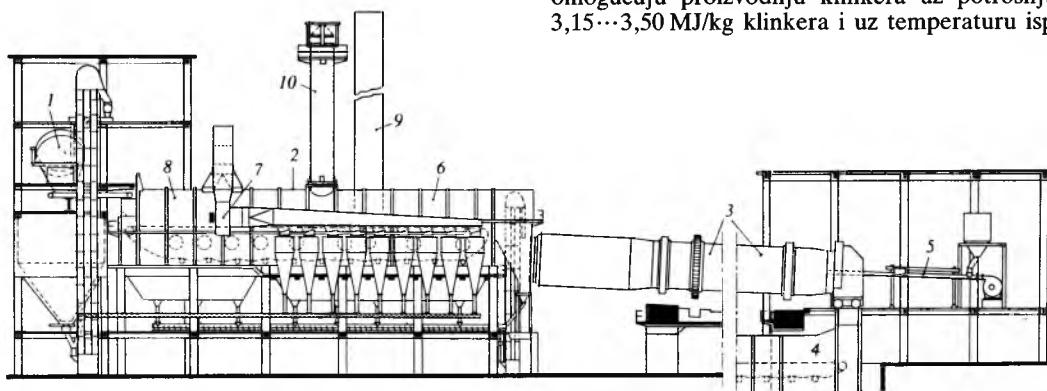


Sl. 18. Presjek kroz oslonac rotacijske peći. 1 klizni prsten, 2 plašt peći, 3 ožid, 4 valjak za kotrljanje, 5 ležajno postolje, 6 tlačni kotač, 7 hidraulička vodicica, 8 temeljna ploča, 9 temelj, 10 zasip

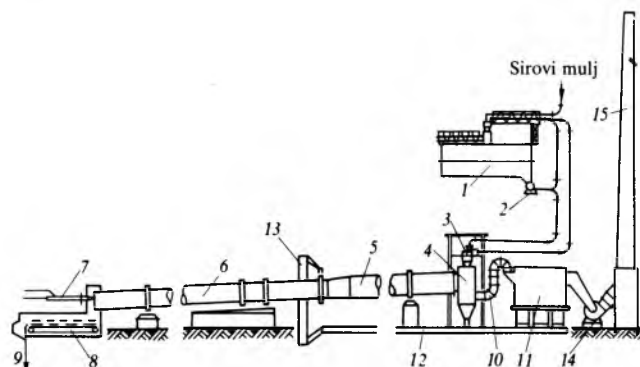
Osim glavnoga, često rotacijske peći imaju i rezervni pogonski sklop koji se stavlja u pogon kad za vrijeme pogona prestane djelovati glavni pogonski sklop. Za pogon rezervnog sklopa služi motor s unutrašnjim izgaranjem, a potreban je za okretanje peći s vrlo malom brzinom vrtnje (4 h^{-1}), da bi se spriječilo savijanje peći zbog nejednolikog hlađenja.

Rotacijske peći za proizvodnju cementa služe u prvom redu za pečenje (v. *Cementi*, TE 2, str. 585), a njihova konstrukcija ovisi o primijenjenom postupku. Postoji, naime, mokri, polusuhi i suhi postupak, ovisno o stanju sirovine koja se dovodi u rotacijsku peć. Za mokri postupak sirovina je u obliku mulja; za polusuhi postupak udio vlage u sirovini iznosi 12...20%.

U proizvodnji cementa *mokrim postupkom* u istoj se rotacijskoj peći (sl. 19) suši sirovina i peče klinker. Takve peći imaju veći promjer u zoni pečenja, a ponekad i u zoni sušenja. Da bi se poboljšalo iskorištenje topline, upotrebljavaju se komorni izmjenjivači topline s pokretnom rešetkom u kojima se predgrijava zrak proizvedenim klinkerom. Potrošnja je energije u tim pećima relativno velika ($5,0 \dots 6,7 \text{ MJ/kg}$ klinkera uz temperaturu ispušnih plinova od $160 \dots 200^\circ \text{C}$).

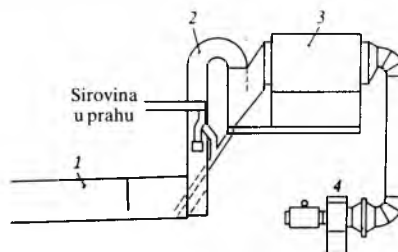


Sl. 20. Shema postrojenja za proizvodnju cementa polusuhih postupkom. 1 tanjur za granuliranje, 2 uređaj s rešetkom za sušenje i predgrijavanje sirovine (Lepol-uređaj), 3 rotacijska peć za sinteriranje, 4 hladionik klinkera i predgrijač zraka, 5 središnji plamenik, 6 vruća komora, 7 ventilator, 8 komora za sušenje, 9 dimnjak za odvod izlaznih plinova, 10 pomoćni dimnjak



Sl. 19. Shema postrojenja za proizvodnju cementa mokrim postupkom. 1 taložnik, 2 pumpe, 3 dovod sirovog mulja, 4 dovodna glava peći, 5 zona sušenja, 6 zona sinteriranja, 7 središnji plamenik, 8 hladionik klinkera, 9 odvod klinkera, 10 odvod izlaznih plinova, 11 elektrofilter, 12 transporter prašine iz filtra, 13 uređaj za recirkulaciju prašine, 14 ventilator odvoda izlaznih plinova, 15 dimnjak

Manje se energije troši primjenom *polusuhog postupka* ($3,4 \text{ MJ/kg}$ klinkera). Uređaj se sastoji (sl. 20) od komornog izmjenjivača topline s pokretnom rešetkastom trakom na kojoj se suši i predgrijava sirovina, te od kratke rotacijske peći koja služi samo za sinteriranje. Prije dovodenja u izmjenjivač topline sirovina se granulira tanjurastim granulatom. Za sušenje i zagrijavanje sirovine upotrebljavaju se vrući plinovi iz rotacijske peći. Zrak potreban za izgaranje predgrijava se prilikom hlađenja klinkera.

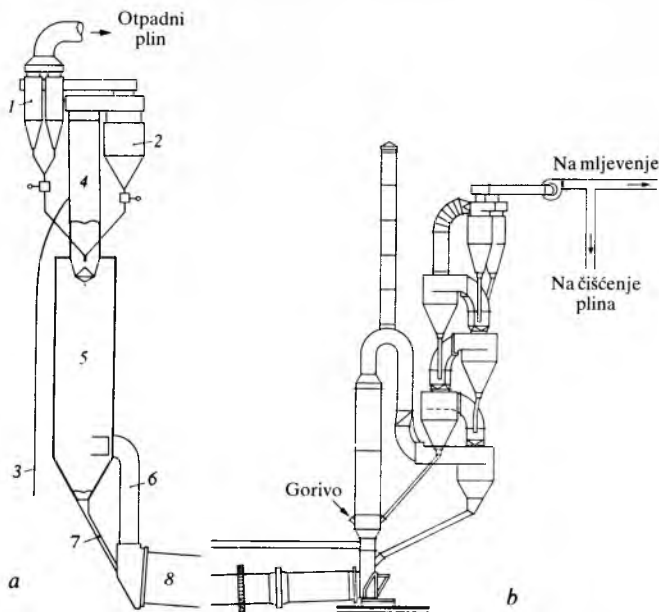


Sl. 21. Dovod sirovine u dugu rotacijsku peć za proizvodnju cementa suhim postupkom s elektrofilterom kao izmjenjivačem topline. 1 peć, 2 komora za prašinu, 3 elektrostatski filter, 4 ekshaustor za izlazni plin

Sa stajališta potroška energije najpovoljniji je *suhi postupak*. Postrojenja se razlikuju prema tipu izmjenjivača topline. U postrojenjima s elektrostatskim filterom kao izmjenjivačem topline za predgrijavanje sirovine (sl. 21) potrošak energije iznosi $\sim 3,3 \text{ MJ/kg}$ klinkera čak i uz temperaturu ispušnih plinova od $\sim 350^\circ \text{C}$.

Izmjenjivači topline sa sirovinom u lebdećem stanju omogućuju proizvodnju klinkera uz potrošnju energije od $3,15 \dots 3,50 \text{ MJ/kg}$ klinkera i uz temperaturu ispušnih plinova

od 330...350 °C. Njihova jamna varijanta (sl. 22a) ima relativno malu efikasnost, ali su takvi izmjenjivači topline jednostavni i jeftini. Ciklonski su izmjenjivači (sl. 22b) složeniji, ali se ipak mnogo upotrebljavaju.



Sl. 22. Izmjenjivači topline za predgrijavanje prašnaste sirovine u proizvodnji cementa suhim postupkom. *a* jamni, *b* ciklonski peterostepeni izmjenjivač topline; 1 dvostepeni ciklon, 2 predciklon, 3 dovod sirovine, 4 komora za hranjenje, 5 jamni izmjenjivač topline, 6 odvod plinova, 7 odvod materijala, 8 rotacijska peć

Rotacijske peći u crnoj metalurgiji upotrebljavaju se za aglomeriranje željeznih ruda peletiziranjem (v. *Gvožđe*, TE 6, str. 320), za tzv. magnetizirajuće, odnosno redukcijско prženje sideritnih, limonitnih i hematitnih ruda slabije kakovosti (v. *Gvožđe*, TE 6, str. 319) i za direktnu redukciju željeznih ruda (v. *Gvožđe*, TE 6, str. 333).

Za *peletiziranje* se upotrebljavaju rotacijske peći slične onima za polusuhi postupak proizvodnje cementa.

Magnetizirajućim prženjem od siromašnijih željeznih ruda dobiva se koncentrirani magnetit. Zagrijavanjem po cijeloj duljini peći na temperaturu od 700...800 °C u reducirajućoj atmosferi od nemagnetnog željezo(III)-oksida dobiva se magnetni željezo(II,III)-oksid. Da bi se spriječio prodor zraka u peć, mora se predvidjeti dobro brtvljenje svih spojeva između glava i cilindra peći.

Pod *direktnom redukcijom željeznih ruda* razumijeva se proizvodnja spužvastog željeza, te procesi djelomične redukcije i predredukcije. Procesi direktne redukcije slični su magnetizirajućem prženju, pa su i postrojenja slična. I u njima je potrebno spriječiti kontakt atmosfere u peći s vanjskom atmosferom.

U *pečima za proizvodnju spužvastog željeza* visokovrijedna ruda ili koncentrat reducira se u željezo spužvastog izgleda, koje se upotrebljava za proizvodnju čelika u elektrolučnim pečima. U rotacijskim pečima sirovina prolazi kroz zone sušenja, ugrijavanja i isplinjavanja prije nego što stigne u redukcijisku zonu. Kao redukcijisko sredstvo upotrebljavaju se sve vrste ugljena. Tako se spužvasto željezo može proizvesti i od materijala koji se ne mogu preraditi u visokim pečima (željezni pijesak, titanove rude, ogorine i dr.).

Djelomična redukcija postupak je preradbe kojoj je svrha da se ukloni željezo ili da se dobiju drugi metali. Provodi se u pečima sličnim onima za proizvodnju spužvastog željeza. Tako se, npr., osim dobivanja titan(IV)-oksida direktnom redukcijom ilmenita, izdvajaju oksidi cinka i olova iz ostataka luženja bakrenih i cinčanih ruda. Oni se izdvajaju iz izlaznih plinova, dok bakar, zlato i srebro ostaju u spužvastom željezu iz kojeg se izdvajaju daljom preradbom. Slično se provodi direktna redukcija prašine iz željezara (iz grotlenog plina i konvertorskih plinova, ogorina od valjanja i dr.).

Predredukcija je postupak za djelomično otcjepljivanje kisika (30...70% kisika) iz minerala željeznih ruda. Kao priprema za potpunu redukciju, taj postupak može biti ekonomičan kad je udio jalovine u rudi velik. Redukcijske rotacijske peći služe tada kao postrojenja za pripremu sirovine za preradbu u redukcijiskim elektropečima.

Rotacijske peći u obojenoj metalurgiji služe za konverziju metalnih spojeva u rudama u isparljive spojeve i za njihovo izdvajanje isparivanjem. U tu svrhu mora u peći vladati tlak i temperatura koji omogućuju isparivanje i stvaranje potrebnih spojeva. Takvom se postupku mogu podvrći rude cinka, olova, arsena, kositra, srebra, žive i kadmija. Pri tom treba razlikovati postupak isparivanja u redukcijскоj od postupaka isparivanja u oksidacijskoj atmosferi. Osim toga, prvi od spomenutih postupaka može biti postupak preokretanjem i klinkerski postupak.

Postupak preokretanjem, tokom kojeg se stalno prevrće materijal u redukcijскоj atmosferi rotacijske peći, služi za dobivanje metalnog cinka, olova i kadmija u obliku praha vrlo bogatog tim metalima. Sirovine su siromašne oksidne cinčane i olovne rude, prašina koja sadrži cink, olovo i talioničke otpatke i troska koja sadrži te metale. Glavne reakcije u tim procesima, redukcija oksida cinka i kadmija u metale i olovo-sulfata u olovo-sulfid, zbiva se u čvrstoj fazi, a ponovna oksidacija tih međuprodukata u plinskoj fazi. Te reoksidirane tvari nose sa sobom i ispusni plinovi, iz kojih se odvajaju hlađenjem. Pri dimenzioniranju rotacijskih peći za te procese treba uzeti u obzir da je isparivanje endotermno, a ponovna oksidacija egzotermna.

Preokretanjem se preraduju i siromašne rude arsena i antimona. Arsen i antimon razdvajaju se selektivnim isparivanjem svojih oksida, jer je hlapljivost arsen(III)-oksida mnogo veća od hlapljivosti antimon(III)-oksida (različite su im temperature sublimacije). Ako u sirovini ima oksida peterovalentnih metala, za redukciju treba dodati i ugljen.

Klinkerski postupak služi za preradbu prašine dobivene postupkom preokretanja da bi se oksidi olova i kadmija odvojili od cink-oksida. Provodi se u manjim redukcijiskim pečima u blago reducirajućoj atmosferi. Tada se isparuju samo oksidi olova i kadmija, a u čvrstom se materijalu cink-oksid sinterira u klinker.

Postupci u oksidirajućoj atmosferi u rotacijskim pečima obuhvaćaju preradbu ruda koje sadrže arsenove i antimonove spojeve, preradbu živinih ruda i prašine dimnih plinova koja sadrži srebrne spojeve.

Spojevi arsena i antimona mogu se ispariti iz ruda u oksidirajućoj atmosferi rotacijskih peći kad je jalovina siromašna vapnencem i spojevima željeza.

Živa je u rudama pretežno vezana u sulfid, koji se u oksidirajućoj atmosferi konvertira u metalnu živu (u obliku pare) i u sumpor(IV)-oksid. Zbog otrovnosti žive mora njeno izdvajanje hlađenjem i kondenzacijom biti vrlo djelotvorno. Rotacijske peći upotrebljavaju se za dobivanje žive samo iz siromašnih ruda, dok se bogatije rude preraduju u etažnim pečima.

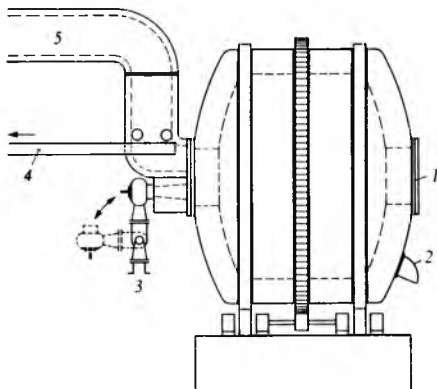
Spojevi srebra koji se nalaze u prašini nekih izlaznih plinova mogu se ispariti ugrijavanjem u oksidirajućoj atmosferi ako je udio silicij(IV)-oksida u prašini vrlo malen. Nakon toga spomenuti se spojevi konvertiraju u srebro-oksid. Takvim se postupkom srebro može koncentrirati.

Specijalne rotacijske peći obuhvaćaju neke rotacijske peći s unutrašnjim grijanjem. Glavne su među njima rotacijske peći za neke specijalne redukcijiske procese, procese žarenja i kalciniranja, za proizvodnju žarenog fosfata, za redukciju barita u barij-sulfid (v. *Barij*, TE 1, str. 686), natrij-sulfata u natrij-sulfid i kobalt-oksida za dobivanje kobaltnog praha (v. *Kobalt*, TE 7, str. 181). Međutim, tipično specijalne rotacijske peći jesu one s indirektnim grijanjem i bubnjaste peći.

Rotacijske peći s indirektnim grijanjem služe za procese u kojima plamen štetno djeluje na proizvode. Upotrebljavaju se za žarenje nekih mineralnih bojila, osobito litopona i titanskih bojila (v. *Pigmenti*, TE 10, str. 266) i u proizvodnji sode (v. *Natrij*, TE 9, str. 270) kao peći za kalciniranje.

Cilindar tih peći rotira u komori od vatrostalnog materijala grijanog izgaranjem čvrstog goriva.

Bubnjaste peći (sl. 23) približavaju se svojim oblikom kugli da bi se što više smanjili gubici topline. One su zapravo rotirajuće plamene peći. U takvim pećima zbog njihove vrtnje toplina ozida prelazi na materijal konvekcijom. Diskontinuirani pogon osnovna je njihova karakteristika. Na jednoj strani nalazi se otvor za punjenje, a na drugoj strani plamenici i odvod dimnih plinova. Na kraju radnog ciklusa iz njih se posebno odvodi troska, kamenac i rastaljeni metal. Upotrebljavaju se za preradu ruda, troski i talioničkih otpadaka, te za pretaljevanje i rafinaciju teških metala.



Sl. 23. Bubnjasta peć. 1 vrata za punjenje, 2 ispust, 3 prekretni plamenik, 4 pomični dimovod, 5 odvod plinova u kotlovnicu

PEĆI ZA NEKATALITIČKE REAKCIJE U FLUIDIZIRANOM SLOJU

Procesi s nekatalitičkim reakcijama glavno su područje primjene peći s procesima u fluidiziranom sloju. Prva je primjena postupka fluidizacije bila rasplinjavanje ugljena u Winklerovu plinskom generatoru (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 395) dvadesetih godina ovog stoljeća. Četrdesetih godina primjena se tih peći postepeno počela širiti i u druga područja procesne tehnike. Iako još ne postoji mogućnost točnijeg proračuna za dimenzioniranje i oblikovanje tih peći, njihova se primjena i dalje sve više širi.

Proces fluidizacije (v. *Fluidizacija*, TE 5, str. 487). Ako brzina strujanja plina kroz sloj sitnozrnate čvrste tvari raste, povećava se pad tlaka plina na tom putu sve dok se ne stvori *vrtožni sloj*. Tada tlak ostaje konstantan usprkos daljem povećanju brzine strujanja plina, a vrtožni se sloj širi i čvrste se čestice sve intenzivnije gibaju. S daljim povećanjem brzine strujanja plin počinje odnositi čvrste čestice, pa se njihova koncentracija u vrtožnom sloju može održavati samo dodavanjem novog materijala ili povratom čestica koje je plin odnio iz sloja. Kad brzina strujanja plina dovoljno poraste, struja će plina sa sobom ponijeti sve čvrste čestice, bez njihova zadržavanja u vrtožnom sloju, što se naziva *pneumatskim transportom*.

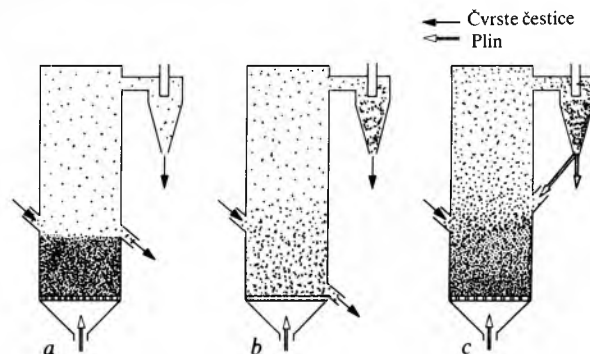
Već prema dimenzijama čestica mogu se ostvariti različiti tipovi vrtožnog sloja (sl. 24). Kad postoji točno definirana granica između vrtožnog sloja i područja s malom koncentracijom čestica (sl. 24a), stanje se naziva *fluidiziranim slojem*. Drugi se tip pojavljuje kad vrtožni sloj toliko ekspandira da plin sa sobom nosi većinu ili sve čestice pa se one pojavljuju na izlazu iz reaktora (sl. 24b). Tada se govori o *rijetkoj fazi*. Prijelazno je stanje ono (sl. 24c) u kojem se održava veća koncentracija čvrstih čestica u donjem dijelu reaktora povratom čvrstih čestica. Slično reaktorima s rijetkom fazom rade reaktori stožastog oblika, pa se tada govori o *Venturijevim fluidiziranim slojevima*.

Za zadanu gustoću čvrste tvari i zadanu gustoću i kinematičku viskoznost plina na radnoj temperaturi, tip vrtožnog sloja ovisi o brzini strujanja plina i promjeru čestica čvrste tvari. Vrijednosti su tih veličina u vrlo širokim granicama. Tako se npr. plinom brzine 0,02...0,05 m/s može

rastresati mirni sloj čvrstih čestica promjera 10...20 μm, a plinom brzine od 20 m/s sloj čestica promjera 8...10 mm. Peći s fluidiziranim slojem mogu funkcionirati kad se Reynoldsova značajka Re_k , preračunata na čvrstu česticu, nalazi u granicama od $1 \cdot 10^{-2}$... $5 \cdot 10^4$. Ta se značajka određuje iz izraza

$$Re_k = \frac{v_0 d_k}{\nu}, \quad (2)$$

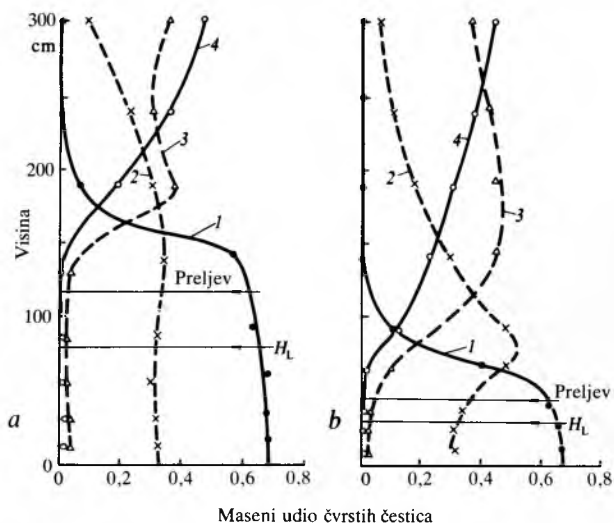
gdje je v_0 brzina plina u peći računata kao da je peć prazna, d_k promjer čestica, a ν kinematička viskoznost plina. Donja je granica navedenog intervala određena zahtjevom da se spriječi prianjanje čestica na stijenke reaktora i da se omogući odvajanje čestica iz plina na izlazu iz reaktora (čestice s promjerom manjim od 5 μm ne mogu se odvojiti u ciklonu). Gornja je granica uvjetovana zahtjevom da se spriječi oštećenje stijenki reaktora udaranjem čestica. To je oštećenje moguće već i onda kad je udio većih čestica malen. Osim toga, s povećanjem Reynoldsove značajke uzrokovanim povećanjem promjera čestica smanjuje se dodirna površina između plina i čvrste tvari, pa to smanjuje prijelaz topline i tvari. Zbog većeg udjela većih čestica u fluidiziranom sloju trebalo bi povećati brzinu strujanja plina, ali se tada skraćuje vrijeme zadržavanja plina u sloju, a time i djelotvornost difuzijskih procesa potrebnih za odvijanje reakcija. Zbog toga već kad je $Re_k = 1 \cdot 10^2$ mora se pažljivo razmotriti udio čestica različitih dimenzija u sloju.



Sl. 24. Tipovi vrtožnog sloja. a fluidizirani sloj, b vrlo ekspandirani fluidizirani sloj, c prijelazno stanje između a i b s djelomičnim povratom čvrstih čestica

Zbog toga se primjenjuju procesi s vrlo ekspandiranim fluidiziranim slojevima finozrnatih čestica (sl. 24b i c) jer je tada specifična površina izmjene velika, pa su veliki i preradbeni učinci.

Utjecaj dimenzija čestica u fluidiziranom sloju. Fluidizirani slojevi sitnozrnatih čestica mogu se lako održavati primjere-



Sl. 25. Raspodjela čestica po visini u fluidiziranom sloju uz višu (a) i nižu (b) razinu mirnog sloja (H_L). 1 čestice > 149 μm, 2 čestice od 88...149 μm, 3 čestice od 53...88 μm, 4 čestice < 53 μm

nom brzinom strujanja plina i mehaničkim miješanjem. Mnogo je teže, međutim, održavati fluidizirani sloj velikih čestica zbog njihovih međusobnih žestokih sudara. Taj se nedostatak ponekad ublažuje dodavanjem male količine sitnih čestica. Tako se, npr., bez poteškoća može održavati fluidizirani sloj čestica promjera $20\cdots 200\ \mu\text{m}$ i visine $10\cdots 15\ \text{m}$, dok visina sloja ne može biti veća od $1\ \text{m}$ kad su čestice promjera $1\cdots 3\ \text{mm}$. Veće se čestice rijetko mogu drukčije fluidizirati nego u tzv. *vrijućem sloju*. To je pomični sloj u kojem se oko njegove osi održava fluidizirani sloj s manjom koncentracijom čvrste tvari. Takva se fluidizacija malo upotrebljava zbog malih kontaktnih površina i kratkog trajanja kontakta između procesnih faza.

Osnovna je karakteristika raspodjele čestica različitih dimenzija u pećima s fluidiziranim slojem da se veće čestice više zadržavaju u donjem, a manje čestice u gornjem dijelu peći (sl. 25). Ta se raspodjela ne može računski odrediti jer ovisi ne samo o brzini strujanja plina nego i o raspodjeli zračnih mjehura (poroznosti) u fluidiziranom sloju, koja je, među ostalim, ovisna i o konstrukciji rešetke na dnu reaktora.

Tipovi reakcija u fluidiziranom sloju. Već prema tome da li se reakcije odvijaju u plinovitoj ili čvrstoj fazi, odnosno da li su proizvodi čvrsti ili plinoviti, mogu se čestice smanjiti, zadržati jednake dimenzije ili se povećati, pa se razlikuje pet tipova reakcija:

a) čvrste čestice zadržavaju svoje dimenzije, brzo i kontinuirano reagiraju sve do svoje jezgre. Pri tome mogu postati porozne. Takve se reakcije nazivaju *kontinuiranim*. To su, npr., procesi dobivanja aktivnog ugljena i kalciniranja aluminij(III)-hidroksida.

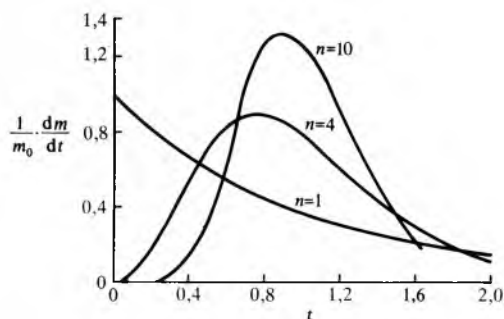
b) u reakcijama bez pretvorbe jezgre čestice zadržavaju svoje dimenzije, reakcija polagano napreduje s njihove površine do jezgre koja ne sudjeluje u reakciji. Brzina je reakcije određena difuzijom kroz plinski ili reakcijski sloj, ili kemijskom ravnotežom. Takvi se procesi primjenjuju za redukciju željeznih ruda s visokim stupnjem redukcije i za pečenje vapna od velikih komada vapnenca.

c) čestice se raspadaju razaranjem kristalnih mostova, pa zatim reagiraju manje čestice. To su, npr., procesi za cijepanje magnezij-sulfata u redukcijskoj atmosferi u magnezij-oksidi i sumpor(IV)-oksidi.

d) čestice se smežuravaju tokom reakcije, pa se smanjuju razvijanjem plinova ili otpadanjem pepela. To se događa pri rasplinjavanju ugljena i prženju pirita.

e) dimenzije čestica rastu tokom reakcije aglomeriranjem ili nastajanjem novih čvrstih čestica, npr. kao u procesima oblaganja uran-karbida i cijepanja željezo(III)-klorida.

Trajanje zadržavanja i broj stupnjeva. Za konstrukciju peći za nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju važno je trajanje zadržavanja plina i čestica čvrste tvari u tom sloju. Prosječno trajanje zadržavanja plina u prvom je redu funkcija brzine strujanja plina i visine vrtložnog sloja, a raspodjela trajanja ovisi o jednolikosti toga strujanja. Zbog toga se pojavljuju poteškoće pri određivanju trajanja zadržavanja, pogotovo u procesima s reakcijama u kojima sudjeluju plinovi.

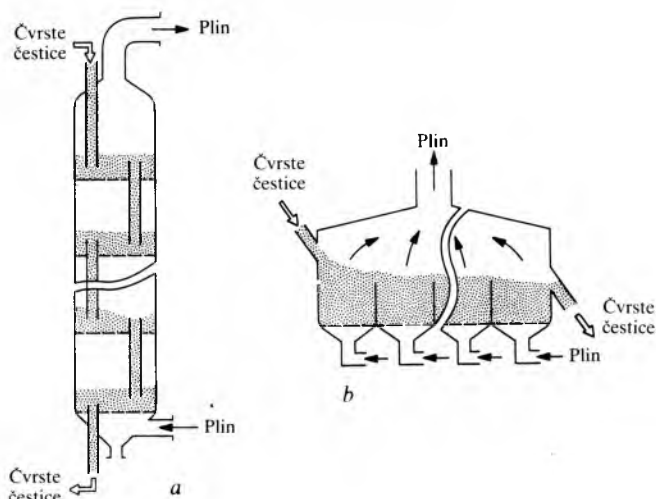


Sl. 26. Raspodjela trajanja zadržavanja čvrstih čestica tokom strujanja kroz komore u kojima su čestice idealno izmiješane (n broj stupnjeva, $t = 1$ srednje trajanje zadržavanja, dm/m_0 udio čestica u ukupnoj masi čestica m_0 , s vremenom zadržavanja između t i $t + dt$, $(1/m_0) \cdot (dm/dt)$ frekvencija trajanja zadržavanja)

Srednje je trajanje zadržavanja čvrstih čestica u kontinuirano hranjenim reaktorima određeno omjerom volumena sloja i protoka materijala. To zadržavanje iznosi od $30\ \text{s}$ u vrlo ekspaniranom Venturijevu sloju, do nekoliko sati u reaktorima za plinsku redukciju željeznih ruda u visokom, malo ekspaniranom fluidiziranom sloju.

Za proračun trajanja zadržavanja dobivaju se složene funkcije, koje ovise i o broju stupnjeva procesa (sl. 26). Vidi se da se stvarno trajanje zadržavanja čestica u fluidiziranom sloju približava srednjoj vrijednosti s povećanjem broja stupnjeva procesa (na sl. 26 trajanje $t = 1$ odgovara srednjoj vrijednosti).

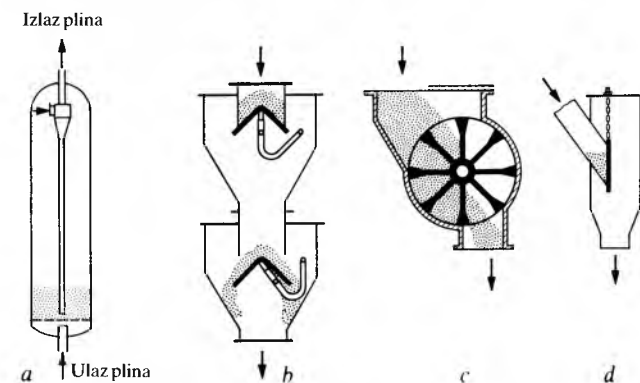
Da se uz kontinuirano dovodenje materijala i dovoljnu srednju brzinu strujanja plina reakcija dovrši, najčešće je dovoljan jednostepeni proces u fluidiziranom sloju. Ako to nije moguće postići jednostepenim procesom, ne pribjegava se diskontinuiranom procesu, već se nastoji dovoljno suziti područje raspodjele trajanja zadržavanja čvrstog materijala u sloju primjenom višestepenog postupka (sl. 27).



Sl. 27. Osnovne izvedbe višestepenih peći s fluidiziranim slojem: a s protustrujanjem, b s križnim strujanjem procesnih faza

Dimenzioniranje peći za nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju uz zadane dimenzije čvrstih čestica počinje određivanjem mogućeg protoka plina, uzimajući u obzir uvjete reakcije. Zatim se iz omjera protoka plina u jedinici vremena i brzine strujanja plina dobiva potreban presjek reaktora, a iz protoka plina i udio čvrstog materijala, uzimajući u obzir trajanje zadržavanja i količinu čvrstog materijala u fluidiziranom sloju.

S povećanjem ulazne brzine plina koncentracija se čvrste tvari u plinu u donjem dijelu peći smanjuje, a u gornjem dijelu povećava, pa se počevši od neke dovoljno velike brzine strujanja plina u gornjem dijelu održava konstantnom. Visina iznad sloja čvrstih čestica od koje se ta gustoća održava konstantnom naziva se TDH-vrijednošću (*Transport Disen-*



Sl. 28. Uređaji za sprečavanje gubitka plina pri povratu čestica. a zaronjeni povratni vod, b stožasti ventili, c zapornica s čelijskim kolom, d klatna zapornica

gaging Heith). Ako peć radi s izrazito fluidiziranim slojem (sl. 24a), odvod plina u ciklon ne treba da bude iznad visine koja odgovara TDH-vrijednosti. Ako se, međutim, proces odvija kao na sl. 24b i 24c, visina je peći određena trajanjem zadržavanja plina i čestica čvrste tvari.

Da bi se spriječio gubitak plina kroz uređaje za povrat čestica čvrste tvari u reaktor, mora se povratna cijev zaroniti u sloj s velikom koncentracijom čestica ili se u povratni vod postavlja neki zaporni uređaj (sl. 28).

Peći za nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju mogu biti peći za egzotermne i peći za endotermne reakcije.

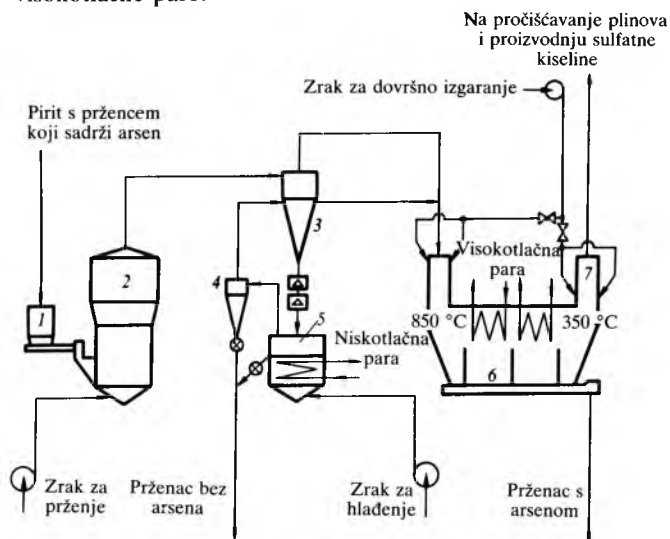
Peći za egzotermne nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju

Takve se peći najviše upotrebljavaju za oksidacijsko prženje sulfidnih ruda, a zatim za izgaranje i rasplinjavanje ugljena te za izgaranje industrijskih i komunalnih otpadaka.

Peći za prženje sulfidnih ruda. U fluidiziranom sloju priži se pirit i pirhotin za dobivanje sumpor(IV)-oksida, te sfalerit za dobivanje prženca u proizvodnji cinka (v. *Cink*, TE 2, str. 649). Svi su spomenuti procesi vrlo egzotermni (ogrjevna je moć piritu ~6,9 MJ/kg, pirhotinu ~5,9 MJ/kg, a sfaleritu 4,4 MJ/kg). Da bi se održala potrebna temperatura pečenja, fluidizirani sloj treba hladiti. Hlađenje se može provesti recirkulacijom proizvodnog plina, ubrizgavanjem vode u procesni sustav, ugradnjom niza cijevi hlađenih vodom u fluidizirani sloj (ograničena kontrola temperature) i recirkulacijom čvrstog materijala. Nedostatak je prve od tih metoda nepoželjno veliki volumen plina u peći, druge prisutnost vodene pare u procesnom sustavu, treće ograničenost kontrole temperature, a četvrte oštećivanje stijenki.

Budući da u piritu ima spojeva arsena i olova koji ostaju u pržencu i smetaju u daljoj obradi u proizvodnji čelika, razvijeni su postupci prženja tih ruda uz odjeljivanje arsena.

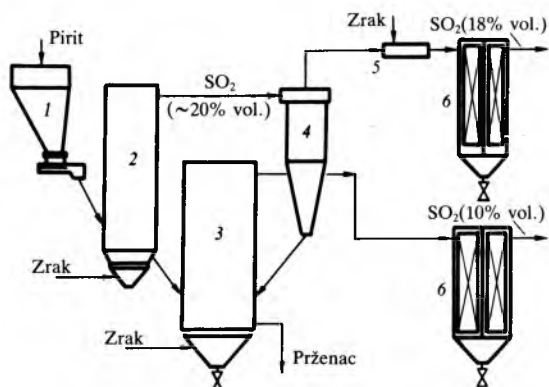
Jedan od takvih procesa za dobivanje sumpor(IV)-oksida oksidacijskim prženjem piritu uz dobivanje željezo(II,III)-oksida u pržencu, umjesto željezo(III)-oksida, prikazan je na sl. 29. Poteškoće su oko hlađenja manje, jer se dio materijala priži u peći, a ostatak u ložištu kotla za proizvodnju visokotlačne pare.



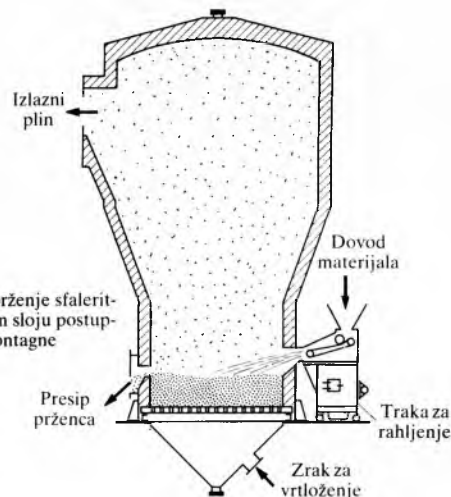
Sl. 29. Shema postrojenja za proizvodnju sumpor(IV)-oksida uz odjeljivanje arsena (postupak Boliden). 1 vaga za doziranje, 2 peć s fluidiziranim slojem, 3 vrući ciklon, 4 ciklon, 5 hladnjak s proizvodnjom niskotlačne pare, 6 parni kotao za proizvodnju visokotlačne pare, 7 komora za dovršno izgaranje

Drugi takav proces prikazan je na sl. 30. U prvoj peći pirit djelomično izgara i prelazi u željezo(II)-sulfid, a u drugoj dobiveni prženac u željezo(III)-oksid, pa je toplina koju treba odvesti iz peći podijeljena na dva dijela.

Mnogo se primjenjuje prženje sfalerita u fluidiziranom sloju. Takve suvremene peći (sl. 31) rade s malim brzinama strujanja i relativno slabo ekspanziranim slojem. Da bi se



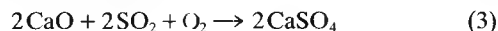
Sl. 30. Shema postrojenja za proizvodnju sumpor(IV)-oksida uz odjeljivanje arsena (dvostepeni postupak tvrtke BASF s fluidiziranim slojem). 1 bunker s dodavačem, 2 peć za prethodno prženje, 3 peć za dovršno prženje, 4 ciklon, 5 komora za dovršno izgaranje, 6 parni kotlovi



Sl. 31. Princip peći za prženje sfaleritnih ruda u fluidiziranom sloju postupkom Vieille Montagne

smanjio odvod praha, gornji je dio peći proširen. Promjer fluidiziranog sloja može biti i veći od 10 m. Problem hlađenja nije tako izražen kao pri prženju piritu, jer sfalerit ima manju ogrjevnu moć. Hlađenje se provodi ubrizgavanjem vode.

Peći za izgaranje i rasplinjavanje ugljena. Za izgaranje ugljena u fluidiziranom sloju (v. *Parni kotao*, TE 10, str. 183) potrebno je u sloju održavati temperaturu od 850...900 °C. Zbog visoke ogrjevne moći ugljena hlađenje je naročito važno. Održavanje je temperature u navedenim granicama potrebno da se odvija reakcija



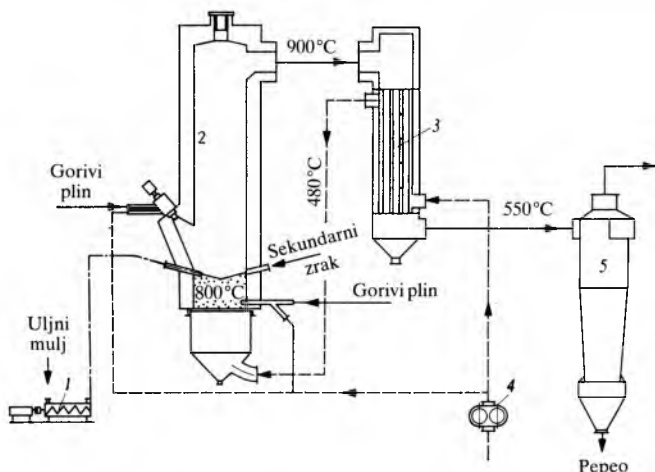
kako bi se izdvojio štetni sumpor(IV)-oksid. Kalcij-sulfat odvodi se iz sustava s pepelom.

Prednosti su takvog postupka što su potrebne male količine plina za rasplinjavanje i što se dovodenjem kisika uz djelomično izgaranje može proizvesti toplina potrebna za proizvodnju vodenog plina.

Peći za spaljivanje otpadaka u fluidiziranom sloju. Jedan od općenito primjenljivih procesa za spaljivanje industrijskih i komunalnih otpadaka u prvom je redu namijenjen spaljivanju uljnih muljeva (sl. 32). Međutim, pri izgaranju otpadaka izlučenih iz otpadnih voda proizvedena toplina nije dovoljna za održavanje procesa izgaranja na potrebnoj temperaturi (800...900 °C). Zbog toga je potrebno predgrijavanje zraka za fluidizaciju i izgaranje, a nekada i dodatno grijanje plinskim ili uljnim gorionicima.

Peći za endotermne nekatalitičke reakcije u fluidiziranom sloju

Takva postrojenja mogu se razvrstati prema načinu grijanja, a to su: grijanje čvrstim nosiocima topline, reakcijskim plinom koji kruži u procesu, izgaranjem goriva u fluidizirajućem sloju i grijanje električnom energijom.

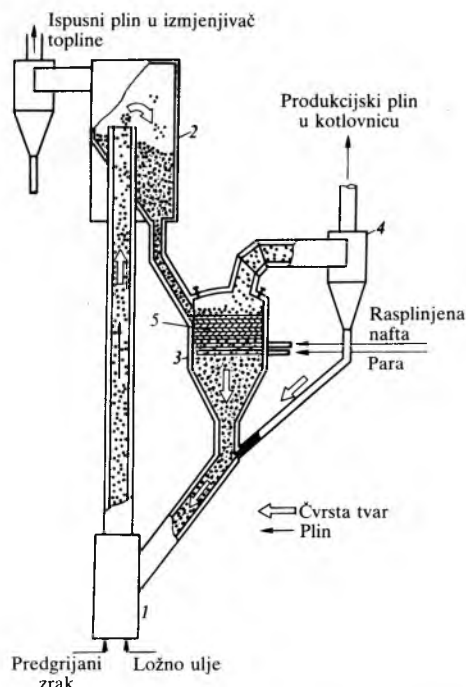


Sl. 32. Shema postrojenja za spaljivanje otpadnog uljnog mulja. 1 pužna pumpa, 2 peć s fluidiziranim slojem, 3 izmjenjivač toplote, 4 ventilator za zrak, 5 ciklon

Peći grijane čvrstim nosiocem topline najviše se upotrebljavaju u petrokemijskoj industriji. Najpoznatije su među njima peći za termičko kreiranje i koksiranje težih frakcija destilacije nafte (v. *Nafta*, TE 9, str. 231). Takva su postrojenja povoljna i za redukciju prženca proizvedenog oksidacijskim prženjem visokog stupnja pirita i pirhotina, kad su postrojenja tako spregnuta da se u proces dovodi još vrući prženac.

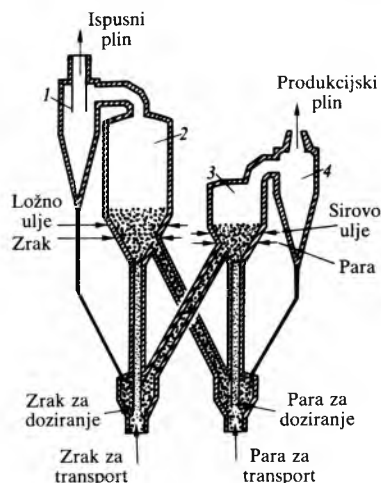
Termičko kreiranje ugljikovodika u fluidiziranom sloju provodi se u nekoliko tipova postrojenja.

Postrojenje tvrtke Lurgi (sl. 33) služi za cijepanje naftnih frakcija s vrelištem od 350...400 °C da bi se dobili etilen i propilen kao glavni proizvodi, te koks kao sporedni proizvod. U peć, u koju su ugrađene limene pregrade od nerđajućeg čelika da bi se spriječio nastanak mjehura i ostvario potreban temperaturni gradijent, dovode se teške frakcije nafte i vodena para. U fluidiziranom se sloju endotermno cijepaju molekule na temperaturi od 600...700 °C dovođenjem pijeska ugrijanog na temperaturu od 700...850 °C. Proizvedeni se plinovi otprašuju u ciklonu i dalje prerađuju. Na čestice



Sl. 33. Shema postrojenja za termičko kreiranje ugljikovodika u fluidiziranom sloju (Lurgijev postupak). 1 komora za izgaranje, 2 bunker za pijesak, 3 reaktor, 4 ciklon, 5 limene pregrade za usmjeravanje

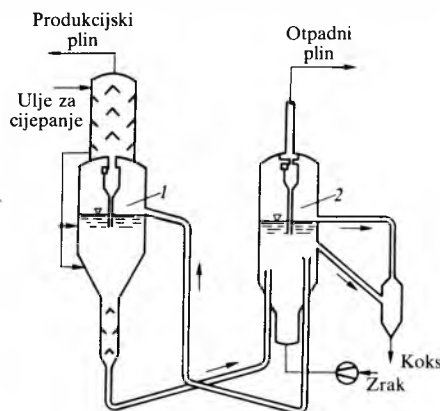
pijeska tokom reakcije nataloži se ugljik, ali on za vrijeme odvođenja izgara. Vrućim odvodnim plinom zagrijava se zrak za transport čestica pijeska.



Sl. 34. Shema postrojenja za termičko kreiranje ugljikovodika u fluidiziranom sloju (postupak BASF). 1 i 4 cikloni, 2 regenerator, 3 reaktor

U regeneratore postrojenja tvrtke BASF (sl. 34) izgaranjem težih frakcija ulja inertni se nosilac toplote čisti od nataloženog koka i zagrijava se od ~700 °C na ~900 °C. Zatim se uvodi u peć u koju se također dovodi ulje koje se cijepa i vodena para, pa se tako u donjem stožastom dijelu reaktora stvara vrijući sloj. I regenerator i peć imaju ciklone za povrat čestica nosioca toplote u proces.

Koksiranje težih frakcija nafte u fluidiziranom sloju provodi se postupkom tvrtke Esso (Esso-Fluid Coker, sl. 35) kojim se osim koka dobivaju lako hlapljivi ugljikovodici i plinovi od kreiranja. Kao nosilac toplote upotrebljava se proizvedeni koks (s česticama promjera 0,1...1 mm), koji djelomično izgara. Preostali koks odvodi se iz zagrijača.



Sl. 35. Shema postrojenja za termičko kreiranje težih frakcija nafte (postupak Esso-Fluid Coker). 1 reaktor, 2 zagrijač

U nastojanju da se proizvodi što manje koka, a što više plinovitih proizvoda, od spomenutoga je postupka razvijen postupak Flexicoking kojim se rasplinjava proizvedeni koks također u fluidiziranom sloju.

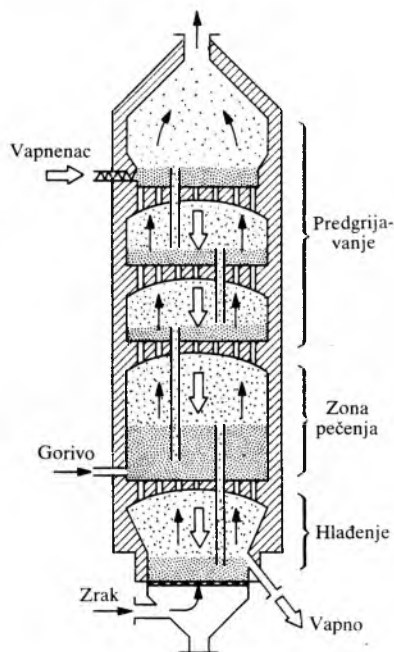
Redukcija željezo(III)-oksida u željezo(II,III)-oksid primjenjuje se u preradbi prženca od prženja pirita. Vrući prženac proizveden egzotermnim procesom u fluidiziranom sloju vodi se odmah u drugu redukcijsku peć u kojoj se procesira na 670 °C izgaranjem neposredno ubrizganog ložnog ulja, s tim da se znatan dio potrebne toplote namiruje viškom toplote od prethodnog prženja. Proizvod se peletizira za dalju preradu.

Peći grijane redukcijskim plinom upotrebljavaju se za redukciju sitnozrnate rude željeza u fluidiziranom sloju

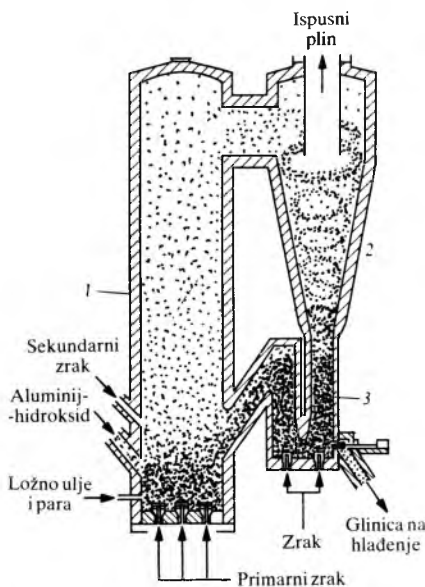
plinom koji je ujedno i reaktant. Zbog toga što je potrebno mnogo topline moraju se predgrijavati obje procesne faze. U razvoju su postupci za redukciju sitnozrnatih ruda željeza vodikom ili smjesom vodika i ugljik(II)-oksida.

Peći s izgaranjem goriva u fluidiziranom sloju služe za procese kalciniranja.

Peć za pečenje vapna u fluidiziranom sloju višestepena je peć u kojoj se vapnenac (promjer čestica 0,5...2 mm) predgrijava i peče, a proizvod hladi (sl. 36). Slične se peći upotrebljavaju za kalciniranje sirovih fosfata da bi se očistili od ugljikovodičnih primjesa.

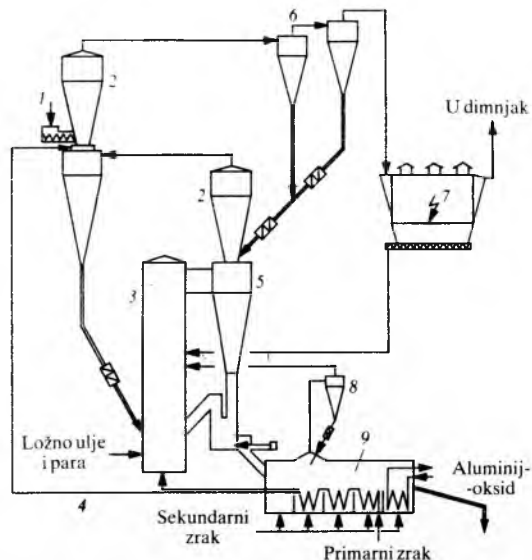


Sl. 36. Višestepena peć za pečenje vapna u fluidiziranom sloju



Sl. 37. Peć za kalciniranje aluminij-oksida u fluidiziranom sloju. 1 peć, 2 ciklon za povrat, 3 taložna komora

Kalciniranje tvari s česticama promjera manjeg od 0,1 mm provodi se u vrlo ekspaniranom fluidiziranom sloju. Tako se, npr., kalcinira aluminij-oksida-hidrat u proizvodnji gline. U postrojenju osim peći (sl. 37) postoje uređaji za sušenje vlažnog aluminij-oksida-hidrata, za hlađenje proizvoda i za zagrijavanje primarnog i sekundarnog zraka (sl. 38). Takvo postrojenje ima visoku termičku djelotvornost (veću od 70%) i niski specifični potrošak topline (~3,3 MJ/kg proizvoda). U

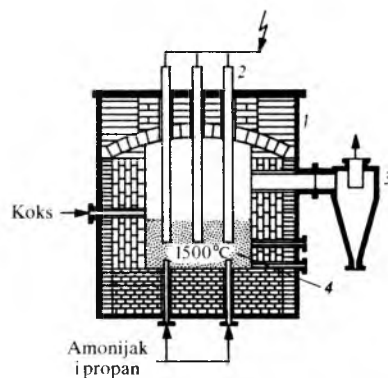


Sl. 38. Shema postrojenja za kalciniranje aluminij-oksida u fluidiziranom sloju. 1 doziranje vlažnog aluminij-oksida-hidrata, 2 Venturijski fluidizator, 3 peć s fluidiziranim slojem, 4 mlinovod za zrak, 5, 6 i 8 cikloni za povrat, 7 elektrofilter, 9 peterostepeni vrtložni hladionik

peći promjera 3,8 m i visine ~20 m može se dnevno proizvesti ~500 t aluminij-oksida.

Peći s fluidiziranim slojem grijane električnom energijom imaju prednost kad su potrebne visoke temperature reakcije. Takvim se postupkom, npr., proizvodi cijanovodik sintezom od koksa, amonijaka i metana, odnosno propana (sl. 39), te elektrografit u prahu (v. *Grafit*, TE 6, str. 251).

I neke se kemijske reakcije u električnom luku također provode u fluidiziranom sloju. Tada luk gori između štapne katode od volframa i anodnog fluidiziranog sloja od vodljivog praha.



Sl. 39. Peć grijana električnom energijom za proizvodnju cijanovodika. 1 peć, 2 elektrode, 3 ciklon za otprašivanje proizvoda, 4 fluidizirani sloj

Peći za nekatalitičke reakcije u pomičnom sloju

Takve se peći mogu grijati recirkulirajućim zrakom ili čvrstim nosiocima topline, a upotrebljavaju se za isplinjavanje (švelovanje) i koksiranje ugljena. Takva je, npr., *švelna peć* tvrtke Lurgi (sl. 40). Njen gornji dio služi za predgrijavanje i sušenje ugljena pomoću plinova od izgaranja u posebnom ognjištu, dok se u donjem ugljen isplinjava (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 393). Temperatura potrebna za isplinjavanje postiže se zagrijavanjem plinovima izgaranja iz posebnog ognjišta. Koks se hladi povratom dijela proizvedenog plina nakon odvajanja katrana.

Neki procesi u pećima za švelovanje, odnosno koksiranje ugljene prašine u pomičnom sloju slični su procesima u fluidiziranom sloju. U njima se dio proizvedenog koksa ponovno dovodi u peć kao nosilac topline. Ostatak se

potrebne topline dobiva upotrebom plinskih ili uljnih gorionika, ili se proizvodi izgaranjem dijela proizvedenog koksa. Na površini sloja u peći vladaju uvjeti kao u fluidiziranom sloju, jer se dodiranjem vrućeg koksa s ugljenom vrlo brzo razvija plin koji djeluje kao fluidizator, što osigurava vrlo dobro miješanje ugljena i prenosioca topline.

Za švelovanje briketa ugljena koje je potrebno za proizvodnju bezdimnog goriva za kućanstva i za proizvodnju

komadnog koksa za visoke peći ne mogu se primijeniti opisani postupci, već se topline mora dovoditi pomoću čvrstih nosilaca topline. U jednom od takvih procesa (sl. 41) kao nosilac topline služi pijesak. Smjesa koksiranih briketa i pijeska izvodi se iz peći pneumatskim udarima, a pijesak se odvaja od briketa na kosoj rešetki na koju pada smjesa.

PEĆI ZA HOMOGENE PLINSKE REAKCIJE

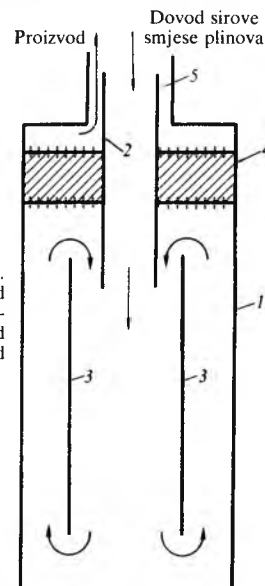
Takve se peći upotrebljavaju ne samo za procese s nekatalitičkim plinskim reakcijama nego i za procese homogene plinske katalize. Za nekatalitičke plinske reakcije, međutim, potrebne su temperature od $500\cdots 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok se katalitičke reakcije odvijaju na mnogo nižim temperaturama, pa se reaktori za te reakcije i ne smatraju reakcijskim pećima. Ipak se ne mogu postaviti sasvim jasne granice između te dvije vrste reaktora. Zbog toga se opisuju i neki reaktori koji se mogu svrstati u granično područje.

I peći za homogene plinske reakcije mogu se razvrstati u peći za egzotermne i peći za endotermne procese.

Peći za egzotermne homogene plinske reakcije

Među takve se peći mogu u prvom redu ubrojiti peći za visokotemperaturno kloriranje ugljikovodika (v. *Klor*, TE 7, str. 168; v. *Halogenacija*, TE 6, str. 342).

Tipična takva peć jest reaktor za nekatalitičko kloriranje metana (sl. 42). Zagrijana smjesa metana i klora (u omjeru 8:1 do 4:1) dovodi se u peć promjera $1\cdots 3\text{ m}$ i visine $4\cdots 8\text{ m}$, kojoj je donji dio prethodno zagrijan. Izmjenom topline s proizvodom smjesa se brzo zagrijava na reakcijsku temperaturu od $400\cdots 450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ta se temperatura ne smije prekoračiti, jer bi tada nastupile sporedne reakcije u kojima se izlučuje čađa, a ta katalitički sprečava kloriranje i cijepa već klorirani ugljikovodik. Ta se temperatura održava bez poteškoća jer se proces može voditi praktički adijabatski. Da se to postigne, tlak u peći mora biti $\sim 0,3\text{ MPa}$. U takvoj peći od smjese s udjelima od 62,4% metana, 17,8% monoklormetana, 1,1% klora i s ostatkom od inertnih plinova kao proizvod dobiva se smjesa s udjelima od 18,4% monoklormetana, 4,5% diklormetana, 2,0% triklormetana, 0,2% tetraklormetana, 45,5% metana, 20,0% klorovodika i 9,4% inertnih plinova.

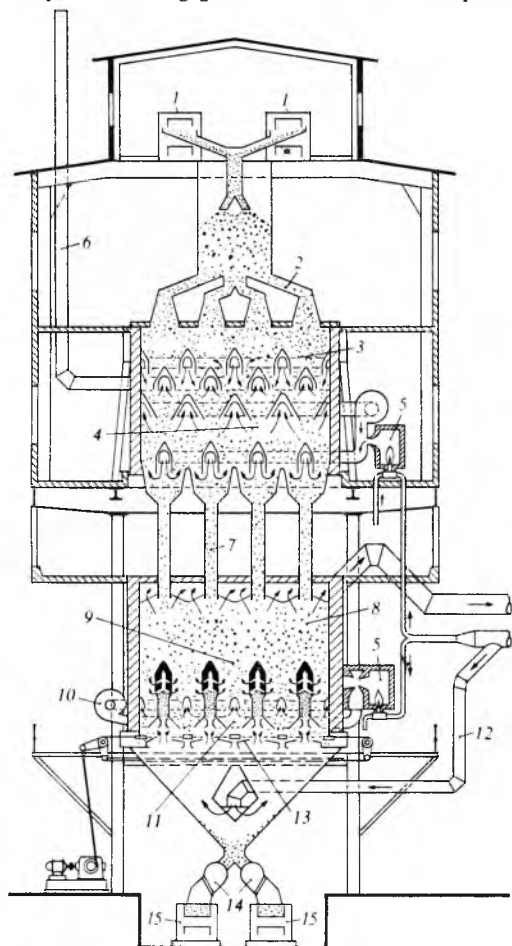


Sl. 42. Reaktor za kloriranje metana. 1 stijenke reaktora, 2 cijev za dovod reakcijske smjese, 3 cilindar za unutrašnju recirkulaciju, 4 postelja od inertnog materijala, 5 cijev za odvod proizvoda

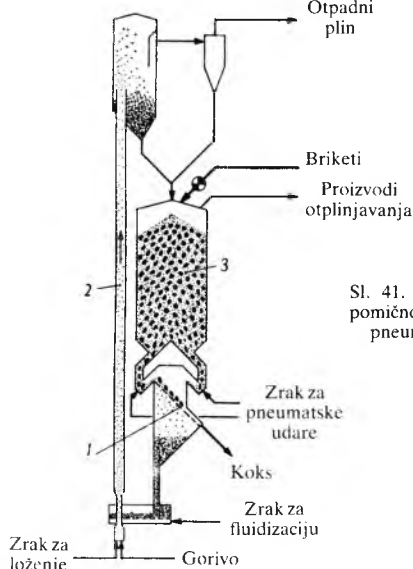
Jednake peći služe za kloriranje ugljikovodika na nižim temperaturama trostepenim postupkom. U takvom postrojenju služi po jedna peć za svaki stupanj kloriranja. U prvu peć dovodi se već spomenuta smjesa, a u sljedeće ohlađena smjesa iz prethodnog stupnja i dodatna količina klora.

Peći za endotermne homogene plinske reakcije

Takve se peći upotrebljavaju za krekiranje i dehidrogenaciju ugljikovodika radi dobivanja nižih alkena (etena, prope-



Sl. 40. Peć za isplinjavanje ugljena, sustav tvrtke Lurgi. 1 transporteri za dovod ugljena, 2 uređaj za doziranje, 3 zona predušenja, 4 zona sušenja, 5 komora za izgaranje, 6 dimnjak, 7 spojna okna, 8 komora za isplinjavanje, 9 zona isplinjavanja, 10 ventilator za hlađenje, 11 zona hlađenja koksa, 12 hladni plin, 13 odvod koksa, 14 zapornica za koks, 15 uređaj za odvod koksa



Sl. 41. Peć za koksiranje briketa u pomičnom sloju. 1 rešetka, 2 vod za pneumatski transport, 3 reaktor

na), te za rasplinjavanje ugljikovodika radi dobivanja sinteznog plina (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 402). One se mogu razvrstati na peći s indirektnim grijanjem (cijevne peći), peći s direktnim grijanjem regenerativnim postupkom i peći s djelomičnim spaljivanjem ugljikovodika.

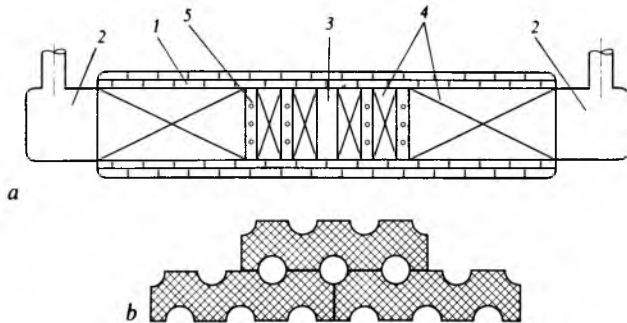
Cijevne peći za proizvodnju etena i etina konstrukcijski su slične cijevnim pećima za destilaciju katrana (v. *Katran*, TE 6, str. 735), za termičko kreiranje (v. *Nafta*, TE 9, str. 230) i za rasplinjavanje ugljikovodika (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 402).

Vođenje procesa ovisi o sirovinama koje se prerađuju. U Evropi su to obično laki benzini, a u SAD pretežno etan, propan i butan. Da bi se postigao veliki iscrpak proizvodnje etena, sirovine moraju sadržavati što više *n*-parafina, a malo aromatskih spojeva, naftena i izoparafina.

Zajedničko je svim procesima u cijevnim pećima vrlo kratko trajanje zadržavanja reakcijske smjese u reakcijskoj zoni i visoke temperature na kraju te zone. Zbog toga su potrebne velike brzine strujanja, dok su stijenke cijevi znatno termički opterećene. Tako je, npr., u proizvodnji etena trajanje zadržavanja $\sim 0,3$ s, a temperatura je na izlazu iz peći ~ 850 °C. Uz promjer cijevi od ~ 100 mm termičko opterećenje stijenki cijevi iznosi do $250 \text{ MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$ uz temperaturu od 1100 °C. U suvremenim pećima cijevi se postavljaju okomito da se smanji njihovo naprezanje. Zbog neminovnog oblaganja unutrašnjih površina cijevi koksom, one se ne zadržavaju u trajnom pogonu duže od 2...4 mjeseca, pa se nakon obustave pogona mora pažljivo spaliti koksna obloga.

Peći s direktnim regenerativnim grijanjem upotrebljavaju se za proizvodnju alkena i etina. One rade u dvije faze: u prvoj se grije ugrađeni nosilac topline, a u drugoj se ta akumulirana topline iskorištava za proces. Zbog toga su za kontinuirani proces potrebne najmanje dvije peći, po jedna za svaku fazu.

Među tim pećima najpoznatija je *Wulffova peć* (sl. 43). Njen je glavni dio položen rov četvrtastog presjeka. U sredini rova nalazi se komora za izgaranje, a s obje su strane komore napunjene posebno oblikovanim opekama od vatrostalnog materijala koje su prenosioci topline. Gorionici su smješteni na unutrašnjim krajevima tih komora.



Sl. 43. Shema Wulffove peći. a uzdužni presjek, b presjek šamotnog dijela; 1 vatrostalne opeke, 2 komore ispunjene prenosioce topline, 3 plinsko ložište, 4 šamotni dijelovi, 5 plinski gorionici

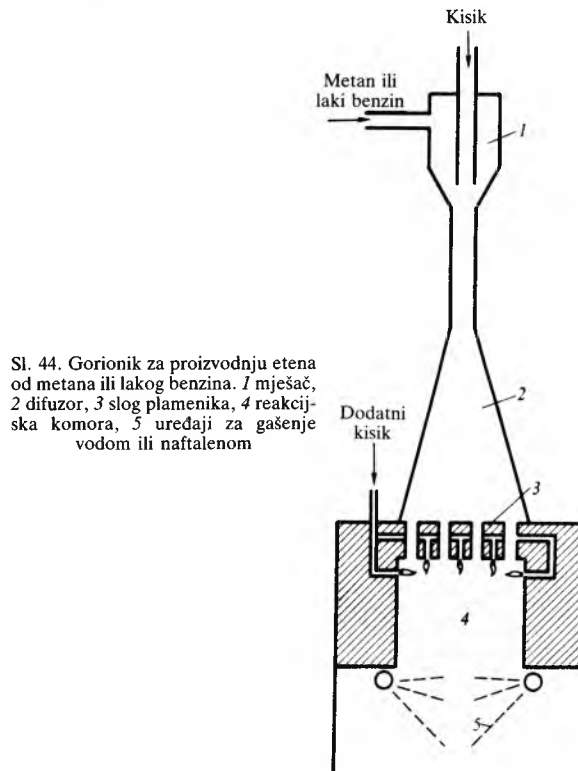
U prvoj fazi radnog ciklusa s jedne se strane u peć dovodi zrak koji se predgrijava u dodiru s vatrostalnim opekama, zatim se miješa s gorivom, pa se ta smjesa pali. Tako ugriyani plinovi vode se u drugu polovicu peći gdje griju vatrostalne opeke do temperature od ~ 1400 °C. U drugoj se fazi radnog ciklusa sa suprotnog kraja u peć dovodi reakcijska smjesa koja se cijepa u dodiru s užarenim opekama. Prolazom kroz prvi dio peći proizvod se mora dovoljno ohladiti, da bi se obustavile reakcije raspada. Istodobno se u drugom kraju peći zagrijevaju vatrostalne opeke, koje su tako pripremljene za ponovni radni ciklus. U fazi grijanja i cijepanja održava se u peći praktički konstantna temperatura s oscilacijama od ± 15 °C, pa pojedine faze ne smiju trajati duže od ~ 1 min. Zbog toga je potreban vrlo djelotvoran razvodni sustav, koji se sastoji od ventila i vakuumskih pumpa za brzo pražnjenje

komora i sprečavanje miješanja proizvoda i plinova od izgaranja.

Prednost je tih peći što nema poteškoća s izlučenim koksom, jer on izgara u fazi grijanja. Osim toga, proces se može prilagoditi potrebama.

Upotrebljavaju se i peći s mirnim slojem keramičkog materijala koji služi kao prenosilac topline. Pogon im je sličan pogonu Wulffovih peći.

Peći s djelomičnim spaljivanjem ugljikovodika služe za proizvodnju alkena i etina, a utrošak topline odmah se u njima namiruje izgaranjem u reakcijskom sustavu. Među njima su najvažnije peći s velikim gorionicima (sl. 44) konstruiranim za kratkotrajne procese.



Sl. 44. Gorionik za proizvodnju etena od metana ili lakog benzina. 1 mješač, 2 difuzor, 3 slog plamenika, 4 reakcijska komora, 5 uređaji za gašenje vodom ili naftalenom

Gorionici takvih suvremenih peći dugi su i do 10 m. Kisik i ugljikovodici za pripremu reakcijske smjese zagrijevaju se odvojeno (kisik i metan na 600 °C, laki benzin na 350 °C) i dovode se u glavu gorionika, gdje počinje miješanje koje se nastavlja u difuzoru. Trajanje zadržavanja smjese do ulaska u komoru za izgaranje ($\sim 0,1$ s) kraće je od vremena potrebnog za paljenje smjese. Prolazom kroz otvore komore za izgaranje smjesa se pali i stvara turbulentni plamen temperature ~ 1400 °C. Neizgorjeli se ugljikovodici konvertiraju u aceten. Zadržavanje u reakcijskoj komori iznosi nekoliko milisekunda. Plamen se na izlazu iz komore za izgaranje gasi vodom ili naftalenom. Sredstvo za gašenje odnosi najveći dio proizvedenog koksa.

KONTAKTNE PEĆI

Kontaktne su peći reaktori za provođenje reakcija na čvrstim katalizatorima, a upotrebljavaju se praktički jedino za plinske katalitičke procese. Njihove konstrukcije ovise o stanju sloja katalizatora, pa se razlikuju kontaktne peći s mirnim i s fluidiziranim slojem katalizatora.

Kontaktne peći s mirnim slojem katalizatora

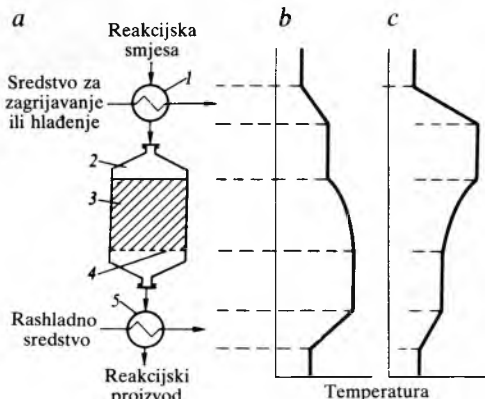
Takve peći služe samo za kontinuirane reakcijske procese. Budući da se potrebna brzina skoro svih takvih reakcija može postići samo na višoj temperaturi, često se plinovi, koje treba preraditi, moraju prvo predgrijati. Osim toga, procesi mogu biti egzotermni ili endotermni, pa je potrebno hlađenje, odnosno grijanje prije ili tokom procesa. Zbog toga je za

konstrukciju kontaktnih peći, osim svojstava katalizatora, veoma važan temperaturni režim u peći, pa se razlikuju kontaktne peći s neupravljanim, peći s upravljanim i peći s djelomično upravljanim temperaturnim tokom uzduž reaktora.

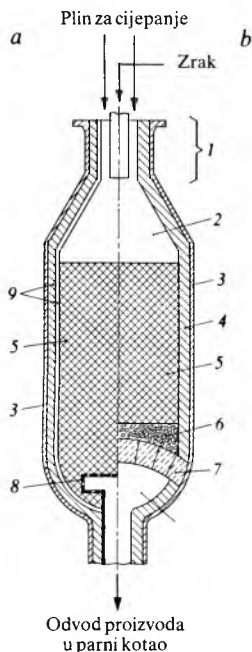
Uz svojstva katalizatora o kojima ovisi njihovo kemijsko djelovanje (v. *Kataliza*, TE 6, str. 706) za procese u kontaktnim pećima s mirnim katalizatorom vrlo su važna fizikalna svojstva katalizatora. Dakako, poželjno je da katalizatori imaju što veću kontaktnu površinu. Ta se površina, međutim, ne smije povećavati prevelikim smanjivanjem dimenzija čestica, jer se tako povećava otpor strujanju plina, pa nije moguće ekonomično održavati potrebnu brzinu plina, i jer tada plin može ponijeti čestice katalizatora koje mogu smetati u daljoj preradbi. Zbog toga je katalizator zrnat ili od oblikovanih čestica (mali valjci, kuglice, prsteni), izrađen od poroznih materijala, a katkada i kao žičana mreža.

Kontaktne peći s neupravljanim temperaturnim tokom. Njihova je upotreba ograničena uglavnom na procese s malim toplotinama reakcije.

Obično su to jednostavni aparati koji se sastoje od cilindra, propusne pregrade na koju je nasut katalizator i priključaka za dovod i odvod plina (sl. 45). Volumen se katalizatora određuje na osnovi njegove aktivnosti i potrebnog proizvodnog učina.



Sl. 45. Kontaktna peć s neupravljanim temperaturnim tokom. a shema peći, b temperaturni tok za egzotermnu reakciju, c temperaturni tok za endotermnu reakciju; 1 izmjenjivač topline za ugrijavanje ili hlađenje reakcijske smjese na potrebnu početnu temperaturu, 2 reakcijska posuda, 3 sloj katalizatora, 4 potporna rešetka sloja katalizatora, 5 izmjenjivač topline

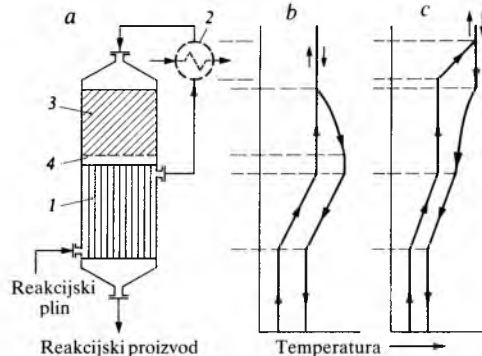


Sl. 46. Sekundarni reformer. a s višeslojnom oblogom i sustavom za sakupljanje plina smještenim u katalizator, b s jednoslojnom oblogom i nosivom konstrukcijom za katalizator; 1 dovod plina i plamenik, 2 komora za izgaranje, 3 plašt, 4 izolacijska obloga, 5 katalizator, 6 inertni materijal, 7 svodni potpora katalizatora, 8 komora za sakupljanje plina, 9 višeslojna obloga

Sekundarni reformeri (sl. 46) kontaktne su peći s neupravljanim tokom temperature za uklanjanje sumporovodika iz sinteznog plina proizvedenog reformiranjem nafte. U dovodnoj komori djelomično izgara plin koji sadrži i sumporovodik, pa se tako zagrijava za odsumporavanje u sloju katalizatora. Uz odsumporeni plin smjesa proizvoda sadrži i sumpor i vodu, koje treba ukloniti prije upotrebe.

Za procese s visokim temperaturama vanjske stijenke peći okružene su vodenim plaštem koji ne služi za odvođenje topline iz procesa, već samo za kontrolu temperature i za održavanje temperaturnog gradijenta u metalnim stijenkama cilindra.

Kad je potrebno zagrijavanje ulaznog plina i intenzivno hlađenje proizvoda, u peć se ugrađuju izmjenjivači topline (sl. 47). Ponekad, pogotovu za endotermne procese, potrebno je još i dogrijavati izlazni plin posebnim zagrijačima.



Sl. 47. Kontaktna peć s ugrađenim indirektnim izmjenjivačem topline. a shema peći, b temperaturni tok za egzotermnu reakciju, c temperaturni tok za endotermnu reakciju; 1 izmjenjivač topline, 2 eventualno potrebni dodatni zagrijač, 3 katalizator, 4 potporna rešetka sloja katalizatora

Peći za proizvodnju nitratne kiseline oksidacijom amonijaka (v. *Dušik*, TE 3, str. 506) imaju žičane katalizatore od slitine platine i rodija. Sloj je katalizatora vrlo tanak, pa komore za dovod i odvod plina moraju osigurati jednoliku raspodjelu plina po kontaktnoj površini. Zbog toga su cilindrični dijelovi peći vrlo kratki ili ih uopće nema.

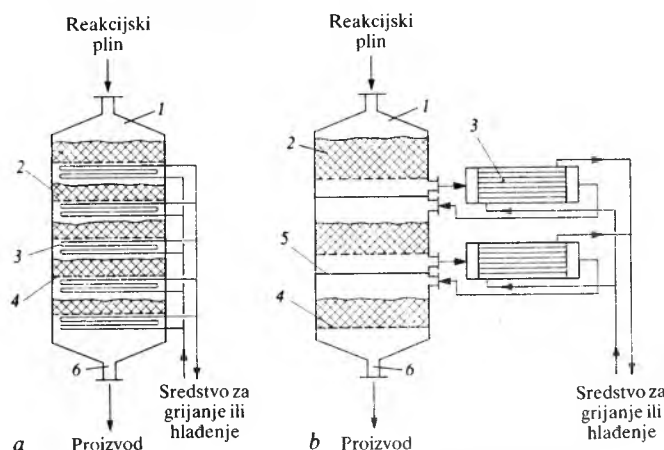
Kontaktne peći s upravljanim temperaturnim tokom. U takvim se pećima nastoji ostvariti izotermni proces koji u usporedbi s adijabatskim procesom daje bolje iscrpke. Tako se, npr., pri izotermnoj oksidaciji sumpor(IV)-oksida u proizvodnji sumporne kiseline na temperaturi od 425 °C može postići ravnotežni iscrpak od 98%, a adijabatskim procesom iscrpak od samo 80%. Još su veće razlike tih iscrpaka u sintezi amonijaka (v. *Dušik*, TE 3, str. 494), kad se pod tlakom od 30 MPa izotermnim postupkom dobiva ~3,5 puta veći iscrpak nego adijabatskim.

Prema načinu upravljanja temperaturnim tokom razlikuju se peći sa stupnjevanim i peći s kontinuiranim upravljanjem.

Stupnjevano upravljanje temperaturnim tokom može se ostvariti indirektnom izmjenom topline preko izmjenjivača topline ili direktnom izmjenom topline miješanjem s rashladnim sredstvom između pojedinih stupnjeva procesa.

Kontaktne peći s **indirektnom izmjenom topline** mogu se promatrati kao serija kontaktnih peći spregnutih u agregate s hladionicima proizvoda. Pri tome se razlikuju peći s ugrađenim hladionicima (sl. 48a) i one u kojima su hladionici izvan peći (sl. 48b). U komorama tih peći u svakom se od stupnjeva ostvaruju adijabatski procesi s promjenom temperature, dok se temperatura procesnog sustava korigira nakon svakog stupnja. U svakoj od komora provodi se samo dio ukupne pretvorbe, a korekcija temperature u njima mora biti primjerena polaznoj temperaturi za sljedeći stupanj. Domet pojedinih stupnjeva određuje se u prvom redu prema pomaku ravnotežne linije procesnih reakcija s promjenom temperature, odnosno prema dopuštenoj procesnoj temperaturi (npr. radi sprečavanja oštećenja katalizatora). Dakako, ravnoteža se ne može nikada potpuno postići, jer se približavanjem

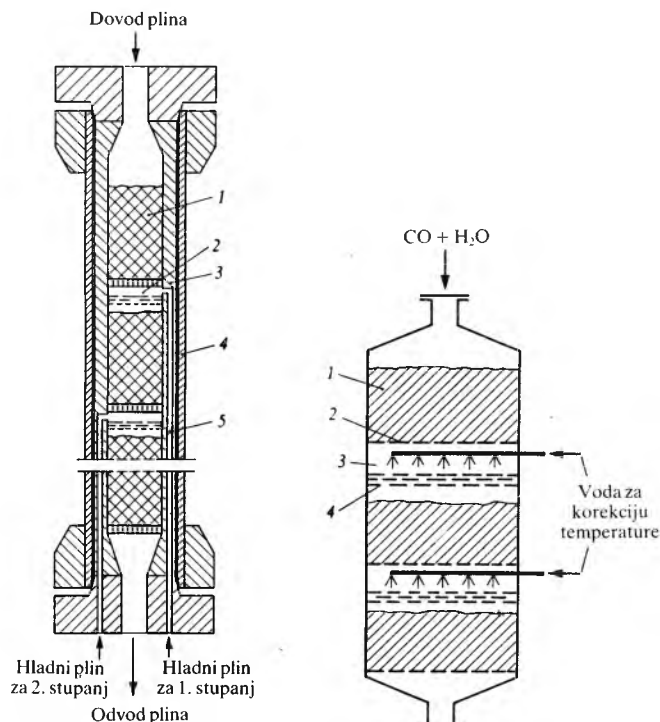
ravnotežnom stanju smanjuje brzina reakcije, pa se tada povećava i potrebno trajanje zadržavanja i količina katalizatora. Zbog toga se dolazi do granice kad povećanje iscrpka više nije u ekonomski podnosivom odnosu s potrebnim povećanjem izdataka.



Sl. 48. Kontaktna peć sa stupnjevanim upravljanjem temperaturnog toka. a s unutarnjim, b s vanjskim izmjenjivačima toplote; 1 dovod plina, 2 sloj katalizatora, 3 izmjenjivači toplote, 4 potporna rešetka sloja katalizatora, 5 pregradna stijenka, 6 odvod plina

Kontaktne peći s *direktnom izmjenom toplote* međusobno se najviše razlikuju u sustavima miješanja s prenosiocima toplote. Za korekciju temperature među stupnjevima najčešće služi svježa reakcijska smjesa (sl. 49) ili jedna od komponenta te smjese. Količina dodatne smjese ovisi o njoj temperaturi, te o količini i temperaturi reakcijske smjese na kraju prethodnog stupnja.

U nekim procesima, kao što je konverzija ugljik(II)-oksida i vode u ugljik(IV)-oksid i vodik (sl. 50), upotrebljava se voda kao rashladno sredstvo među stupnjevima. Voda se ubrizgava



Sl. 49. Kontaktna peć za hidrogeniranje uljnih para pod visokim tlakom uz stupnjevano upravljanje temperaturnim tokom ubrizgavanjem hladnog plina. 1 katalizator, 2 komora za miješanje, 3 unutrašnji zaslon, 4 plašt, 5 kanal za hladni plin

Sl. 50. Kontaktna peć s upravljanjem temperaturnog toka pomoću ubrizgavanja vode među reakcijske stupnjeve. 1 katalizator, 2 potporna rešetka, 3 komora za isparivanje, 4 uređaj za miješanje

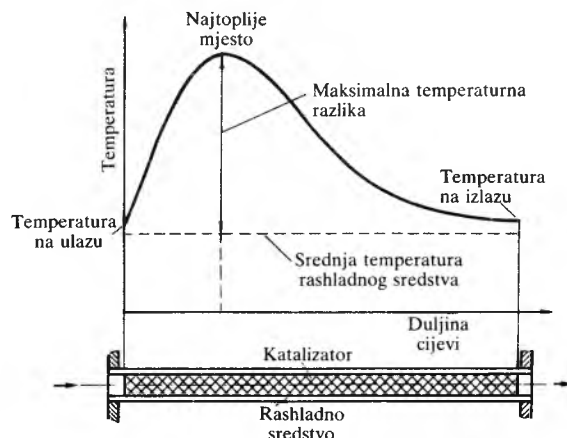
među stupnjeve, gdje isparuje i tako intenzivno hladi reakcijsku smjesu. Takvo hlađenje omogućuje smanjenje broja stupnjeva.

Za razliku od peći s indirektnom izmjenom toplote, u pećima s direktnom izmjenom mijenja se i količina i sastav reakcijske smjese od stupnja do stupnja, pa se svaka komora dimenzionira kao jednostavna kontaktna peć s neupravljanim temperaturnim tokom. Usporedbom tih dvaju postupaka izmjene toplote dobiva se da je za direktnu izmjenu potrebno više stupnjeva nego za indirektnu, ali je uređaj za indirektnu izmjenu toplote zbog jednostavnije konstrukcije jeftiniji. Jednostavnija konstrukcija tih peći ima izrazitu prednost u egzotermnim procesima pod visokim tlakom.

Kontinuirano upravljanje temperaturnim tokom u kontaktnim pećima moguće je kad se toplina na mjestu gdje se oslobađa ili troši praktički istodobno odvodi ili dovodi. To se može ostvariti indirektnom izmjenom toplote. Budući da se aktivna površina izmjenjivača toplote ne može jednoliko raspodijeliti unutar reakcijskog volumena, unutar sloja katalizatora neizbježne su temperaturne razlike, koje će biti to manje što je površina izmjenjivača bolje raspodijeljena u sloju katalizatora. Takvim se pećima postiže bolje približenje izotermnom postupku nego u pećima sa stupnjevanim upravljanjem temperaturnim tokom.

Kontaktne peći s kontinuiranim upravljanjem temperaturnim tokom najčešće su slične cijevnim izmjenjivačima toplote. Katalizator je obično u cijevima, a prenosilac toplote struji uzdužno s vanjske strane cijevi. Peći moraju biti tako dimenzionirane da je brzina izmjene toplote usklađena s brzinom reakcija. Što je toplina reakcije veća i što se traži veće približenje izotermnom postupku, to cijevi s katalizatorom moraju biti uže.

Razlike temperatura u katalizatoru nastaju i zbog toga što s odvijanjem procesa uzduž cijevi opada intenzivnost reakcije, dok površina kroz koju se izmjenjuje toplina ostaje konstantna. Temperaturni tok u cijevi u kojoj se odvija egzotermni proces prikazan je na sl. 51. Reakcija počinje odmah nakon ulaska ugrijane reakcijske smjese, pa raste i temperatura jer temperaturni gradijent još nije dovoljan za odvođenje toplote. S povećanjem pretvorbe uzduž cijevi temperatura i dalje raste, ali se s njenim porastom povećava i odvođenje toplote, pa se već u prvom dijelu cijevi uspostavlja ravnoteža između oslobođene i odvedene toplote.



Sl. 51. Temperaturni tok u osi cijevi za egzotermnu reakciju (katalizator u cijevi)

Najviša temperatura u cijevi, tzv. *vruća točka*, osnovni je kriterij za proračun peći. Zbog smanjenja koncentracije materijala koji reagira temperatura se u cijevi zatim smanjuje. U toku pogona smanjuje se aktivnost katalizatora (zbog stvaranja taloga na njegovoj površini, zatrovanja i sinteriranja). Zbog toga se s trajanjem pogona smanjuje maksimalna temperatura u cijevima, a vruća se točka pomiče prema izlaznom otvoru cijevi.

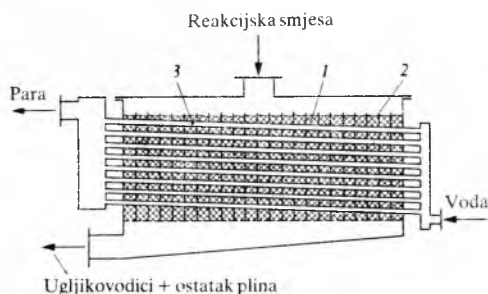
U endotermnom procesu temperatura se u cijevi najprije smanjuje do tzv. *hladne točke*, a zatim povisuje do kraja cijevi.

Kao sredstvo za odvođenje topline služe kapljevine koje u procesu ne mijenjaju agregatno stanje, kapljevine koje za vrijeme procesa isparuju te plinovi.

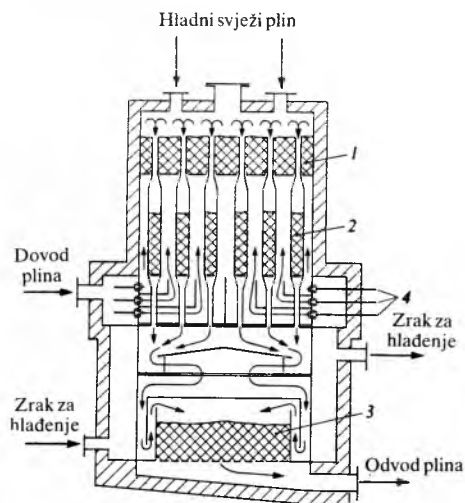
Kapljevine se upotrebljavaju za odvođenje topline zbog svoga velikog toplinskog kapaciteta i dobrog prijelaza topline, što je povoljno kad se provode brze reakcije uz male temperaturne razlike. Za takvo hlađenje prikladne su organske i anorganske kapljevine, a za visoke temperature i taline (npr. taline soli).

Isparivanje kapljevina pogodno je kao proces za odvođenje topline kad je potreban vrlo intenzivan prijelaz topline i kad se mora održavati jednolika temperatura na strani rashladnog sredstva. Povoljno je što su tada potrebne relativno male količine rashladnog sredstva, što se učinak hlađenja može lako regulirati promjenom tlaka i što temperatura rashladnog sredstva ostaje za vrijeme hlađenja konstantna. Nedostatak je takva hlađenja što je primjenljivo samo u dosta ograničenu temperaturnom području. Tako se hlađenje isparivanjem vode može primijeniti samo do 300 °C, a isparivanjem organskih kapljevina i žive do 500 °C.

Tipičan je primjer za takva hlađenja peć za niskotlačnu sintezu metanola (sl. 52; v. *Alkoholi*, TE 1, str. 215). Za tu je sintezu potrebno ostvariti vrlo točno upravljanje temperaturnim tokom, jer u vođenju osnovne reakcije tog procesa – pretvorbe smjese ugljik(II)-oksida i vodika – odstupanje procesne temperature ne smije biti veće od 10 °C. Sustav cijevi ima rebra radi povećanja prijelaza topline, pa je površina prijelaza topline na strani katalizatora veća i do deset puta od površine na strani vode. Cijevi i rebra na njima tako su razmješteni da debljina sloja katalizatora nije nigdje veća od 10 mm. Dimenzije su reakcijske komore tih peći 5 × 2,5 × 1,5 metara.



Sl. 52. Niskotlačna peć za Fischer-Tropschovu sintezu. 1 katalizator, 2 limovi za odvođenje topline, 3 cijevi za isparivanje



Sl. 53. Peć za oksidaciju sumpor(IV)-oksida uz upravljanje temperaturnog toka indirektnim hlađenjem plina i protustrujnom izmjenom topline. 1 katalizator za prvu fazu reakcije, 2 katalizator u snopu cijevi za drugi stupanj reakcije, 3 katalizator za treći stupanj reakcije, 4 regulacijski ventili

Plinovi kao sredstvo za upravljanje temperaturnim tokom mogu se upotrijebiti za procese u kojima brzina reakcije nije velika. Primjer za to je peć za sintezu amonijaka (v. *Dušik*, TE 3, str. 497).

Kombinirano upravljanje temperaturnim tokom primjenjuje se kad je potreban dugotrajni kontakt reakcijske smjese i katalizatora. Primjer je za kombinirano upravljanje katalitička oksidacija sumpor(IV)-oksida (sl. 53). Prva faza reakcije provodi se približno adijabatski na visokoj temperaturi i s velikom brzinom reakcije u prvom sloju katalizatora, ali s nepovoljnom ravnotežom. U drugom stupnju plin prolazi kroz cijevi napunjene katalizatorom uz intenzivno hlađenje hladnim plinom. U trećem se stupnju reakcijska smjesa indirektno hladi zrakom uz povoljnu ravnotežu, ali malu brzinu reakcije, pa je zbrojni iscrpak 97...98%.

Kontaktne peći s fluidiziranim slojem katalizatora

U usporedbi s drugim postupcima heterofaznih katalitičkih plinskih reakcija ima primjena fluidiziranog sloja katalizatora (v. *Fluidizacija*, TE 5, str. 491) niz prednosti: jednostavnija manipulacija katalizatorom, jednostavnije održavanje njegove aktivnosti, mnogo bolji kontakt i bolje miješanje procesnih faza, finija raspodjela temperature u reakcijskoj zoni, upotreba katalizatora s mnogo sitnijim česticama, zbog čega je veća kontaktna površina, što ubrzava reakciju uz veće koeficijente prijelaza topline, te lakše upravljanje tokom temperature s boljim približenjem izotermnom procesu.

Dakako, postoje i nedostaci tih procesa. Vrtloženjem u fluidiziranom sloju stvaraju se povratne struje koje produžuju trajanje zadržavanja proizvoda u reakcijskoj zoni, što može bitno smanjiti iscrpak. Osim toga, štetne su pojave: izlučivanje katalizatora iz fluidiziranog sloja i mehaničko trošenje čestica katalizatora zbog udaranja o stijenke. To u sloju uzrokuje nejednoliku raspodjelu čestica prema njihovim dimenzijama, a zbog toga i nejednoliko zadržavanje u reakcijskoj zoni te nejednoliko iskorištavanje katalizatora. Pri izboru katalizatora treba uzeti u obzir njegovu sklonost aglomeriranju, koja mora biti što manja.

Da bi se iskoristile prednosti fluidiziranog sloja, mora se u njemu osigurati povoljan raspored strujanja, ujednačenost strukture i katalitičke aktivnosti te upravljanja toplinskim režimom.

Raspored strujanja u fluidiziranom sloju. Uredaji za raspored strujanja obuhvaćaju uredaje za raspored fluidizatora, reaktanata i katalizatora.

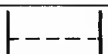
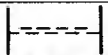
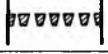
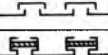
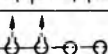
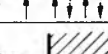
Za raspored strujanja u fluidizatoru upotrebljavaju se različiti tipovi razdjelnih elemenata (tabl. 1). Među tim elementima najčešće se odabiru oni koji se upotrebljavaju i za raspoređivanje plinova u kapljevine, kao što su zvona u kolonama za rektifikaciju. Izbjegavaju se elementi s toliko malim otvorima da postoji sklonost začepijavanju.

Razdjelna rešetka mora imati dovoljan broj otvora da se dobiju dovoljno mali mjehuri plina, i to takvih da je pad tlaka na putu kroz njih dovoljan da kroz sve elemente sloja struji jednaka količina plina. S povećanjem broja otvora povećava se i iscrpak, ali ne linearno, pa se broj otvora ne isplati povećavati iznad neke gornje granice jer se tada pojavljuju konstrukcijske poteškoće. Zbog toga se upotrebljavaju razdjelne rešetke sa 150...1000 otvora po m² njihove površine. Kako se utjecaj razdjelne rešetke na aglomeriranje mjehura u fluidiziranom sloju smanjuje s povećanjem visine toga sloja, povoljno je povećati broj otvora, to više što je sloj tanji.

Potreban pad tlaka plina na putu kroz rešetku treba biti 10...40% od smanjenja tlaka u fluidiziranom sloju. Da bi se to postiglo, potrebno je da ploština svih otvora u rešetki bude ~1% od ploštine presjeka sloja.

U otvorima razdjelne rešetke za prolaz plina formiraju se mlazovi s mnogo većim brzinama strujanja od brzina strujanja u fluidiziranom sloju (15...40 m/s), koje su potrebne za ubrzavanje čestica usporenih drugim česticama. Brzina tih mlazova mora biti primjerena otpornosti čestica katalizatora prema trošenju.

Tablica 1
VRSTE RAZDJELNIH REŠETAKA KONTAKTNIH PEĆI
S FLUIDIZIRANIM SLOJEM

Skica	Naziv	Prednost	Nedostatak
	Perforirana ploča	Jednostavna izvedba	Propadanje čvrstih čestica, nema pada tlaka
	Pomaknute perforirane ploče	Jednostavna izvedba	Nema pada tlaka
	Savijene perforirane ploče	Čvrsta konstrukcija	Slaba raspodjela plina
	Propusni sloj	—	Sklonost začepljivanju
	Rešetka od šipaka	Mogućnost hlađenja	Mali raspon uz dovoljan pad tlaka
	Vijčana rešetka	Dobra raspodjela plina	Skupa konstrukcija
	Zvonasta rešetka	Nema propadanja čvrstih čestica	—
	Filtarske ploče	Dobra raspodjela plina	Sklonost začepljivanju
	Cijevni raspodjeljivači	Pogodni za fluidizirani sloj	—
	Dovodne sapnice	Mogućnost dovoda kapljevitih reaktanata	—
	Konično dno peći	Jednostavna izvedba	Slaba raspodjela plina
	Jednostruka ili višestruka sita	—	Nema pada tlaka

Uređaji za raspoređivanje reaktanata i katalizatora razlikuju se s obzirom na mogućnost da reakcijska smjesa služi ujedno i kao fluidizator. Ako je to tako, svi sastojci smjese moraju biti plinovi ili moraju biti dovedeni u plinovito stanje prije uvođenja u razdjelnu komoru. Ako reakcijska smjesa ne služi kao fluidizator, jedna se ili više komponente te smjese ubrizgava u peć iznad razdjelne rešetke kroz bočne sapnice. Pri tome druge plinovite komponente služe kao fluidizator ili kao sredstvo za raspršivanje kapljevitih komponenti. Za to se raspršivanje može upotrijebiti i neki pomoćni plin.

Održavanje jednolikosti strukture fluidiziranog sloja. Za to služe uređaji za sitnjenje mjehura, koji se u sloju povećavaju aglomeriranjem, te za izdvajanje katalizatorskog praha.

Mjehuri plina u fluidiziranom sloju to više rastu što se više udaljuju od razdjelne rešetke, pa je često potrebno njihovo razbijanje unutar sloja. U tu se svrhu u reakcijsku zonu ugrađuju perforirane ploče. Da bi štetni učinak bio dovoljno mali, ukupna površina njihovih otvora mora biti mnogo veća (15...20% površine presjeka reaktora) nego što je na razdjelnoj rešetki.

U kontaktnim pećima s indirektnim grijanjem ili hlađenjem ti uređaji nisu nužni jer se elementi izmjenjivača topline mogu tako konstruirati da služe i za sitnjenje mjehura. Ponekad se u tu svrhu ugrađuju mješala, spirale i sl.

Ipak se aglomeriranje mjehura najdjelotvornije sprečava primjenom višestepenih peći, pa se takve peći grade kad god je to ekonomski opravdano.

Izdvajanje katalizatorskog praha iz fluidiziranog sloja. Mehaničkim trošenjem u fluidiziranom sloju čestice se katalizatora postepeno usitnjuju, pa se finije čestice koncentriraju u gornjim, a krupnije u donjim dijelovima sloja. U krajnjem slučaju proizvodi peći mogu ponijeti sa sobom najsitnije

čestice. Posljedica je tog raslojavanja katalizatora nepovoljno produžavanje kontakta proizvoda i katalizatora uz pojavu sporednih reakcija i poremećaje toplinskog toka procesa. To može ozbiljno poremetiti čitav proces.

Obično je prekomjerno prašenje katalizatora osobito intenzivno kad je katalizator još svjež. Zbog toga se peć većinom puni tzv. otprašenim katalizatorom, ali se katalizatorska prašina koja nastaje za vrijeme pogona mora stalno uklanjati iz procesnog sustava. To se postiže ugradnjom ciklona i filtara za čišćenje proizvoda. Katalizatori na nosačima osobito su skloni mehaničkom trošenju, pa treba izbjegavati njihovu upotrebu u fluidiziranom sloju.

Održavanje katalitičke aktivnosti u fluidiziranom sloju. Izbor postupaka za održavanje katalitičke aktivnosti u fluidiziranom sloju ovisi u prvom redu o načinu trošenja katalizatora. Općenito je povoljno da čestice katalizatora budu dovoljno male (50...500 μm), jer će zbog male mase energija sudara i njihovo mehaničko trošenje biti malo. Kad se katalizator mnogo troši, primjenjuju se postupci 1 i 3 (tabl. 2), a kad sposobnost regeneriranja opada s ponavljanjem toga procesa, nisu prikladni postupci 2, 4 i 5. Dalji kriteriji za izbor održavanja katalitičke aktivnosti jesu: brzina inaktiviranja i regeneracije, potrebna minimalna aktivnost, cijena katalizatora i troškovi regeneracije.

Tablica 2
POSTUPCI ODRŽAVANJA KATALITIČKE AKTIVNOSTI
U KONTAKTNIM PEĆIMA S FLUIDIZIRANIM SLOJEM

	Postupak održavanja aktivnosti	Karakteristike	Vodenje postupka
1	Katalizator se nakon jednog radnog ciklusa potpuno istroši, izbacuje se i zamjenjuje svježim katalizatorom	Katalizator mora biti jeftin i dovoljno dugo upotrebljiv	Nekontinuirano
2	Katalizator se neko vrijeme nakon obustave pogona regenerira u reaktoru	Potreban je uređaj za regeneraciju, proizvodnja je manja zbog nužnih prekida	Nekontinuirano s dužim međuciklusnim prekidima zbog regeneracije
3	Povremeno se dio katalizatora zamjenjuje svježim katalizatorom	Potreban je uređaj za odvođenje i dovođenje katalizatora	Nekontinuirano s prekidima kraćim nego u postupku 2
4	Kao 3, ali se katalizator regenerira u malom regeneratoru	Skup postupak	Kvazikontinuirano
5	Katalizator se kontinuirano odvodi iz reaktora, regenerira u regeneratoru i ponovno dovodi u reaktor	Obično s prijenosom topline, konstantna aktivnost u sloju	Kontinuirano

Od svih takvih postupaka tehnički su najdotjeraniji postupci s regeneracijom u samom fluidiziranom sloju ili s funkcionalno usko spregnutim pećima i regeneratorima (v. *Fluidizacija*, TE 5, str. 493).

Upravljanje toplinskim režimom. Za upravljanje toplinskim režimom u kontaktnim pećima s fluidiziranim slojem primjenjuju se postupci indirektno izmjene topline i postupci direktnog grijanja ili hlađenja.

Za indirektnu izmjenu topline služe cijevni izmjenjivači topline ugrađeni u reakcijsku zonu i plaševi za grijanje ili hlađenje smješteni oko nje. Izbor medija za prijenos topline ovisi o procesnoj temperaturi i o tome da li je proces endoterman ili egzoterman.

Za endotermne procese na temperaturama višim od 350 °C tehnički je najpovoljnije dovoditi toplinu talinama soli. Kad je proces egzoterman, toplota se odvodi isparivanjem prenosioča topline.

Za razliku od kontaktnih peći s mirnim slojem, u pećima s fluidiziranim slojem uz prikladnu regulaciju moguće je indirektnim hlađenjem održavati velike razlike temperatura između vrućeg i rashladnog medija. Izbor te razlike temperatura ovisi o postojanosti katalizatora, ili reaktanata i proizvoda, i o opasnosti od taloženja na stijenkama izmjenjivača.

Temperatura sloja može se regulirati promjenom tlaka rashladnog medija, promjenom količine reaktanta, promjenom temperature i brzine strujanja medija, te uključivanjem ili isključivanjem dijelova izmjenjivača topline.

Za direktnu izmjenu topline kao prenosilac topline služi katalizator. Najuspješniji je postupak u kojem je to kombinirano s regeneracijom katalizatora. I električno je grijanje (elektrodama zaronjenim u fluidizirani sloj) vrlo prikladno jer nema gubitaka proizvoda, a upotrebljava se kad su potrebne vrlo visoke temperature.

LIT.: O. Barth, Die Metallverflüchtungsverfahren. W. Knapp, Halle 1935. – V. Tafel, Lehrbuch der Metallkunde. S. Hirzel, Leipzig 1953. – K. Braun, Die Öfen der Eisenhüttenwerke. Fachbuchverlag, Leipzig 1958. – F. Schytil, Wirbelschichttechnik. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1961. – F. Matthes, G. Vehner, Anorganisch-technische Verfahren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1964. – W. Heiligenstaedt, Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen. Verlag Stahl Eisen, Düsseldorf 1966. – L. von Bogdany, H. J. Engel, Die Reduktion der Eisenerze. Springer Verlag, Berlin 1967. – D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney-Toronto 1969. – J. F. Davidson, D. Harrison, Fluidization. Academic Press, London-New York 1971.

Ž. Viličić

REGULACIJA, AUTOMATSKA, automatsko održavanje željenog stanja nekog procesa ili mijenjanje tog stanja po određenom zakonu, bez obzira na djelovanje vanjskih i unutrašnjih poremećaja. To se ostvaruje mjerenjem stanja procesa i upotrebom mjernih signala za formiranje upravljačkih djelovanja na proces.

Različita djelovanja u prirodi, društvu i tehnici nazivaju se procesima. Mnogi osnovni procesi u živim bićima održavaju se automatskom regulacijom. Primjeri procesa jesu i određena djelovanja u ekonomskim sustavima, u tehničkim uređajima, proizvodni tehnološki procesi itd. Objekt (regulacijski objekt) je stroj ili dio stroja (npr. alatni ili električni stroj), ili tijelo kao što je avion, raketa ili brod, uz čije je gibanje vezan neki proces. Npr. brod je objekt uz koji je vezan proces plovidbe.

Stanje procesa određuju različite fizikalne veličine. Karakteristične veličine procesa mogu biti temperatura, tlak, protok, razina, debljina, pomak, brzina, ubrzanje, sila, električni napon, struja, frekvencija i snaga. Različita svojstva tvari koje sudjeluju u procesu, npr. kemijski sastav, tvrdoća ili viskoznost, mogu također karakterizirati neki proces.

Automatska regulacija (skraćeno regulacija) nije tehnički izum, već jedan od prirodnih zakona. Prva poznata čovjekova tvorevina u kojoj je primijenjeno načelo automatske regulacije nastala je u ←III st. (Ktesibijev vodeni sat). Industrijska primjena automatske regulacije počinje s regulatorom razine vode u kotlu parnog stroja 1765. (И. И. Ползунов) i s Wattovim centrifugalnim regulatorom brzine parnog stroja 1784. (J. Watt, prema zamisli C. Huygensa od 1658). Oko 80 godina kasnije pojavljuju se prva produbljenija teoretska razmatranja stabilnosti u vezi s Wattovim regulatorom (J. C. Maxwell, 1868). Prvi kriteriji stabilnosti formulirani su 1877. (E. J. Routh) i 1895. (A. Hurwitz). Frekvencijski kriterij stabilnosti formulirao je H. Nyquist 1932. Brzi razvoj teorije i prakse automatske regulacije počinje sredinom našeg stoljeća.

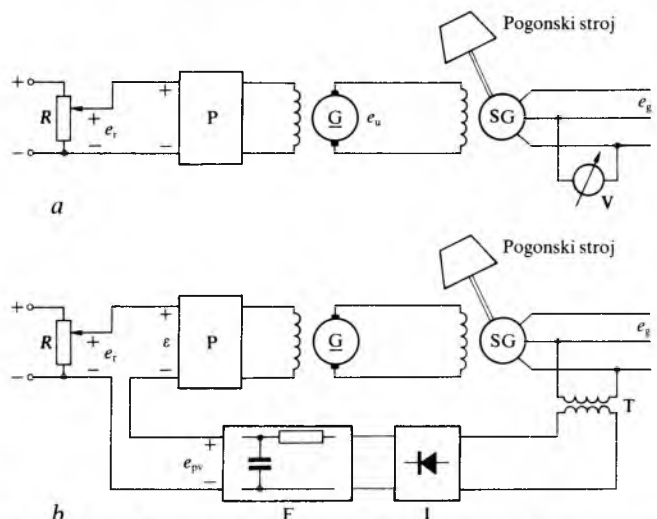
REGULACIJSKI KRUG

Primjer održavanja stalne vrijednosti napona trofaznog sinhronog generatora može poslužiti za ilustraciju djelovanja automatske regulacije. Radi jednostavnosti pretpostavlja se da sinhroni generator nije povezan s elektroenergetskim sustavom, već da opskrbljuje električnom energijom svoja vlastita trošila (npr. generator u tvornici udaljenoj od električnih mreža; slične su prilike u brodskih generatora, ili generatora u sastavu nekog samostalnog agregata). Taj generator, kao pretvarač mehaničke energije u električnu,

treba osigurati opskrbu trošila električnom energijom konstantnog napona i frekvencije. Promjene napona generatora e_g i frekvencije tog napona f moraju ostati unutar dopuštenih odstupanja.

Sinhroni generator dobiva mehaničku energiju od pogonskog stroja (obično parna turbina, vodna turbina ili motor s unutrašnjim izgaranjem). Pretpostavlja se da je brzina vrtnje pogonskog stroja takva da se frekvencija f ne mijenja izvan dopuštenih granica.

Otvoreni sustav. U tzv. otvorenom sustavu (sl. 1a) željena (nominalna) vrijednost napona e_g odabire se postavljanjem klizača potencijometra R u odgovarajući položaj, tj. odgovarajućim iznosom napona e_r . Taj napon, pojačan na pojačalu P i istosmjernom uzбудniku G, uzrokuje pripadnu uzбудnu struju sinhronog generatora SG, pa time i ispravan napon e_g .



Sl. 1. Sinhroni generator: a u otvorenom sustavu, b u sustavu s povratnom vezom

Neka je nominalni napon namješten u praznom hodu, tj. kada nisu priključena trošila na sinhroni generator. Kada se trošila priključe, napon e_g će se smanjiti. To smanjenje napona ovisi o opterećenju i može biti nedopustivo veliko (i više od 10%). Uzroci tom smanjenju napona jesu unutrašnji pad napona (na impedanciji armaturnog namota) sinhronog generatora, zatim reakcija armature, te donekle i smanjenje brzine vrtnje pogonskog stroja. Uz isti položaj klizača potencijometra napon sinhronog generatora može se mijenjati i zbog promjena temperature. Zbog tih promjena mijenjaju se vrijednosti otpora uzбудnih namota sinhronog generatora i uzбудnika, pa prema tome i vrijednosti uzбудnih struja, odnosno induciranih napona. Nadalje, promjene napona sinhronog generatora mogu biti posljedica promjena napona izvora za napajanje pojačala P, trošenja i starenja aparature, itd.

Promjene napona e_g mjere se voltmetrom V, a primjerenim pomicanjem klizača potencijometra ponovno se namješta željena vrijednost napona.

Zatvoreni sustav. Uvođenjem povratne veze (sl. 1b) mogu se odstupanja napona od nominalne vrijednosti znatno smanjiti. Napon generatora mjeri se pomoću transformatora T. Ispravljač I služi za ispravljanje sekundarnog napona transformatora, a filter F za filtriranje ispravljenog napona. Izgladeni istosmjerni napon povratne veze e_{pv} , proporcionalan naponu sinhronog generatora, suprotstavlja se (negativna povratna veza) ulaznom naponu e_r . Sada je ulazni napon pojačala P jednak razlici tih napona, dakle $\varepsilon = e_r - e_{pv}$. Uzбудni namot sinhronog generatora napaja se pojačanim naponom razlike ε (signal razlike, signal odstupanja, regulacijsko odstupanje).

Nominalna vrijednost napona sinhronog generatora u sustavu s povratnom vezom namještena je (pomoću potencijometra R) u praznom hodu. Smanjenje tog napona pri opterećenju generatora uzrokuje također smanjenje napona