

Temperatura rashladnog sredstva, međutim, nije jedini kritični parametar reaktora, jer sve veličine koje se pojavljuju u izrazima potrebnim za projektiranje reaktora mogu utjecati na osjetljivost reaktora. Tako je, npr., na sl. 31 prikazana ovisnost temperature T u reaktoru o vremenu zadržavanja θ_0 za različite vrijednosti početne koncentracije C_{A0} , a na sl. 32 ovisnost koncentracije C_A reaktanta A o vremenu zadržavanja θ_0 za različite vrijednosti početne koncentracije.

Cijevni reaktor s vanjskim izmjenjivačem topline. Za takav reaktor postoji temperatura T_1 (sl. 33a) s kojom procesni sustav ulazi u reaktor, uz koju je osigurano autotermičko funkcioniranje reaktora. Uz pretpostavku da je termički kapacitet reaktanta jednak termičkom kapacitetu proizvoda reakcije, za izmjenjivač topline vrijedi izraz

$$F_A \gamma_0 (T_1 - T_0) = US(T_2 - T_1), \quad (160)$$

gdje je $F_A = v_{sA} V_{R0}$, a S površina okomitog presjeka reaktora, dok za reaktor vrijede izrazi

$$F_A (-\Delta H_T) d\xi = F_A \gamma_0 dT, \quad (161)$$

$$F_A d\xi = r_A(\xi, T) S dz, \quad (162)$$

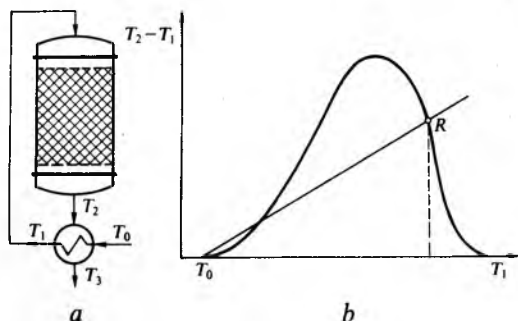
pa se dijeljenjem tih izraza dobiva

$$\frac{dT}{d\xi} = \frac{(-\Delta H_T)}{\gamma_0} \cdot \frac{S}{F_A} r_A(\xi, T). \quad (163)$$

Integracijom izraza (163) dobiva se

$$\xi = \frac{\gamma_0}{(-\Delta H_T)} (T - T_1). \quad (164)$$

Iz izraza (163) može se odrediti, za zadanu visinu uređaja, ovisnost $T_2 = T_2(T_1)$, jer rješenje ovisi o unaprijed utvrđenoj vrijednosti T_1 .



Sl. 33. Primjer toka temperature u cijevnom reaktoru s vanjskim izmjenjivačem topline. a) shema reaktora, b) dijagram za određivanje točke R stabilnog pogona

Budući da su toplota proizvedena reakcijom i odvedena toplota proporcionalne razlici temperatura $T_2 - T_1$, može se nacrtati dijagram koji pokazuje ovisnost razlike $T_2 - T_1$ o temperaturi T_1 (sl. 33b). Krivulja koja se odnosi na toplinu proizvedenu reakcijom dobiva se integracijom izraza (163), a pravac koji se odnosi na odvedenu toplinu određen je izrazom (160). Sjecište krivulje i pravca, analogno razmatranju reaktora sa savršenim miješanjem, određuje stabilnu, odnosno nestabilnu točku rada reaktora. Osim toga, prema toku funkcije $T_2(T_1)$ može se procijeniti osjetljivost reaktora.

Cijevni reaktor s unutrašnjim izmjenjivačem topline. Shema takva reaktora vidi se na sl. 34a. Plinoviti tok najprije prolazi između cijevi, gdje se zagrijava, a zatim struji kroz cijevi u kojima se nalazi katalizator i u kojima se odvija kemijska reakcija. Termičke bilance mogu se napisati u obliku:

$$-F_A \gamma_0 dT_1 = U(T_2 - T_1) O_C dz, \quad (165)$$

$$F_A \gamma_0 dT_2 = F_A (-\Delta H_T) d\xi - U(T_2 - T_1) O_C dz, \quad (166)$$

gdje je O_C opseg cijevi. Za materijalnu bilancu vrijedi izraz (162).

Iz relacije (165) i (166) dobiva se

$$\gamma_0 d(T_2 - T_1) = (-\Delta H_T) d\xi, \quad (167)$$

pa odatle integracijom

$$\xi = \frac{\gamma_0}{(-\Delta H_T)} (T_2 - T_1). \quad (168)$$

Ako se postavi da je

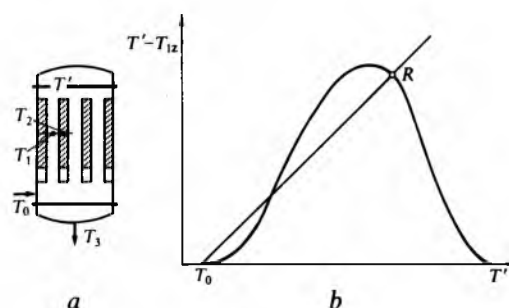
$$m = \frac{F_A \gamma_0}{U O_C}, \quad (169)$$

te ako se uzme u obzir izraz (162), relacije (165) i (166) mogu se napisati u obliku

$$-\frac{dT_1}{dz} = \frac{T_2 - T_1}{m}, \quad (170)$$

$$\frac{dT_2}{dz} = \frac{S(-\Delta H_T)}{F_A \gamma_0} r_A(T_1, T_2) - \frac{T_2 - T_1}{m}, \quad (171)$$

gdje je uzeto u obzir da doseg reakcije ξ ovisi o T_1 i T_2 u skladu s relacijom (168).



Sl. 34. Primjer toka temperature u cijevnom reaktoru s unutrašnjim izmjenjivačem topline. a) shema reaktora, b) dijagram za određivanje točke R stabilnog pogona

Integracijom relacija (170) i (171) među granicama $z = 0$, uz $T_1 = T_2 = T'$, i $z = Z$, uz $T_1 = T_0$ i $T_2 = T_3$, mogu se odrediti promjene T_1 i T_2 . Budući da temperatura T' nije poznata, ona se određuje pokušavanjem tako da se pretpostavi neka vrijednost, s tim da se proračun provede sve do $z = Z$, za koju se mora postići da je $T_{1Z} = T_0$. Ako se nacrtaju ovisnost $T' - T_{1Z}$ o T' (sl. 34b), dobiva se krivulja koja je osnova za određivanje točke stabilnog pogona. Te se točke dobivaju kao sjecište krivulje i pravca s nagibom od 45° koji prolazi kroz točku $T' = T_0$.

LIT.: S. B. Kantorowitsch, Die Festigkeit der Apparate und Maschinen in der chemischen Industrie. VEB Verlag Technik, Berlin 1955. – K. Denbigh, Chemical Reaction Theory. University Press, Cambridge 1965. – O. Levenspiel, Chemical Reaction Engineering. Wiley, New York 1967. – H. Tütze, Elemente des Apparatebaues. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1967. – E. Klapp, Festigkeit im Apparate- und Anlagenbau. Werner, Düsseldorf 1970. – S. B. Kantorowitsch, Chemiemaschinen. VEB Verlag Technik, Berlin 1970. – R. Tapprogge, Konstruieren mit Kunststoffen. VDI-Taschenbuch. VDI Verlag, Düsseldorf 1971. – M. Lenzi (edit.), Enciclopedia dell'ingegneria, Vol. VI, Ingegneria Chimica. ISEDI, Milano 1972. – C. M. Dolezalek, Planung von Fabrikanlagen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1973. – R. A. Vauck, H. A. Müller, Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. Steinkopf, Dresden 1974. – P. Grassmann, E. Widmer, Einführung in die thermische Verfahrenstechnik. De Gruyter, Berlin 1974. – S. R. Frey, Plant layout, Planung, Optimierung und Einrichtung von Produktions-, Lager- und Verwaltungsstätten. Hanser, München-Wien 1975. – L. M. Rose, Engineering Investment Decisions. Elsevier, Amsterdam 1976. – E. Mach, Planung und Errichtung chemischer Fabriken. Technik, Aarau, Frankfurt/M. 1977. – G. Bernecker, Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen. VDI Verlag, Düsseldorf 1977. – E. Hornbogen, Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1979. – E. Klapp, Apparate- und Anlagentechnik. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1980.

Redakcija

PROCESNA TEHNIKA (procesno inženjerstvo), grana tehnike koja obuhvaća općenite osnove za proučavanje i provedbu industrijskih procesa preradbe sirovina mijenjanjem vrste, sastava i fizikalnog stanja, te djelatnosti za projektiranje i gradnju procesnih postrojenja.

Glavno je područje primjene procesne tehnike velika kemijska industrija, pa se u njoj često govori kao o kemijskoj procesnoj tehnici (kemijskoj tehnici, kemijskom inženjerstvu). Međutim, ti nazivi manje odgovaraju suvremenom značenju procesne tehnike nego što je to bilo u prošlosti, jer je danas njena primjena vrlo široka i u nizu drugih industrija, osobito u rudarstvu, metalurgiji, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, pripremi voda za piće i u tehnološke svrhe, preradbi industrijskih i drugih otpadaka radi reciklaže ili zaštite okoliša, nuklearnoj tehnici, proizvodnji celuloze i papira, itd.

Zbog toga što obuhvaća veliki dio industrijske proizvodne tehnike uopće, procesna se tehnika ponekad (pogrešno) poistovjećuje s njome. Međutim, procesna se tehnika dosta jasno izdvaja iz ostale industrijske proizvodne tehnike time što je, osim vrlo rijetko (npr. u preradbi polimernih materijala), za njene proizvode geometrijski oblik u osnovi bez praktičnog značenja. (Industrijski proizvodi koji nisu predmet procesne tehnike oblikovani su funkcionalno.)

Procesna se i ostala industrijska proizvodna tehnika dosta razlikuju i s gledišta svojih fizikalnih osnova. Dok se ostala industrijska proizvodna tehnika (npr. u građevinarstvu, strojarstvu, elektrotehnici) pretežno zasniva na fizici čvrstog stanja, procesna se tehnika pretežno zasniva na fizici fluida.

Izdvajanje procesne tehnike u zasebnu struku počelo je tek pred sedamdesetak godina. Prvi put su dovoljno jasno uočeni njeni obrisi 1915, kad je A. D. Little u SAD ustvrdio da se svaki kemijski proces, bez obzira u kojem se mjerilu provodi, može razlučiti u koordiniranu seriju dijelova, koje je nazvao *jediničnim akcijama*, te da usprkos mnoštvu različitih procesa, tih akcija nema mnogo. (Također je ustvrdio i da pojedini kemijski procesi obično obuhvaćaju samo malo tih akcija.)

Unatoč tome što procesna tehnika postoji kao zasebna struka razmjerno kratko vrijeme, njen je razvoj bio vrlo brz i dinamičan. To je prije svega bilo uzrokovano brzim razvojem kemijske industrije.

Početkom našeg stoljeća kemijska je industrija najvećim dijelom bila ograničena na dobivanje razmjerno malobrojnih anorganskih proizvoda. Gradnjom i vođenjem proizvodnje postrojenja kemijske industrije bavili su se tzv. industrijski kemičari. U tom su poslu oni bili suočeni i s problemima koji nisu bili čisto kemijske prirode (npr. problemima tehnike separacije i čišćenja sirovina i proizvoda, mehanike fluida, toplinske tehnike), pa se od njih tražila i kompetencija u različitim primijenjenim disciplinama fizike (prije svega u strojarstvu) u istraživanju i u provedbi procesa u industriji.

Pod utjecajem tradicije u Njemačkoj se procesna tehnika (pod nazivom *Verfahrenstechnik*) formirala iz iskustva industrijskih kemičara i strojarstva, osobito dijela strojarstva povezanog s kemijskom industrijom. Na sličan način u Njemačkoj se formiralo i visoko školstvo za obrazovanje stručnjaka za procesnu tehniku, inženjera kemije, koji su se zbog toga identificirali s ranijim industrijskim kemičarima.

U SAD, gdje nije bilo te tradicije, stručno obrazovanje za kemijske inženjere nastalo je autonomno (pod nazivom *chemical engineering*), razlikujući se odmah u početku od obrazovanja industrijskih kemičara i drugih inženjera. To je obrazovanje u SAD odmah u početku bilo usmjereno osposobljavanju kadrova za projektiranje i provođenje procesa kemijske industrije i drugih industrija koji se sastoje od sličnih stadija, te na upravljanje proizvodnjom tih postrojenja. Dakako, to je, osim vladanja nizom disciplina s područja kemije, fizike i matematike, nužno uključivalo i poznavanje ekonomije te proizvodnje.

Poslije drugoga svjetskog rata ojačao je američki utjecaj na razvoj procesne tehnike i u zemljama u kojima se ona dotad bazirala na stanju u Njemačkoj. Najčešće je to uzrokovalo usmjeravanje inženjera kemije u šire razumijevanje fizikalnih i kemijskih fenomena koji se pojavljuju u postrojenjima kemijske industrije, ali i pometnju u razlikovanju industrijske kemije (kemijske tehnologije) od procesne tehnike.

Premda granice između tih dvaju područja nisu oštre, kasnije su se ona sve jasnije diferencirala, pa se danas pod industrijskom kemijom manje-više razumijeva tzv. vertikalno proučavanje pojedinih procesa preradbe sirovina u gotove proizvode, a pod procesnom tehnikom tzv. horizontalno proučavanje općih osnova procesa kemijske industrije (kao što su npr. osnove mehanike fluida, katalize, transporta tvari) nezavisno od specifičnosti pojedinih procesa.

Osnove procesne tehnike. Suvremeni pristup procesnoj tehnici temelji se na općenitom promatranju postrojenja kemijske industrije. Kao i sva industrijska postrojenja, i ta se izvana smiju promatrati u termodinamičkom smislu kao otvoreni sustavi, jer u njih ulaze i iz njih izlaze tokovi materijala (sirovina, proizvoda, sporednih proizvoda i otpadaka) i s njima asocirani tokovi energije (unutrašnje, kinetičke, potencijalne), rada (obično mehaničkog i električnog) i topline.

Unutar dovoljno dugog vremena, ili ako se pretpostave teorijski uvjeti, funkcioniranje kemijskih postrojenja može biti stacionarno. Međutim, zbog neizbježnih odstupanja

industrijskih od idealiziranih uvjeta, čak i kad pri tom nema intermitentnih stadija, funkcioniranje kemijskih postrojenja promatrano u kratkim vremenskim intervalima očito je varijabilno.

Pri tom treba uzeti u obzir da se vanjskom promatraču može činiti sasvim kontinuiranim i funkcioniranje postrojenja koje uz kontinuirane obuhvaća i intermitentne stadije (korake) ako su ulazni i izlazni tokovi materijala i energije konstantni. Tada su unutar postrojenja intermitentni stadiji povezani i međusobno i s kontinuiranim stadijima pomoću sustava za akumulaciju ili miješanje, koji poništavaju ili barem dovoljno ublažuju periodičku fluktuaciju tvari i energije, a time i iscrpaka i sastava proizvoda.

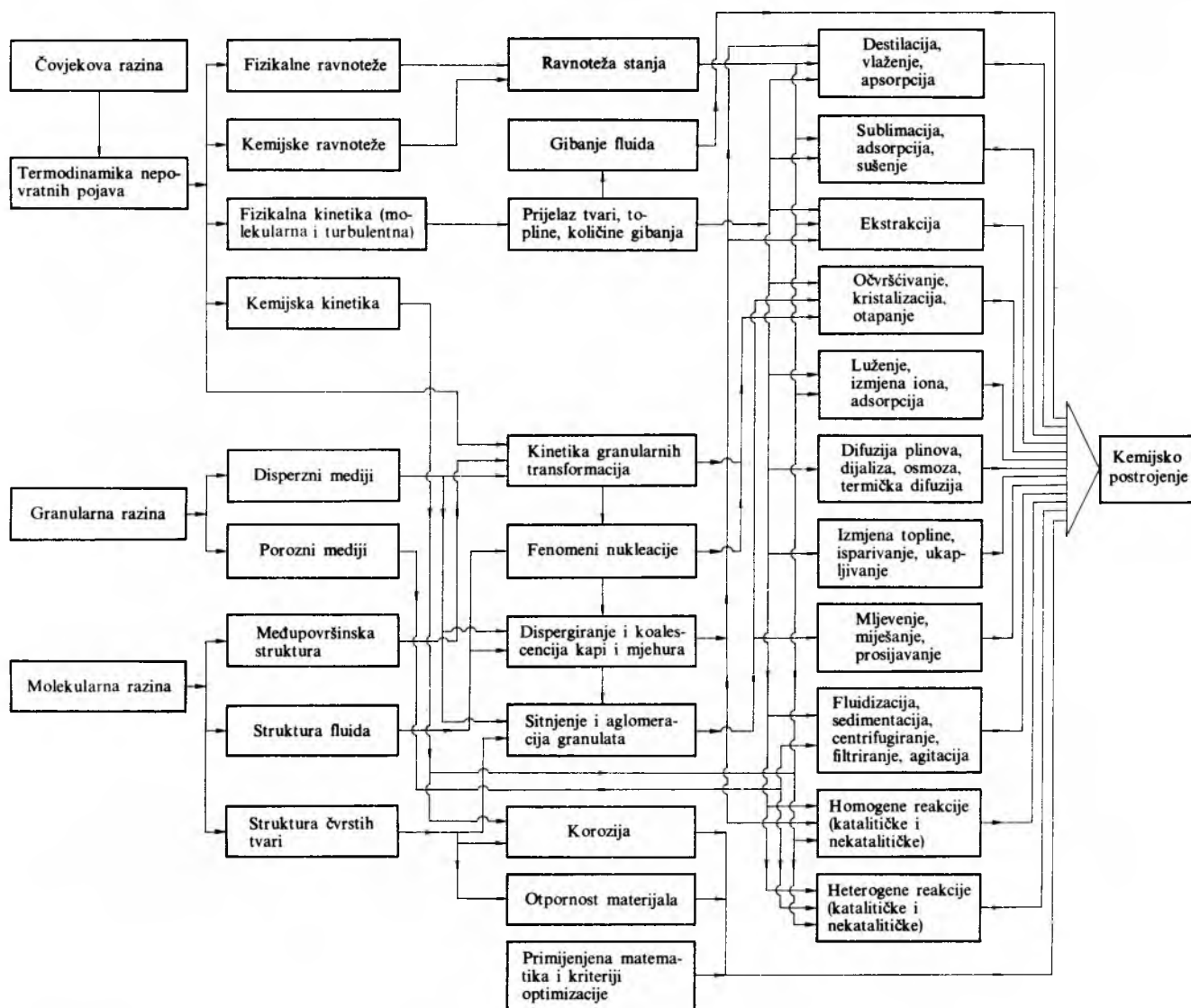
Također treba uzeti u obzir da se kemijska postrojenja moraju koncipirati kao jedinstveni sustavi, gdje promjene nekog stadija preradbe manje-više nužno uzrokuju poremećaje vođenja i time povećavanje troškova za dobivanje proizvoda. Zbog toga kontinuirana postrojenja općenito moraju biti automatski upravljana, da bi se unutar nekih granica moglo reagirati na slučajne varijacije tako da se u svakom stadiju ponovno uspostave uvjeti predviđeni za optimalno funkcioniranje.

Općenito se kemijska postrojenja sastoje od međusobno povezanih aparatura (ponekad zvanih potpostrojenjima) u kojima se provode pojedini stadiji procesa, ali se pri projektiranju i vođenju tih postrojenja nastoji postići optimalno funkcioniranje čitavog postrojenja. Pri tom je ta optimalnost relativna, jer je uvjetovana ekonomskim karakteristikama sredine u kojoj se upotrebljavaju postrojenja, osobito lokalnom kakvoćom i cijenama sirovina i proizvoda, te zahtjevima očuvanja okoliša. Osim toga, optimalnim uvjetima funkcioniranja čitavog postrojenja ne moraju uvijek odgovarati i optimalni uvjeti funkcioniranja pojedinih potpostrojenja. To uvodi mnogo operativnih varijabli, a time i brojne stupnjeve slobode u proučavanju funkcioniranja postrojenja, pa ga veoma otežava. Zbog toga se postrojenja ne mogu ni projektirati ni voditi na osnovi jednostavnog povezivanja potpostrojenja koja su pojedinačno optimirana. Besprijekorno rješavanje tih problema, ne samo tehničke nego i ekonomske prirode, moguće je samo na osnovi poznavanja statičkog i dinamičkog ponašanja pojedinih potpostrojenja u područjima oko njihova optimalnog funkcioniranja.

Analogno postrojenjima, i potpostrojenja se mogu sastojati od elemenata i funkcionirati nizom elementarnih stadija, pa već prema broju tih dijelova mogu biti manje ili više složena. Zbog toga je za projektiranje i vođenje procesnih postrojenja potrebno i temeljito poznavati mehanizme djelovanja elementarnih stadija. Iako je tih stadija vrlo mnogo, njihovo je proučavanje razmjerno jednostavno, jer se svodi na proučavanje razmjerno malo jednostavnih procesa.

Od mnogih pokušaja klasificiranja znanstvenih osnova, potrebnih za poznavanje kemijskih postrojenja i potpostrojenja, najuspješnije je ono koje je učinio P. Le Goff (sl. 1). Zanemarujući nuklearnu razinu, na kojoj se promatraju pojave u kojima sudjeluju čestice dimenzija manjih od 0,1 nm, što je vrlo rijetko u procesnoj tehnici, Le Goffova se klasifikacija zasniva na tri temeljne razine: molekularnoj, granularnoj i čovjekovoj. Na njima se respektivno promatraju pojave u kojima sudjeluju čestice dimenzija 0,1 nm...0,1 μ m, 0,1 μ m...10 mm i veće od 10 mm. Pri tom treba uzeti u obzir da je ta klasifikacija, kao i većina ostalih, ipak pojednostavnjenje.

Temeljna odlika pristupa promatranju svakog procesa, pa i procesa kemijske industrije, s čovjekove razine jest koncepcija medija kao kontinuuma. Za razliku od toga, pristup promatranju procesa s molekularne razine jest diskontinuirana koncepcija medija. Promatranje procesa s granularne razine, tj. razine nakupina (npr. zrnaca praha, kapljica dispergiranih u plinovima ili emulzijama, mjehurića, vrtloga u turbulentnom strujanju fluida), sve je važnije u kemijskoj industriji. Pri tom se također promatra tvar kao kontinuum, ali se ne mogu zanemariti površinski fenomeni (fenomeni u kojima su svojstva graničnih površina faza veoma važna).



Sl. 1. Shema znanstvenih osnova procesne tehnike prema P. Le Goffu

Bez obzira na razinu promatranja, u procesnoj se tehnici uvijek ispituju promjene veličina (tvari, energije, količine gibanja). Procesi kojima se odvijaju te promjene mogu se svrstati u tri skupine: *procesi prijenosa (transporta)*, *prijelaza (transfera)* i *pretvorbe (transformacije)*. Pri tom se pod prijenosom razumijeva promjena veličina među dvjema točkama unutar jedne faze, pod prijelazom međufazne promjene veličina kontaktom, a pod pretvorbom promjene veličina ili vrste molekula bez promjene mjesta. Obično su ti procesi povezani i pridruženi. Rijetko se odvijaju izolirano. (Zbog toga općenito, pa i u ovom članku, treba uzeti s potrebnom rezervom kategorizacije procesa prema tim skupinama.)

U području u kojemu zadovoljava koncepcija medija kao kontinuuma problemi se brzina pretvorbi proučavaju u kemijskoj (v. *Kemijska kinetika*, TE 7, str. 45), a problemi brzina prijenosa i prijelaza u fizikalnoj kinetici. Na sličan se način u tom području proučavanje ravnotežnih stanja (kad je brzina promjene jednaka nuli) dijeli na proučavanje fizikalnih i kemijskih ravnoteža. U području diskontinuiranih medija prijenos ili prijelaz obuhvaćaju pojave nukleacije (nastajanje jezgara), koalescencije ili dispergiranja, a pretvorba pojave sitnjenja i aglomeracije čvrstih tvari.

Takva koncepcija traži proučavanje elementarnih stadija i potpostrojenja pomoću matematičkih modela koji analitičkim izrazima opisuju promatrane pojave uzevši u obzir nametnuta ograničenja. Općenito se izrazi od kojih se sastoje

matematički modeli mogu grupirati u četiri skupine. Prvu čine izrazi održanja veličina (tzv. *bilančni izrazi*), drugu izrazi za opis mehaničkih i drugih fizikalnih, te kemijskih ravnoteža, treću kinetički izrazi koji opisuju smjer i brzinu promjena sustava, a četvrtu ekonomske bilance i optimizacije.

Budući da je općenito najvažnije poznavati kako se mijenjaju sastavni dijelovi sustava, obično su korisniji kinetički nego energijski izrazi. Zbog toga je i proučavanje elementarnih stadija s gledišta termodinamike, obuhvaćeno tzv. *termodinamikom ireverzibilnih procesa*, dosad imalo malo praktično značenje u istraživanju procesnih postrojenja. Međutim, zbog toga što su spoznaje s područja te discipline osnova za proučavanje ravnoteža, one su zajedno s predodžbama o granularnoj i molekularnoj strukturi potrebne za razumijevanje funkcija potpostrojenja.

Proučavanje nekog potpostrojenja nezavisno od postrojenja unutar navedenih granica može obuhvatiti pojave u njemu, matematički model koji simulira njegovo funkcioniranje, te projektiranje i vođenje procesnog stadija za koji služi. Osim toga, svaki se od tih stadija, a time i postrojenje u kojemu se provodi, može karakterizirati prirodom promjena sastava u njegovu sustavu, tj. već prema tome da li su one uzrokovane pretežno fizikalnim ili pretežno kemijskim procesima.

Naime, uz neke izuzetke, potpostrojenja se mogu općenito razvrstati u potpostrojenja za pripremu reakcijskih smjesa, potpostrojenja za provedbu kemijskih reakcija (reakcijska

potpostrojenja, reaktore) i potpostrojenja za separaciju sastojaka iz smjese proizvoda. Osnovna je svrha potpostrojenja iz prve od tih skupina dovođenje reakcijskih smjesa u potrebno stanje, npr. zagrijavanjem ili hlađenjem, tlačenjem ili vakuumiranjem, dotjerivanjem sastava, čišćenjem i promjenom faze. U reakcijskim potpostrojenjima sirovine se konvertiraju u proizvode. Osnovna svrha potpostrojenja iz treće skupine može biti izdvajanje neželjenih proizvoda, čišćenje, koncentriranje i, također, promjena faze proizvoda.

Prema toj klasifikaciji, izuzevši reakcijska potpostrojenja, sva ostala potpostrojenja procesne tehnike služe za provođenje fizikalnih operacija. Danas se one, namjesto jediničnih akcijama kao u početku, najčešće nazivaju *jediničnim operacijama*. Operacije koje se provode u reakcijskim potpostrojenjima najčešće se nazivaju *jediničnim procesima*, ponekad jediničnim kemijskim promjenama, konverzijskim procesima.

Ipak, strogo gledano, takvu definiciju jediničnih operacija treba uzeti s rezervom, jer njihovi fizikalni učinci, koji su njihova glavna svrha, mogu biti povezani i sa (sporednim) kemijskim promjenama sustava. Tako se, npr., pod apsorpcijom plinova, koja je tipična jedinična operacija, razumijeva uklanjanje nekog plina iz plinske smjese, bez obzira da li se to postiže fizikalnim otapanjem ili kemijskom reakcijom s otapalom. Zbog toga je možda najprikladnije jedinične operacije definirati manje određenom definicijom, tj. kao procesne korake koji se odvijaju bez znatne pretvorbe tvari.

Jedinične operacije i procesi najvažnije su područje procesne tehnike, ali njihovo poznavanje nije dovoljno i za ostvarenje nekog kemijskog procesa gradnjom za to potrebnog postrojenja. Tako u razvoju procesa mogu biti potrebna istraživanja neprovedljiva bez poznavanja fundamentalne kemije i vladanja vještinama eksperimentiranja u tom području. Od neke faze razvoja procesa, obično konstrukcije procesnog postrojenja, potrebna je, nadalje, i primjena strojarških, a kasnije i drugih tehničkih, osobito građevnih disciplina, a za uspješnu komercijalizaciju zamisli nekog kemijskog procesa potrebna je i primjena društvenih znanosti (ekonomija, sociologija).

Zbog toga su granična područja procesne tehnike s drugim strukama vrlo široka, a za obavljanje poslova u njenoj oblasti potrebni su različito specijalizirani kadrovi. Tako je, npr., od inženjera kemije u SAD ~30% zaposleno na istraživanjima u razvoju procesa, približno isto toliko u proizvodnji i održavanju proizvodnih postrojenja, ~15% u njihovu projektiranju, ~10% u upravljanju tvornicama, a ostatak na različitim drugim poslovima (tehničko-komercijalnim, tehničko-upravnim, organizacijskim).

JEDINIČNE OPERACIJE

U svojoj prvoj specifikaciji A. D. Little je naveo dvanaest jediničnih akcija: pulverizaciju, miješanje, grijanje, prženje, apsorpciju, kondenzaciju, luženje, precipitaciju (taloženje), kristalizaciju, filtraciju, otapanje, elektrolizu. (Dakako, prema navedenoj suvremenoj definiciji elektroliza se, kao proces u kojemu je bitna pretvorba tvari, više ne ubraja u jedinične operacije, već u jedinične procese.) Zbog velike raznorodnosti tih akcija, usprkos njihovu malom broju, njihovo klasiranje i integriranje njihovih znanstvenih osnova jedinstvenim pristupom, potrebno za ujedinjavanje u savsm cjelovitu disciplinu, već je tada bilo očito neprovedljivo, pa je tradicionalno prikazivanje jediničnih operacija dugo bilo manje ili više samo skup teoretskih i praktičnih informacija posebno za svaku pojedinu operaciju. Teškoće u klasifikaciji i integraciji jediničnih operacija kasnije su se još povećale uvođenjem novih i još raznorodnijih procesnih koraka. Ipak, usprkos tome, iako malobrojne, oskudne i međusobno slabo povezane, zajedničke bazične koncepcije jediničnih operacija omogućile su postizanje djelomičnog uspjeha u tom ujedinjavanju.

Iako ni danas broj jasno ocrtanih jediničnih operacija nije osobito velik, uvjeti njihova izvođenja, osobito temperatura, tlak i agresivnost sredina sustava koji se procesiraju, čine njihovu primjenu vrlo složenom.

Klasifikacija jediničnih operacija

Klasifikacija jediničnih operacija može se provesti s različitih gledišta. Zbog toga što se jedinične operacije većinom odvijaju različitim istodobnim fizikalnim procesima, često se smatra da je pri klasifikaciji najprikladnije zanemariti metode jednoznačnih sistematika, pa definirati nekoliko njihovih glavnih skupina na osnovi drugih kriterija i, zatim, dalje svrstavati operacije prema agregatnom stanju tvari koje se prerađuju. U jednoj od dosta uobičajenih klasifikacija jedinične se operacije svrstavaju u operacije sjedinjavanja (u smislu miješanja), razdvajanja (separacije), razdjeljivanja (u smislu smanjivanja čestica materijala), aglomeracije (koalescencije čestica materijala), oblikovanja, prijelaza i prijenosa topline, transporta materijala, te skladištenja.

Budući da se većina proizvoda kemijske i srodnih industrija ambalažira, ponekad se i operacije ambalažiranja (v. *Ambalaža*, TE 1, str. 250) promatraju kao jedinične operacije. Međutim, to nije dovoljno opravdano, jer ambalažiranje pretežno obuhvaća operacije drugih područja proizvodne tehnike. (Ponekad je ambalažiranje razmjerno složen proces, sastavljen od operacija koje se obavljaju na specijaliziranim strojnim linijama, kao npr. ambalažiranje živežnih namirnica u limenke, u povratnu staklenu ambalažu, u posude od polimernih materijala koje se izrađuju od folija na licu mjesta.)

Ipak je možda korektnije, barem djelomično, klasificirati jedinične operacije prema učinku na faze sustava koji se procesira, izdvojivši posebno važne operacije prijenosa tvari iz skupina operacija sjedinjavanja i razdvajanja u zasebnu skupinu. (Pri tom se pod fazom razumijeva homogeni dio mehanički izdvojiv iz sustava.)

Osim na tim principima, pokušavalo se, među ostalim, klasificirati jedinične operacije prema analogijama među aparaturnama koje služe za njihovu provedbu, prema matematičkim modelima za opis pojave koje se događaju u njima, prema elementarnim procesima i fizikalnom mehanizmu koji u njima prevladava.

Metode klasifikacije jediničnih operacija često se kombiniraju da bi se dobila što bolja osnova za logičko i organizirano proučavanje. Međutim, ne može se stvoriti osnova za zajednički pristup proučavanju svih jediničnih operacija, pa se mnoge od njih ipak moraju proučavati izdvojeno.

Operacije prijelaza tvari mogu se svrstati u tri skupine: A, B i C. U skupinu A svrstavaju se operacije prijelaza tvari kroz graničnu površinu dviju faza u istom agregatnom stanju, ali koje se ne miješaju jedna s drugom. U skupinu B svrstavaju se operacije za prijelaz tvari između dviju faza u istom agregatnom stanju koje se miješaju, ali su razdvojene jedna od druge nekom propusnom ili polupropusnom membranom. Zbog toga se često nazivaju i membranskim operacijama. Međutim, danas postoje i membranske operacije kojima se procesiraju i sustavi faza u različitim agregatnim stanjima. U skupinu C svrstavaju se operacije prijelaza tvari između dviju faza u istom agregatnom stanju koje se miješaju jedna s drugom i koje su u izravnom kontaktu.

Od šest teorijski mogućih kombinacija plinske (G), kapljevite (L) i čvrste (S) faze, tj. sustava faza GG, GL, GS, LL, LS i SS, operacijama prijelaza tvari skupine A (tabl. 1) procesiraju se samo četiri (GL, GS, LL i LS).

Operacije prijelaza tvari u sustavu faza GG nisu moguće u skupini A zbog toga što se plinovi potpuno miješaju jedan s drugim, a u sustavu faza SS prijelaz tvari općenito nije ekonomično provedljiv zbog prevelike sporosti tog procesa u čvrstom stanju.

Operacije prijelaza tvari kojima se procesiraju sustavi faza GL (plinovito kapljevito ili parno kapljevito) općenito su povezane s jakim prijelazom i prijenosom topline.

Operacije pri kojima su u tom sustavu u objema fazama prisutne velike količine sviju njegovih sastojaka općenito se nazivaju *destilacijom* (v. *Destilacija*, TE 3, str. 232). Da bi se destilacijom ostvario prijelaz sastojaka sustava, među fazama mora postojati temperaturni ili koncentracijski gradijent. Ako se neka hlapljiva otopina parcijalno isparuje grijanjem, dobivaju se faza G i rezidualna faza L, koje sadrže sve sastojke sustava, ali im je kvantitativni sastav različit od kvantitativnog sastava faze L prije toga. Tom promjenom sastava hlapljivi se sastojci sustava koncentriraju u fazi G, a manje hlapljivi u rezidualnoj fazi L. Ako se destilacija vodi kontaktiranjem nekih para s kapljevnom različitog sastava, među fazama G i L uspostavlja se nova raspodjela sastojaka

sustava i simultano prijelaz topline pretežno uzrokovan promjenom agregatnog stanja tvari. Ta se operacija naziva *rekifikacijom* (v. *Rektifikacija*).

Destilacija u smislu jedinične operacije obuhvaća i ukapljivanje (kondenzaciju). Inače se pod kondenzacijom razumijeva operacija s mehanizmom suprotnim od opisanoga.

Operacije prijelaza tvari u sustavu GL, pri kojima nisu svi sastojci prisutni i u jednoj i u drugoj fazi, mogu se opet svrstati u tri skupine: jednu, u kojoj je faza G čista tvar ili se smije smatrati takvom, drugu, u kojoj je to faza L, i treću, u kojoj su neki od sastojaka prisutni i u fazi G i u fazi L.

Prvi od tih slučajeva obuhvaća samo jednu operaciju, *isparivanje* (v. *Isparivanje*, TE 6, str. 540), koja se obično upotrebljava za koncentriranje otopina prijelazom otapala u fazu G. Češće se izvodi pod utjecajem temperaturnog gradijenta (*ključanjem*) nego koncentracijskog gradijenta (*ishlapljivanjem*). Za nju su često važniji mehanizmi prijenosa topline iz okoliša u sustav nego mehanizmi prijelaza tvari, pa je u tabl. 1 navedena u zagradama. Uvjet za provedljivost isparivanja jest dovoljno velika razlika napona para otapala i soluta (v. *Otopine*, TE 10, str. 57) da se ključanjem ili ishlapljivanjem mogu dobiti čista faza G (čisto otapalo) i rezidualna faza L (koncentrat).

(grijanjem faze L, odnosno smanjenjem tlaka u sustavu, pri čemu nastupaju mehanizmi slični mehanizmima isparivanja). Međutim, pod desorpcijom plinova kao operacijom suprotnom apsorpciji plinova razumijeva se samo *stripovanje* (v. *Apsorpcija plinova*, TE 1, str. 332), tj. uspostavljanje kontakta između otopine nekog plina i struje nekog drugog plina, pri čemu otopljeni plin prelazi iz faze L u fazu G.

Operacija prijelaza tvari kojom se procesira sustav faza GS, pri čemu se svi njegovi sastojci nalaze i u jednoj i u drugoj njegovoj fazi, naziva se *frakcijskom sublimacijom* (v. *Sublimacija*).

U užem smislu pod sublimacijom se razumijeva razvijanje para koje prelaze u fazu G izravno iz čvrste tvari, obično smjese ili čvrste otopine, pri tom zvane sublimandom, također pod utjecajem temperaturnog ili koncentracijskog gradijenta. Sublimacija kao operacija obuhvaća i njoj suprotnu operaciju *kondenzaciju* (*desublimaciju*) tih para na odvojenom mjestu, sa svrhom da se proizvod sublimacije, sublimat, odvoji od rezidualne faze S. Dakako, i za sublimaciju je potrebno da napon para sublimata bude dovoljno veći od napona para rezidualne faze S.

Prema tome, sublimacija je posve analogna destilaciji, pa pod navedenim uvjetima omogućuje da se sukcesivnim

Tablica 1
SKUPINA A JEDINIČNIH OPERACIJA PRIJELAZA TVARI

Faza		Svi su sastojci prisutni u objema fazama	Nisu svi sastojci prisutni u objema fazama		
1	2		Faza 1 je čista	Faza 2 je čista	Sastojci su raspoređeni među fazama
G	L	destilacija ukapljivanje	(isparivanje)	vlaženje sušenje	apsorpcija desorpcija
G	S	frakcijska sublimacija	(sublimacija)	(kondenzacija)	adsorpcija desorpcija sušenje
L	L	ekstrakcija			ekstrakcija
L	S	frakcijska kristalizacija iz taline		otapanje kristalizacija	luženje izmjena iona adsorpcija

Drugi je slučaj kad čista faza L obuhvaća operacije vlaženja i sušenja plinova. Pod prvom se razumijeva prijelaz tvari iz neke kapljevine u paru i time u fazu G, a pod drugom suprotan proces. Vlaženje plinova je, među ostalim, vrlo važno za industrijsko hlađenje vode u tzv. rashladnim tornjevima, odvođenjem topline iz nje parcijalnim isparivanjem u dovoljno suhom zraku da se osigura za taj proces potreban koncentracijski gradijent među fazama. Sušenje plinova vrlo je važno u sustavima za kondicioniranje zraka. Principi tog sušenja vrijede i u rekuperaciji otapala iz njihovih para u zraku ukapljivanjem. Operacije sušenja i vlaženja plinova jasno se razlikuju od drugih operacija prijelaza tvari u sustavu GL samo ako njegova plinska komponenta ne prelazi, ili barem ne prelazi u znatnim količinama, u fazu L.

Treći slučaj operacija prijelaza tvari skupine A u sustavu faza GL, kad nisu svi njegovi sastojci prisutni i u jednoj i u drugoj fazi, obuhvaća operacije *apsorpcije* i *desorpcije* plinova (v. *Apsorpcija plinova*, TE 1, str. 324). Pod apsorpcijom se razumijeva uspostavljanje kontakta smjese dvaju ili više plinova i otapala u kojemu je topljivost samo jednoga od tih plinova u tom otapalu velika, te prijelaz tvari koji je omogućen tim dodirima. Tim se procesom u fazi L otapa znatna količina vrlo topljivog plina i, u usporedbi s njom, zanemarljiva količina drugog ili drugih plinova iz smjese. Isto tako je u usporedbi s količinom otopljenog plina zanemarljivo mala i količina otapala koja dospijeva u fazu G u parnom stanju. Prema tome, praktički se samo jedna komponenta sustava raspoređuje među njegovim fazama.

Desorpcija plinova iz otopine (treba je dobro razlikovati od desorpcije s adsorbata) može se provesti na nekoliko načina, npr. uspostavljanjem potrebnoga temperaturnog, odnosno koncentracijskog gradijenta među fazama L i G

kontaktima faza iz sublimanda dobije rezidualna faza S obogaćena manje hlapljivim i sublimat obogaćen hlapljivijim sastojcima sustava.

Međutim, zbog teškoća u praktičnoj provedbi frakcijska se sublimacija malo primjenjuje. Više se upotrebljava sublimacija pri kojoj je faza G čista tvar. Njoj suprotna operacija jest desublimacija, kojom se dobiva čista faza S kao kondenzat. Najvažnija operacija u toj skupini jest tzv. *liofilizacija* (v. *Konzerviranje hrane*, TE 7, str. 278), kojom se na niskim temperaturama i pod vrlo sniženim tlakom prerađuju sublimandi sa sastojcima podložnim raspadu ili promjenama na višim temperaturama. U tabl. 1 te su operacije također navedene u zagradama, jer su iz sličnih razloga kao i pri isparivanju i za njih često važniji mehanizmi prijenosa topline.

Operacije prijelaza tvari u sustavu faza GS kad ni jedna od tih faza nije čista, ali su samo neki njegovi sastojci raspoređeni među fazama, jesu *adsorpcija* (v. *Adsorpcija*, TE 1, str. 1) i *desorpcija plinova*, te *sušenje čvrstih tvari*. Pod adsorpcijom plinova razumijeva se prijelaz para iz neke plinske smjese (faze G) na graničnu površinu neke čvrste tvari (adsorbenta) kad se uspostavi kontakt tih faza, čime nastaje nova faza S (adsorbat). Iako se adsorpcija u sustavu faza GS zasniva na istim principima kao i općenito adsorpcija fluida, treba je razlikovati od adsorpcije u sustavu faza LS. Adsorpcija plinova kao operacija obično obuhvaća i desorpciju plinova, jer je to proces suprotan adsorpciji potreban za regeneraciju adsorbenta. Osim što tu vrstu desorpcije plinova treba razlikovati od desorpcije u sustavu faza GL, treba je, kao i adsorpciju plinova, razlikovati od odgovarajućih procesa u sustavu faza LS.

Za razliku od desorpcije plinova s adsorbata u sustavu faza GS, sušenje čvrstih tvari u tom sustavu faza (obično u

struji nekog suhog plina) odvija se uz promjenu stanja (prijelaz tvari iz kapljevine sadržane u fazi S isparivanjem u fazu G, koji je asociran s mnogo većim prijelazom topline). U ostalim pojedinostima principi tih dviju operacija međusobno su jednaki.

Ekstrakcija (v. *Ekstrakcija*, TE 3, str. 537) jedina je među operacijama prijelaza tvari skupine A u sustavu LL. Sustav u kojemu je provedljiva ekstrakcija mora imati najmanje dvije komponente koje se međusobno ne miješaju, ili barem koje se ne miješaju potpuno, i barem jednu (solut) koja je više topljiva u jednoj nego u drugoj od time formiranih faza. Pri tom se solut ili soluti očito raspoređuju u svim fazama sustava, pa pri ekstrakciji nema čistih faza i preostaju samo slučajevi kad su sve komponente prisutne u svim fazama, ili su to samo neke. Međutim, principi provedbe ekstrakcije u tim se slučajevima ne razlikuju.

Operacije prijelaza tvari u sustavu faza LS pri čemu su svi njegovi sastojci prisutni u svim njegovim fazama nazivaju se *frakcijskom kristalizacijom iz taline* (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 361). Pod tim se razumijeva hlađenje neke kapljevite smjese (ne otopine) kojim nastaju faze S i L tako da im se sastavi razlikuju i jedan od drugoga i od sastava smjese prije hlađenja. Pri tom se prijelaz nekog sastojka sustava iz faze L u fazu S odvija ne samo pod utjecajem temperaturnoga već i koncentracijskog gradijenta. Svojim specifičnostima donekle se iz te skupine operacija izdvaja tzv. *zonalno taljenje* (v. *Galij*, TE 6, str. 4; v. *Germanij*, TE 6, str. 127).

Pri prijelazu tvari u sustavu LS, kad nisu svi njegovi sastojci prisutni u svim fazama, samo faza S može biti čista. To obuhvaća operacije *otapanja* i *kristalizacije iz otopine* (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 360). Prvom operacijom čiste tvari ili smjese prelaze iz faze S u fazu L, kojoj se time mijenja sastav. Kristalizacija je operacija suprotna otapanju. Time se iz prezasićenih otopina izlučuju soluti u kristalnom obliku.

Osim kristalizacije soluta ponekad je moguća kristalizacija otapala iz otopina. Operacija za provedbu tog procesa naziva se *izmrzavanjem*. Izmrzavati se mogu otopine koje tvore eutektik bez nastajanja čvrstih otopina, npr. bočate i slane vode radi dobivanja vode za piće, voćni sokovi radi koncentriranja (v. *Konzerviranje hrane*, TE 7, str. 276).

tih sustava kao tvorevina od faza koje se procesiraju, a membrana kao graničnih površina koje ih razdvajaju.

U membranske operacije u sustavu faza GG svrstavaju se *operacije plinske permeacije, plinska difuzija i plinska efuzija* (v. *Difuzija*, TE 3, str. 299), u sustavu GL *isparivanje kroz membrane, pervaporacija* (v. *Membrane*, TE 8, str. 381). Brojnije su membranske operacije u sustavu faza LL. To su *dijaliza* (v. *Dijaliza*, TE 3, str. 338), *elektrodijaliza* (v. *Elektrodijaliza*, TE 4, str. 337), operacije membranske filtracije (v. *Membrane*, TE 8, str. 381), kao što su *ultrafiltracija* (v. *Ultrafiltracija*), *reverzna osmoza*, *mikrofiltracija* i *piezodijaliza*.

Najveća teškoća u izvođenju operacija prijelaza tvari iz skupine C jest održavanje koncentracijskih gradijenata bez miješanja faza sustava. Zbog toga se rjeđe upotrebljavaju u industrijskoj praksi. Za separaciju plinova iz njihovih smjesa, dakle operacije u sustavu faza GG, ponekad se upotrebljava *termička difuzija* (v. *Difuzija*, TE 3, str. 311), *centrifugiranje* ili *vrtožna*, odnosno *mlazna difuzija* (v. *Difuzija*, TE 3, str. 312). Termička difuzija ponekad se primjenjuje i u sustavu faza LL.

Operacije sjedinjivanja i razdvajanja. Granice skupine jediničnih operacija sjedinjivanja (tabl. 2) mogu biti nejasne ne samo prema skupini operacija prijelaza tvari (koje su zbog toga navedene u zagradama) nego i prema operacijama razdjeljivanja zbog dvoznačnosti procesa, već prema tome da li se promatra s gledišta njegova produkta ili tvari od kojih nastaje produkt. (S posljednjeg su gledišta to operacije razdjeljivanja.)

Operacije sjedinjivanja koje se provode prijenosom količine gibanja mogu se općenito opisati kao miješanje (v. *Miješanje*, TE 8, str. 526). Tako se plinovi sjedinjuju u plinske smjese miješanjem pomoću sapnica (slobodnih ili ugrađenih u kanale, injektore, komore). Ubrizgavanjem plinova kroz sapnice također se raspršuju rasuti čvrsti materijali primjerenih dimenzija i gustoće čestica, pa se dobivaju sustavi faza GS različitih svojstava. U suvremenoj procesnoj tehnici od tih su sustava najvažniji oni koji se ponašaju slično fluidima. Zbog fluidnosti tih sustava operacije kojima se oni dobivaju općenito se nazivaju fluidizacijom (v. *Fluidizacija*, TE 5, str.

Tablica 2
OPERACIJE SJEDINJIVANJA U RAZLIČITIM SUSTAVIMA FAZA

GG	GL	GS	LL	LS	SS
Miješanje plinova	(Apsorpcija) (Zasićivanje)	(Adsorpcija) Rasprašivanje	Emulgiranje (Miješanje kapljevina)	Miješanje Gnjetenje	Miješanje čvrstih tvari
	Raspršivanje Raspjenjivanje			Kvašenje Suspenderanje (Otapanje)	Slijevanje

U oblasti prijelaza tvari u sustavu faza LS, kad su neki od njegovih sastojaka prisutni i u jednoj i u drugoj njegovoj fazi, moguće su tri jedinične operacije: *luženje* (v. *Luženje*, TE 7, str. 572), *izmjena iona* (v. *Izmjena iona*, TE 6, str. 576) i već spomenuta *adsorpcija* analoga adsorpciji u sustavu faza GS. Isto tako, iako pri luženju soluti prelaze iz faze S u fazu L, a ne između dviju kapljeviti faza, analogija tog procesa i ekstrakcije dovoljno je velika za primjenu vrlo sličnih principa u njenu opisivanju i provedbi. I mehanizmi kemijske reakcije bitne za izmjenu iona (dvostruke izmjene iona između elektrolita u fazi L i izmjenjivača iona u fazi S) i kemisorpcije također su dosta slični, pa je i u teorijskoj i praktičnoj razradi tih operacija također moguće primijeniti neke zajedničke principe.

Osnovna principijelna razlika među operacijama iz skupine A i membranskih operacija samo je u tome što se u posljednjima prijelaz tvari ne odvija kroz graničnu površinu faza sustava koji se procesira, već kroz nove faze (v. *Membrane*, TE 8, str. 381). Međutim, za mnoge svrhe pri opisivanju smiju se promjene tih novih faza zanemariti. Tako i pri klasifikaciji jediničnih operacija zadovoljava predodžba

487). Primjena fluidizacije vrlo je raznolika. Osim što se upotrebljava kao pomoćna operacija u provođenju različitih operacija prijelaza tvari ili topline, razdvajanja i transporta tvari, danas je sve važnija i u provođenju mnogih jediničnih, osobito katalitičkih jediničnih procesa.

Plinovi i kapljevine sjedinjuju se u disperzije kapljevina u plinu (npr. *aerosoli*), odnosno plina u kapljevinama (*pjene*; v. *Pjene i aerosoli*, TE 10, str. 289) pomoću rotacijskih sapnica i brzohodnih miješalica ili na način sličan onome koji se primjenjuje prilikom miješanja plinova i rasprašivanja. Sapnicama i miješalicama sjedinjuju se u smjese i kapljevine koje se međusobno miješaju, odnosno u *emulzije* (v. *Emulgiranje*, TE 5, str. 313) kapljevine koje se međusobno ne miješaju. Operacije sjedinjivanja kapljevina i čvrstih tvari u smjesi glavno su područje primjene miješalica. Čvrste tvari sjedinjuju se u smjese miješalicama s bubnjevima, ili *slijevanjem* (npr. u priređivanju legura).

Operacije razdvajanja (tabl. 3) koje preostaju nakon izlučivanja operacija prijelaza tvari (također navedenih u zagradama) mogu se dalje svrstati u nekoliko podskupina. Jednu od tih čine operacije koje se odvijaju pod utjecajem

Tablica 3
OPERACIJE RAZDVAJANJA IZ RAZLIČITIH SUSTAVA FAZA

Sustav	Operacija
GG	(Difuzijske operacije), centrifugiranje
GL	(Desorpcija), (adsorpcija), (kondenzacija), sedimentacija, ispiranje, cikloniranje, električna separacija
GS	(Desorpcija), (sušenje), sedimentacija, ispiranje, filtracija, cikloniranje, centrifugiranje, klasiranje, električna separacija
LL	(Destilacija), (ekstrakcija), (membranske operacije), stratifikacija, centrifugiranje
LS	(Luženje), (sušenje), sedimentacija, dekantiranje, flotacija, filtracija, cikloniranje, centrifugiranje, isprešavanje, prosijavanje, klasiranje, električna separacija, magnetska separacija
SS	(Sublimacija), (frakcijska kristalizacija), prosijavanje, probiranje, električna separacija, magnetska separacija

gravitacije (*operacije gravitacijske separacije*). Prije svega to su operacije odjeljivanja (stratifikacije), sedimentacije i flotacije.

Pod *stratifikacijom* razumijeva se separacija slojeva različite gustoće u sustavima kapljeviti faza koje se ne miješaju i različite su gustoće, tako da se slojevi mogu odvojiti jedan od drugoga ispuštanjem iz prikladne posude.

Operacije *sedimentacije* (v. *Sedimentacija*) obuhvaćaju taloženje kapljevina iz disperzija u plinovima, te čvrstih tvari iz njihovih suspenzija u plinovima i kapljevinama. U sustavima GS to su uglavnom *operacije gravitacijskog i udarnog otprašivanja plinova* (v. *Čišćenje plinova*, TE 3, str. 118). Donekle je operacijama udarnog otprašivanja slično i *ispiranje plinova* (v. *Čišćenje plinova*, TE 3, str. 126).

Sedimentacija je u sustavima faza LS više ili manje važan proces u mnogim jediničnim operacijama. Ipak, u užem značenju pod sedimentacijom u tim sustavima razumijeva se samo već navedeno gravitacijsko taloženje. Već prema svrsi pri tom, tj. da li je to dobivanje koncentrata čvrstih tvari ili kapljevina iz kojih su uklonjene te tvari, razlikuju se sedimentacijske *operacije ugušćivanja i izbistrivanja*. Operacije sedimentacije u sustavima faza LS usko su povezane s *dekantiranjem*, tj. odvajanjem kapljevine od taloga nakon taloženja.

U skupinu operacija sedimentiranja u sustavima LS mogu se ubrojiti i *operacije gravitacijskog vrhnjenja*. U principu se te dvije operacije razlikuju samo smjerom gibanja. Pri gravitacijskom vrhnjenju ono namjesto taloženja rezultira izlučivanjem čvrste tvari na površini (ako je gustoća te tvari manja od gustoće kapljevine).

Za razliku od sedimentacije, *flotacija* je (v. *Flotacija*, TE 5, str. 460) operacija razdvajanja čvrstih faza taloženjem i vrhnjenjem u kapljevinu kojoj je gustoća manja od gustoće tih faza. Pri tom se uvjeti potrebni za vrhnjenje stvaraju agregiranjem mjehurića zraka dispergiranih u kapljevinu s česticama faza koje treba izlučiti na površini. (Za to potrebna priprema obuhvaća regulaciju napetosti granične površine zraka, vode i faza koje treba izlučiti na površini tenzidima.)

Budući da se flotacija najviše upotrebljava za dobivanje koncentrata ruda, često se svrstava u skupinu operacija oplemenjivanja mineralnih sirovina. To su operacije koje se provode pod utjecajem različitih sila, pa je među njima malo sličnosti. U nekima od njih, tzv. *operacijama gravitacijske koncentracije* (v. *Gravitacijska koncentracija*, TE 6, str. 265), osobito je važno djelovanje gravitacije, pa se ponekad također promatraju kao operacije gravitacijske separacije. Obično su to operacije u sustavima faza LS gdje je faza L voda ili se namjesto nje upotrebljavaju druge suspenzije, pa se tada obično nazivaju operacijama taloženja u gustim sredinama. Rjeđe se upotrebljavaju operacije gravitacijske koncentracije u sustavima GS (operacije pneumatske koncentracije). Međutim, obično se uzima da je sustavno samo promatranje operacija gravitacijske koncentracije kao *klasiranje* (v. *Klasiranje*, TE 7, str. 130).

I operacije *filtracije* (v. *Filtracija*, TE 5, str. 398) obično se svrstavaju u operacije gravitacijske separacije. Strogo uzevši, to nije sasvim opravdano, jer se često filtrira pod utjecajem pretlaka ili podtlaka, a mehanizmi su filtracije dosta slični mehanizmima prosijavanja (zadržavanje suspendiranih čestica suženjima u smjeru strujanja). Međutim, iako različiti intenzitetom, učinci gravitacije, pretlaka i podtlaka pri filtraciji sasvim su analogni. Operacije filtracije najviše se upotrebljavaju za razdvajanje sustava faza LS, rjeđe za razdvajanje sustava faza GS, kao npr. u mehaničkim filtrima za plinove (v. *Čišćenje plinova*, TE 3, str. 124).

Operacijama gravitacijske separacije mehanizmom su analogne jedinične operacije razdvajanja centrifugalnim silama. S obzirom na djelovanje sila pod kojima se odvijaju, te se dvije skupine operacija razlikuju samo time što se posljednjima mogu postići mnogostruko veći učinci. Prema načinu izlaganja sustava koji se procesira djelovanju centrifugalne sile u toj se skupini razlikuju operacije cikloniranja i centrifugiranja. Pod *cikloniranjem* se u užem smislu razumijevaju operacije taloženja čvrstih tvari iz njihovih suspenzija u plinovima *centrifugalnim otprašivačima*, tzv. *ciklonima* (v. *Čišćenje plinova*, TE 3, str. 119). U širem smislu cikloniranje obuhvaća i taloženje čvrstih tvari iz njihovih suspenzija u kapljevinama ciklonima koji se nazivaju *hidrociklonima*. Iako su centrifugalni učinci postizljivi ciklonima još uvijek razmjerno maleni, zbog jednostavnosti konstrukcije tih aparata i procesa u njima cikloniranje se mnogo upotrebljava ne samo za otprašivanje nego i za klasiranje velikih količina grubih materijala (v. *Klasiranje*, TE 7, str. 139) u preradbi mineralnih sirovina.

Mnogo veći centrifugalni učinci postizljivi su *centrifugiranjem* (v. *Centrifugiranje*, TE 2, str. 590). Zbog visoke dotjeranosti za to potrebnih postrojenja centrifugiranje je prikladno za finije separacijske operacije. Najviše se upotrebljava za provedbu sedimentacijskih i filtracijskih procesa. Već prema toj primjeni razlikuju se operacije sedimentacijskog i filtracijskog centrifugiranja. Pri tom se pod sedimentacijskim centrifugiranjem razumijeva i stratifikacija u sustavima faza LL i taloženje, odnosno vrhnjenje u sustavima faza LS centrifugama različite konstrukcije. U posljednje vrijeme razvijaju se i operacije separiranja plinskih smjesa centrifugiranjem (v. *Difuzija*, TE 3, str. 312), a i operacije centrifugiranja pri pneumatskom klasiranju (v. *Klasiranje*, TE 7, str. 139, 140).

Često se veliki dio operacija razdvajanja svrstava u skupinu operacija mehaničke separacije. Ni granice te skupine jediničnih operacija nisu sasvim jasno određene. Obično se pod tim razumijevaju sve već navedene operacije razdvajanja, te *isprešavanje* (v. *Isprešavanje*, TE 6, str. 573), i *operacije klasiranja*.

Klasiranje je također dvoznačan pojam. Strogo uzevši, to je razvrstavanje čestica neke rasute čvrste faze prema obliku i dimenzijama. Međutim, pod klasiranjem se često razumijeva još i razvrstavanje višefaznih rasutih čvrstih tvari prema sutaložnosti njihovih čestica, pa prema tome i neke operacije sortiranja.

Među operacijama klasiranja bitno se razlikuju operacije prosijavanja i operacije klasiranja u fluidima. Pod *prosijavanjem* (v. *Klasiranje*, TE 7, str. 131) razumijeva se razdvajanje rasutih materijala sitima, ali pri tom treba razlikovati vrlo važno tzv. *klasifikacijsko prosijavanje* (prosijavanje radi klasiranja u navedenom strogom značenju) od manje važnog *sortiranja prosijavanjem* (razdvajanja različitih sastojaka smjesa, kao npr. slame od zrna u vršalicama).

Klasiranje u fluidima može se formalno podijeliti na operacije klasiranja prema sutaložnosti u struji neke kapljevine (obično vode), ili nekog plina (obično zraka). Te se operacije često nazivaju *hidrosepariranjem*, odnosno *pneumatskim klasiranjem*.

Ostale operacije razdvajanja svrstavaju se u operacije probiranja, operacije električne i operacije magnetske separacije. Najstarije su operacije probiranja mineralnih sirovina. U početku su se provodile ručno. *Ručno probiranje* ponegdje se zadržalo i do danas, npr. u sortiranju mineralnih sirovina

na trakama. Za suvremene operacije sortiranja probiranjem upotrebljavaju se aparati sa separacijskim sklopovima koji se kibernetički dirigiraju uređajima za utvrđivanje intenziteta nekog svojstva kojim se korisni sastojci tih sirovina dovoljno razlikuju od svojstava nekorisnih sirovina, te za preradb u informacije u komandu izvršnom organu. To mogu biti jakost reflektiranog svjetla, električna vodljivost, prirodna ili inducirana radioaktivnost, pa se, već prema tome, govori o *optičkom, električnom, radiometrijskom probiranju*. Pri tom treba jasno lučiti električno probiranje od operacija električne separacije u kojima se za razdvajanje izravno iskorišćuju prirodna ili inducirana električna svojstva faza.

Za provođenje električne separacije uglavnom se iskorišćuju elektrostatičke sile. Te operacije obuhvaćaju *elektrostatičko otprašivanje plinova* (v. *Čišćenje plinova*, TE 3, str. 121) i brojne druge elektrostatičke operacije (v. *Elektrostatičke operacije*, TE 5, str. 43), neke *elektroforetske (elektrokinetičke) operacije* (v. *Elektrokinetičke operacije*, TE 4, str. 397) i *električno sortiranje* u sustavima faza SS. Osnovni princip provođenja operacija iz posljednje od tih skupina jest mijenjanje naboja čestica faza njihovim izlaganjem djelovanju električnih polja, ili elektrotermičkim, odnosno piezoelektričnim učincima, pa razdvajanjem tako dobivenih različito nabijenih čestica pomoću različitih suprotno nabijenih tijela (elektroda, valjaka).

Operacije *magnetske separacije* (v. *Magnetska separacija*, TE 7, str. 639) najviše se upotrebljavaju za izdvajanje korisnih sastojaka iz ruda željeza, a dosta i za čišćenje sirovina industrije mangana, stakla, porculana i glinenih proizvoda od minerala željeza, te kao pomoćni procesi u nekim operacijama gravitacijske separacije u gustim sredinama, pa se u praksi obično promatraju kao operacije oplemenjivanja mineralnih sirovina. Međutim, operacije se magnetske separacije mnogo upotrebljavaju i za čišćenje poljoprivrednih proizvoda, osobito u preradbi zrnja (npr. žitarica, sirovine u industriji ulja).

Operacije *razdjeljivanja* obuhvaćaju sitnjenje čvrstih i raspršivanje kapljevityh sustava. Glavne operacije sitnjenja jesu drobljenje i mljevenje. Druge se operacije sitnjenja čvrstih tvari mnogo manje upotrebljavaju. Jedina moguća operacija razdjeljivanja kapljevityh sustava jest raspršivanje, ali to je isto što i već spomenuto sjedinjivanje kapljevina i plinova u disperzije.

Pod *drobljenjem* (v. *Drobljenje*, TE 3, str. 395) obično se razumijeva sitnjenje čvrstih materijala do dimenzija čestica manjih od 5 mm, a pod *mljevenjem* (v. *Mljevenje*, TE 8, str. 621) dobivanje finog praha. Međutim, mljevenje obuhvaća i operacije sitnjenja čvrstih materijala i u kapljevina. To tzv. mokro mljevenje služi za različite svrhe (npr. mljevenjem ruda u vodenoj suspenziji postižu se neke prednosti u usporedbi sa suhim mljevenjem, a mljevenjem različitih tvari u viskoznom kapljevina dobivaju se mnogi proizvodi koji moraju biti vrlo fine suspenzije, npr. naliči). Zbog upotrebe mokrrog mljevenja za dobivanje suspenzija smije se ono promatrati i kao sjedinjivanje. (Neke operacije tog mljevenja nazivaju se i homogeniziranjem.)

Pod mlinovima obično se razumijevaju strojevi koji lome čestice mliva tlačnim ili udarnim nepreznjima što ih uzrokuju površine nekih rotacijskih ili slobodnih (s pogonskim sklopovima nevezanih) tijela. Međutim, žilavi i vlaknasti materijali ne mogu se sitniti tim strojevima.

Žilavi materijali (npr. umjetne smole, guma, koža) mogu se sitniti rezanjem. Za to služe strojevi sa statorima i rotorima opskrbljenim noževima. Vlakna iz vlaknastih sirovina dobivaju se kidanjem. Statori i rotor strojeva koji služe za to koncentrični su bubnjevci s noževima na radnim površinama konstruiranim tako da ne režu, već samo razdvajaju vlakna.

Operacije *aglomeriranja* mogu se svrstati u operacije *granuliranja, briketiranja* (v. *Briketiranje*, TE 2, str. 153) i *sinteriranja* (v. *Sinteriranje*). Pri tom se pod granuliranjem razumijeva nekoliko s obzirom na proizvod sličnih procesa.

Jedan od tih jest tlačno granuliranje. To su operacije analogne briketiranju. Od njega se razlikuju samo time što su im čestice proizvoda manjih dimenzija. Uključuju i tabletiranje. Od tih procesa razlikuje se taložno granuliranje, tzv. *peletiziranje*, tj. izlučivanje primarnih čestica na površini čestica već postojećih granulata. Razlikuju se tzv. suhe i

mokre operacije peletiziranja. Prvima se aglomeriraju primarne čestice pod utjecajem težine čestica granulata koje su već prisutne u sustavu i koje se kotrljaju. Mokro peletiziranje jest izlučivanje primarnih čestica na čestice granulata koje se kotrljaju u otopinama, odnosno talinama, pod utjecajem isparivanja, odnosno skrućivanja.

Peletiziranje je danas vrlo važna operacija u različnim oblastima procesne tehnike. Upotrebljava se posvud gdje su njegovi produkti (pelete) prikladniji za dalju preradb u upotrebu nego praškasti materijali. Tako se, npr., peletiziraju mnogi prehrambeni proizvodi, lijekovi, krmiva, gnojiva, kemijski preparati, umjetne smole, sredstva za pranje, praškasti materijali izdvojeni iz plinova u industriji, sirova cementna brašna, fosfati. Osobito je važno peletiziranje ruda i koncentrata u metalurgiji. U toj oblasti peletiziranje se danas mnogo kombinira sa sinteriranjem (aglomeracijom površinskim srašćivanjem čestica pod utjecajem topline). Takvo peletiziranje jedna je od najvažnijih operacija u proizvodnji željeza (v. *Gvožđe*, TE 6, str. 319). I pečenje cementnog klinkera (v. *Cementi*, TE 2, str. 582) zapravo je operacija sinteriranja.

Operacije *oblikovanja* koje se iznimno izdvajaju iz tehnike primjene proizvoda i pridružuju operacijama procesne tehnike jesu kalandriranje i ekstrudiranje u preradbi plastificiranih smola i pređenje u preradbi otopina ili talina umjetnih smola, kojima se dobivaju gotovi proizvodi od poliplasta.

Kalandriranje je operacija dobivanja folija i obloga za podove većinom od materijala na osnovi poli(vinil-klorida) vrućim valjanjem. Valjčane staze za kalandriranje opskrbljuju se masom dobivenom miješanjem osnovne sirovine s dodacima u prikladnim gnjetalicama i na posebnim vrućim valjcima. Širine traka koje se dobivaju kalandriranjem ograničene su duljinama valjaka. Obično su 1,5 m. Folije se proizvode i *ekstrudiranjem*, koje je mnogo jednostavnije i fleksibilnije. Ekstruderi su zapravo grijane pužne preše. Pune se ili pripremljenom smjesom u prahu ili granulatom. Za proizvodnju folija izlaze su sapnice ekstrudera opskrbljene sapnicama s uređajima za ubrizgavanje zraka potrebnog da se od gotovog poliplasta dobiju cijevi napuhivanjem. Debljina stijenki i promjer tih cijevi mogu se regulirati tlakom ubrizganog zraka. Rezanjem tih cijevi mogu se dobiti trake folija široke do 10 m. Osim cijevi i folija, ekstrudiranjem se mogu proizvoditi profilirani proizvodi (bez ubrizgavanja zraka) i granulati (rezanjem profiliranih proizvoda).

Ispredanje vlakana iz otopina ili talina umjetnih smola također se provodi tlačenjem kroz sapnice, samo mnogo manjeg promjera (manjeg od 0,1 mm).

Operacije *prijelaza topline* u prvom su redu područje strojarstva, ali zbog njihove važnosti za druge jedinične operacije i procese ne mogu se odvojiti ni od procesne tehnike, pa su jedno od glavnih graničnih područja tih dviju struka. Mogu se svrstati u operacije grijanja izgaranjem, električnog grijanja, radijacijskog grijanja, grijanja plazmom, hlađenja isparivanjem, grijanja i hlađenja prenosiocima topline, te operacije rashladne tehnike. Pri tom se pod hlađenjem razumijevaju uglavnom operacije snižavanja temperature materijala u preradbi do temperature okoliša, a u operacijama rashladne tehnike i ispod temperature okoliša.

Operacije *grijanja izgaranjem* obuhvaćaju loženje čvrstim, kapljevitim i plinovitim gorivima, koje se načelno ne razlikuju od, npr., loženja aparata za grijanje prostorija (v. *Grijanje*, TE 6, str. 276) ili loženja parnih kotlova (v. *Parni kotlovi*, TE 10, str. 164). Električno grijanje obuhvaća elektrotermičke operacije (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 182). I *grijanje plazmom* zapravo je elektrotermička operacija.

Pod *hlađenjem isparivanjem* razumijeva se učinak koji se postiže već spomenutim vlaženjem plinova, a, osim toga, i hlađenje plinova na istom principu.

Grijanje i hlađenje prenosiocima topline može biti direktno i indirektno. Pod direktnim grijanjem i hlađenjem razumijevaju se operacije prijenosa topline u kojima je prenosilac topline u izravnom kontaktu s medijem koji se grije, odnosno hladi. Pri indirektnom grijanju i hlađenju prenosilac i medij koji se grije, odnosno hladi, razdvojeni su stijenkom, ili se naizmjenično dovode u kontakt s nekim materijalom koji djeluje kao spremnik topline. Često se operacije grijanja i hlađenja u prvom od tih dvaju slučajeva indirektnog grijanja nazivaju izmjenom topline, a u drugom regeneracijom topline.

Među operacijama rashladne tehnike (v. *Rashladni uređaji*) obično se razlikuju operacije *smrzavanja* i *dubokog smrzavanja* (v. *Konzerviranje hrane*, TE 7, str. 273). Često se područje rashladne tehnike dijeli i na tehniku hlađenja i tehniku dubokog hlađenja, a ponegdje se još razlikuje i kriotehnika.

Granice tih područja rashladne tehnike nisu jasno određene. Tako se, npr., u SR Njemačkoj pod tehnikom hlađenja razumijevaju operacije s temperaturom prenosilaca topline do najniže 170 K (normalnog vrelišta etena), pod tehnikom dubokog hlađenja do najniže 63 K (normalnog tališta dušika), a pod kriotehnikom operacije s temperaturama prenosilaca nižim od 120 K.

Operacije transporta materijala također su u prvom redu područje strojarstva. Međutim, još su manje odvojive od procesne tehnike nego operacije prijelaza topline, jer se bez njihova poznavanja ne mogu izraditi bitni dijelovi dokumentacije razvoja procesa, kao što su, npr., sheme procesne aparature i, osim toga, često su usko povezane s uspostavljanjem procesnih uvjeta (npr. tlaka) i isprepletene s drugim jediničnim operacijama (npr. miješanjem, otapanjem, prešanjem, sitnjenjem, prijelazom topline).

Osnovna je karakteristika operacija *transporta fluida* (v. *Mehanika fluida*, TE 8, str. 67; v. *Transport fluida*) u tome što se skoro uvijek provode u zatvorenim sustavima (cijevnim instalacijama) pod utjecajem razlike tlakova. Obično se ta razlika proizvodi strojevima. Usprkos tome, sustavi za transport fluida imaju razmjerno malo pokretnih dijelova (u usporedbi s većinom sustava za transport čvrstih materijala).

Transport plinova u takvim sustavima obično se provodi pod utjecajem kompresije. Već prema tome koliki mora biti taj učinak, upotrebljavaju se različite vrste kompresijskih strojeva. Tako se, kad je, npr., omjer tlaka na tlačnom i nasisnom priključku manji od 1,1, upotrebljavaju ventilatori (v. *Ventilatori*), kad je taj omjer 1,1...3, puhalo, a kad je veći od 3, kompresori (v. *Kompresor*, TE 7, str. 221). Za postizanje viših omjera tlakova upotrebljavaju se višestepeni kompresori. Transport i prihvati plinova pod visokim tlakovima obično se izdvajaju u posebnu tehniku visokih tlakova.

Osim u transportu plinova, visokotlačna tehnika je izvanredno važna i za provedbu niza jediničnih procesa (npr. sintezu amonijaka, metanola, hidrogenaciju ugljena), u mnogim provedbama kondenzacije (npr. u proizvodnji ukapljenih plinova), ili održavanju kapljeviti faza na višim temperaturama, otapanju plinova.

Analogno se i vakuumska tehnika (v. *Vakuumska tehnika*) može promatrati kao transport plinova. Međutim, i ona je vrlo važna za provedbu niza drugih procesa, osobito destilacije i dobivanja proizvoda koji mogu biti oštećeni u kontaktu s atmosferom.

Transport kapljevina razlikuje se od transporta plinova time što se zbog nestlačivosti sredine ne može odvijati uz kompresiju. Za taj su transport najprikladnije centrifugalne crpke (v. *Pumpe*). Deplasmanske (volumetrijske) crpke, kao što su stapne i membranske, upotrebljavaju se u transportu kapljevina uglavnom za proizvodnju tlakova većih od postizljivih centrifugalnim višestepenim crpkama. Pulsiranje koje pri tom može smetati ublažava se upotrebom dvoradnih strojeva, ili posuda sa zračnim jastukom. Mamutske crpke i mlazne crpke upotrebljavaju se za transport kapljevina samo ako je dopušteno miješanje s pogonskim fluidom.

Zbog velike zavisnosti od svojstava tvari *transport čvrstih materijala* složeniji je od transporta fluida. Za kontinuiran transport tih materijala najviše se upotrebljavaju različita mehanička prenosila (v. *Prenosila i dizala*). Neke od tih operacija često se kombiniraju s drugim jediničnim operacijama (npr. s prijenosom topline u grijanim pužnim transporterima, s prosijavanjem u oscilirajućim transporterima).

Često se rasuti čvrsti materijali koji nisu skloni sljepljivanju čestica transportiraju i u fluidiziranom stanju (pneumatski). Time se postižu neke prednosti transporta u zatvorenim sustavima slično kao i u transportu fluida, ali nastaju znatne teškoće s erozijom i otprašivanjem izlaznih plinova. Dakako, i taj je transport moguć samo ako medij pomoću kojeg se transportira ne djeluje štetno na materijal koji se transportira.

Operacije skladištenja ne mogu se izbjeći u intermitentnim procesima, ali se često i u kontinuiranim procesima, a i kolebljivim uvjetima na tržištu, odnosno u vanjskom transportu, radi što većeg rasterećenja postrojenja, uskladišćuju velike

zalihe sirovina i produkata. Osim toga, u tim procesima može biti potrebno skladištenje međuprodukata da se osigura nastavak procesiranja u nekim drugim procesnim stadijima ili pri obustavama pogona, osobito prisilnim.

Najmanje su mogućnosti tog skladištenja u procesiranju plinova, jer ih je zbog njihove prirode teško uskladištiti u velikim količinama. Za to najčešće služe (mokre) plinospreme sa zvonima (tzv. gazometri). Manje se upotrebljavaju suhe plinospreme s kliznim pločama.

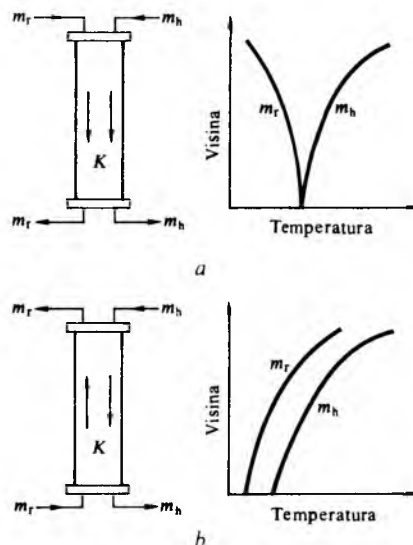
Kapljevine se skladište u rezervoarima sa čvrstim i s plivajućim pokrovom. Često su ti rezervoari opskrbljeni uređajima za sprečavanje razmješivanja (npr. mješalima, uređajima za cirkulaciju). Skladištenje kapljevina u podzemnim, prirodnim ili umjetno načinjenim šuplinama, obično u nekadašnjim ležištima soli, važno je u industriji nafte.

Analiza jediničnih operacija

Integriranje jediničnih operacija u cjelovitu disciplinu u prvom redu zahtijeva njihovu analizu. Za to potrebne zajedničke osnove prije svega su koncepcije u vezi s tzv. pogonskom silom procesa. Osim toga, veze među osnovama jediničnih operacija postoje unutar nekih njihovih skupina, osobito među operacijama u kojima je prijelaz bitan mehanizam procesa. Dosta veza među osnovama nekih jediničnih operacija može se naći i u zavisnosti od načina vođenja tokova materijala pri kontaktu kojim se ostvaruje prijelaz, i od toga da li se provode intermitentno ili kontinuirano, stupnjevito ili sasvim kontinuiranim kontaktom.

Pogonska sila procesa. U jediničnim operacijama najprikladnije je promatrati ravnotežu kao uvjet nulte neto-izmjene svojstava u sustavu (obično koncentracije tvari, energije, količine gibanja). U svim stanjima sustava izvan ravnoteže uvijek postoji razlika između intenziteta nekog svojstva i njegova intenziteta u ravnotežnom stanju, tj. razlika nekog potencijala, koja uzrokuje ili može uzrokovati promjene potrebne da se uspostavi ravnoteža. Ta razlika naziva se pogonskom silom procesa.

Ponekad, npr., u prijelazu topline ili elektriciteta lako je opisati pogonsku silu. To je mnogo teže kad je pogonska sila razlika koncentracija tvari. Npr. već u dvofaznim, trokomponentnim sustavima u kojima se sve komponente specifično raspoređuju i u jednoj i u drugoj fazi (kao npr. pri ekstrakciji) taj je opis vrlo složen, jer se može točno načiniti samo kad se uzmu u obzir svi podaci o aktivitetima, odnosno fugacitetima (funkcijama koncentracije mase), te slobodnim energijama svih komponentata u svim fazama u ravnotežnom i stvarnom stanju.



Sl. 2. Rezultati izravnog hlađenja istog medija kontinuiranim kontaktom pri (a) istosmjernom i (b) protusmjernom vođenju tokova. K kontaktor, m_r hlađeni medij, m_h rashladni medij

Dakako, brzina kojom se sustav mijenja izravno je proporcionalna pogonskoj sili. Zbog toga je pogonska sila jedan od bitnih faktora za proučavanje i vođenje jediničnih operacija. Vođenje tokova materijala u jediničnim operacijama prijelaza tvari ili energije može biti *istosmjerno* ili *protusmjerno* (sl. 2). Pri istosmjernom vođenju tokova materijala mogući je prijelaz sasvim ograničen ravnotežnim uvjetima. Protusmjernim vođenjem istih tokova moguće je postići mnogo veći prijelaz.

Tako, ako se hladi jedna kapljevit faza drugom, kao u primjeru na sl. 2a, i pusti da sustav dosegne termičku ravnotežu, na kraju procesa obje faze moraju imati istu (ravnotežnu) temperaturu. Zbog toga se tim procesom hlađenim medij može ohladiti, a rashladni ugrijati samo do te temperature. Isti je zaključak izvedljiv i iz druge osnovne karakteristike procesa u tom primjeru, tj. stalnog smanjivanja pogonske sile (razlike temperatura medija) dok konačno u ravnoteži ne dosegne vrijednost nulu. Ako se promatra s tog gledišta, također slijedi i zaključak da se i brzina procesa naglo smanjuje s približavanjem sustava ravnoteži, pa se može očekivati neekonomično procesiranje, čak i mnogo prije dorezanja tog stanja ako se prijelaz ne podupre još nekim drugim učinkom, npr. finim raspršivanjem jedne faze u drugoj.

Međutim, ako se hladi kao u primjeru na sl. 2b, može se temperatura hlađenog medija sniziti, a medija kojim se hladi povišiti iznad ravnotežne temperature sustava od količina koje su istodobno ušle u kontaktor, jer se među njima ne uspostavlja termička ravnoteža ni u jednom stanju procesa, a pogonska je sila manje ili više primjereno velika za sve vrijeme njegova trajanja. Drugim riječima, pri hlađenju jednog fluida drugim može se primjenom protusmjernog principa vođenja tokova materijala prenijeti više topline nego primjenom istosmjernog principa. Također, zbog mogućnosti održavanja prilične stalnosti pogonske sile, i brzina, a time i ekonomičnost takva procesiranja mogu biti veće.

Intermitentne i kontinuirane operacije. Obično su u procesnoj tehnici ekonomičnije kontinuirane operacije s minimalnim poremećajima režima i pogonskim obustavama. Najčešće je od toga izuzeto procesiranje u malom industrijskom mjerilu, osobito vrlo agresivnih sustava, kad su zbog snažne korozije potrebni česti popravci postrojenja.

Osnovna je karakteristika kontinuiranog procesiranja, važnog za analizu jediničnih operacija, što se manje-više može zanemariti vrijeme kao varijabla (jer je trajanje pogona tada obično vrlo dugo u usporedbi s trajanjem puštanja u pogon i njegove obustave). Operacije takva procesiranja nazivaju se operacijama stacionarnog stanja.

Nasuprot tome, u šaržnim operacijama skoro je čitav radni ciklus puštanje u pogon i njegova obustava, pa se ne može analizirati ako se isključi vrijeme kao varijabla. Takve operacije nazivaju se operacijama prijelaznog (nestacionarnog) stanja. Dakako, analiza je operacija prijelaznog stanja složenija.

Analiza jediničnih operacija može se provesti bilo kojom od već navedenih metoda (sličnost aparatura potrebnih za njihovo provođenje, analogija matematičkih opisa funkcija tih aparatura ili fizikalni modeli bazičnih mehanizama procesa).

Najstarije su metode analize jediničnih operacija na osnovi analogije aparatura. U doba kad je vještina njihova provođenja temeljena na iskustvu bila mnogo važnija od znanstvenog shvaćanja njihovih osnova, te su metode bile temelj analize. Iako još uvijek treba očekivati neka poboljšanja, danas je uspjeh općenito manje vjerojatan nego u analizi jediničnih operacija suvremenijim metodama, prije svega zbog opasnosti od ponavljanja grešaka iz prošlosti.

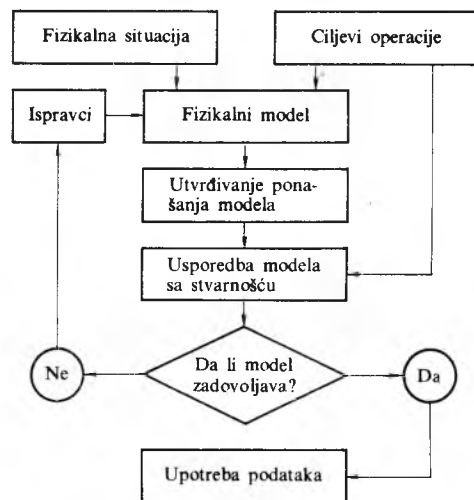
Također su i metode analize jediničnih operacija jedino na osnovi matematičkih opisa najčešće nezadovoljavajuće, jer se pri tom nailazi na vrlo velike teškoće. Osobito je teško matematički opisati ponašanje molekula i granične uvjete. (Zbog nelinearnosti promjena na molekularnoj razini i zavisnosti graničnih uvjeta jedne od promjena druge faze obično je nemoguće dobiti za analizu dovoljno jednostavno upotrebljiv matematički izraz.)

Analiza pomoću fizikalnog modela najviše zadovoljava. Gdje god je moguće, fizikalni se model opisuje matematički. Rezultati koji se tako postižu općenito su dobri usprkos potrebnim pojednostavnjenjima modela i nemogućnosti da se sasvim točno matematički opiše njegovo ponašanje.

Ipak nema univerzalnog kriterija za izbor određene metode analize jediničnih operacija, a i svaki način njihova

grupiranja zahtijeva nešto posebno i slabo je primjenljiv na neke koje se zbog toga moraju individualno opisivati.

Osim koncipiranja iz fizikalne situacije i ciljeva koje treba postići te matematičkog opisivanja ponašanja modela, općeniti postupak analize neke jedinične operacije tom metodom (sl. 3) može obuhvaćati još i dotjerivanje do postizanja rezultata primjenljivih u praksi. Pri tom se ponašanje modela uspoređuje s performansama operacije u praktičnoj provedbi, čime se utvrđuje da li on zadovoljava. Ako ne zadovoljava, model se korigira i ponovno ispituje, a ako zadovoljava, iz njega se izvode podaci koji se upotrebljavaju za proračun operacije.



Sl. 3. Općeniti postupak analize jediničnih operacija pomoću fizikalnog modela

Pri matematičkom opisivanju fizikalnog modela vrlo je često nemoguće napraviti izraze dovoljno jednostavne za praktičnu primjenu bez podataka iz još nekih drugih izvora. To su tzv. konstitutivni odnosi. Oni se obično potpuno izvode iz eksperimenata koji se provode specijalno za pojedini slučaj.

Među ostalim, osnove razvijanja modela jediničnih operacija jesu zakoni održanja (mase, energije, impulsa). Za primjenu tih zakona u stvaranju modela služi koncepcija kontrolnog volumena, tj. dijela prostora u kojemu se provodi zamišljeni proces, ograničenog zamišljenom kontrolnom površinom (sl. 4). Na temelju te predodžbe može se postaviti

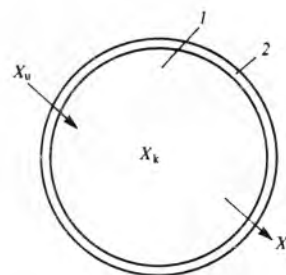
$$X_k = X_p + X_s + X_u - X_i = X_p + X_a, \quad (1)$$

gdje su X_p i X_k vrijednosti promatrane veličine u kontrolnom volumenu na početku promatranja i u trenutku određivanja, X_s i X_a njene vrijednosti koje su se za to vrijeme stvorile, odnosno akumulirale u kontrolnom volumenu, a X_u i X_i one koje su u njega ušle i iz njega izašle. Analogne jednačbe mogu se izvesti i za brzine kojima se odvijaju te promjene, npr.

$$v_a = v_s + v_u - v_i, \quad (2)$$

gdje su v_s i v_a brzine stvaranja i akumuliranja veličine X u kontrolnom volumenu, a v_u i v_i brzine kojima ona u njega ulazi i iz njega izlazi.

Jedan od najvažnijih fizikalnih modela analize jediničnih operacija jest naprava u kojoj se ostvaruje kontakt dviju



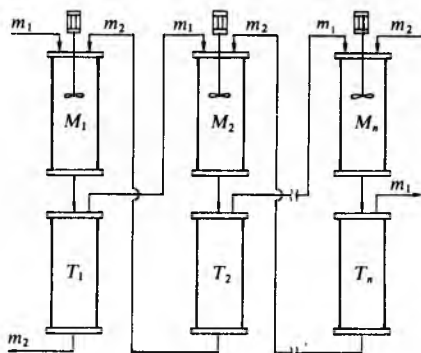
Sl. 4. Općenita koncepcija kontrolnog volumena. 1 kontrolni volumen, 2 kontrolna površina, X veličina (tvar, ili energija, ili gibanje)

struja materijala tako da se među njima uspostavlja ravnoteža, pa se zatim one razdvoje (npr. prema sl. 2a). Naziva se ravnotežnim stadijem, a operacije koje se provode nizom tih stadija stadijskim (stupnjevitim) operacijama.

Drugi, jednako važan model jediničnih operacija jest naprava za prijelaz tvari ili energije između dviju struja u njihovu kontinuiranom kontaktu. Očito je pri tom prijelaz određen brojem i brzinom migriranja prenosilaca svojstava, a učinak je umnožak te brzine i vremena trajanja kontakta. Zbog toga se taj model naziva brzinskim, a operacije koje se tako provode brzinskim operacijama (operacijama kontinuiranog kontakta).

Prednost primjene jednog ili drugog od tih dvaju modela u analizi jediničnih operacija može biti očita, ali može biti i uvjetovana raspoloživošću podacima. Međutim, izbor među tim metodama ne mora ograničiti i praktičnu provedbu operacija na postupak prema modelu upotrijebljenom za analizu.

Stupnjevite operacije mogu se sasvim općenito promatrati na osnovi djelomičnog prijelaza u pojedinim stadijima (računato od ukupnog mogućeg prijelaza uspostavljanjem ravnoteže u sustavu). Pri tom nije potrebna specifikacija veličine koja prelazi, ni specifikacija prirode faza među kojima se odvija taj prijelaz. Za to može poslužiti model na sl. 5 kao model operacije kontinuiranog kontakta prema primjeru na sl. 2b, modificiran zamjenom kontaktora nizom ravnotežnih stadija od po jednog mješala i taložnika. Očito je, da se uz iste tokove, već u bateriji od dva takva stadija ostvaruje veći prijelaz nego kontaktorom prema primjeru na sl. 2a i da je sve veći što je više takvih stadija, te se približava učinku kontaktora na sl. 2b. Premda su stupnjevite operacije općenito mnogo složenije od operacija kontinuiranog kontakta koje se provode primjenom protustrujnog principa u jednom kontaktoru, često su, npr. kod luženja, prikladnije.



Sl. 5. Princip provođenja stupnjevitih operacija prijelaza među kapljevitim fazama. m_1 lakša, m_2 teža faza, $M_1, M_2, \dots, M_n$ mješala, $T_1, T_2, \dots, T_n$ taložnici

Brzinske operacije karakterizira mogućnost da se prijelaz uvijek odvija u skladu s istim općim matematičkim izrazom, tzv. difuzijskom jednadžbom

$$\frac{\partial G}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}, \quad (3)$$

gdje je G intenzitet svojstva koje prelazi, τ vrijeme, x udaljenost u smjeru prijelaza, a K konstanta proporcionalnosti sustava.

Najjednostavnije se difuzijska jednadžba primjenjuje u prijelazu elektriciteta. U toj oblasti, u specifičnim uvjetima, ona se reducira u Ohmov zakon (v. *Elektrotehnika*, TE 5, str. 114, 115). Te pojave dobro slijede utvrđene zakone. Oni obuhvaćaju relativno stalne faktore proporcionalnosti, a potrebni granični uvjeti obično se mogu proračunati, pa su u tom području često mogući tehnički proračuni analitičkim rješenjem jednadžbe (3). Međutim, dobivanje rješenja difuzijske jednadžbe u analizi brzinskih operacija prijelaza tvari rijetko je moguće. Tome se suprotstavljaju ne samo već spomenute teškoće u opisivanju graničnih uvjeta nego i

teškoće u određivanju faktora proporcionalnosti. I oni su vrlo rijetko konstante. Da se tada omogući rješenje, najčešće se namjesto postupka pomoću diferencijalnog računa difuzijska jednadžba pojednostavnjuje u jednadžbu konačnog povećanja za prosječne uvjete.

U najjednostavnijim, u procesnoj tehnici vrlo rijetkim slučajevima brzina se prijelaza ne mijenja ni s vremenom ni s položajem u sustavu. Tada se može pretpostaviti da je pogonska sila procesa konstantna i ravnomjerno raspoređena na putu i po stalnom presjeku. Ako su uz to i fizikalna svojstva tog puta stalna, smije se pretpostaviti da je i konstantan K u jednadžbi (3), pa se za brzinu prijelaza dobiva izraz analogan Ohmovu zakonu

$$\frac{\Delta G}{\Delta \tau} = \frac{\frac{F}{x}}{\frac{R}{A}}, \quad (4)$$

gdje je F pogonska sila, a R i A su otpor i površina presjeka puta.

Obično se pojednostavnjivanjem difuzijske jednadžbe proscjecima i približenjima mogu dobiti izrazi slični jednadžbi (4) koji su točniji od rigoroznih rješenja. Kad se to postigne, za određivanje količine svojstva koje prelazi potrebno je točno poznavati pogonsku silu procesa i specifični otpor puta.

JEDINIČNI PROCESI

Za razliku od proučavanja jediničnih operacija, proučavanje jediničnih procesa nije moguće ako se ne uzmu u obzir kemijska svojstva spojeva prisutnih u sustavu, pa je mnogo opsežnije i složenije. Zbog toga se već u pokušajima da se odredi što sve treba smatrati jediničnim procesima, i da se oni klasificiraju, pojavljuju velike teškoće.

Premda su nastojanja da se svladaju te teškoće, potaknuta relativnim uspjesima u klasifikaciji i integraciji jediničnih operacija, počela već tridesetih godina, ona ni do danas nisu zadovoljavajuća. Zbog toga se još uvijek upotrebljavaju manje-više slabo određene definicije jediničnih procesa. (Npr. prema R. N. Shreveu pod jediničnim procesom treba razumijevati komercijalizaciju neke kemijske reakcije u takvim uvjetima da je ekonomski korisna. Prema P. H. Groginsu jedinični procesi organske kemijske industrije skupine su procesa za provođenje reakcija kojima je zajednički neki karakteristični reaktant.)

Pri klasifikaciji u praksi obično se spominje dvadesetak glavnih jediničnih procesa (tabl. 4). Međutim ta klasifikacija ne zadovoljava potrebe proučavanja jediničnih procesa koje je usmjereno u projektiranje i dimenzioniranje aparatura potrebnih za njihovo provođenje. Njen je glavni nedostatak u tome što prikazuje samo procese pretvorbe, a ne obuhvaća procese prijenosa i prijelaza koji ih prate, a oni se ne smiju zanemariti, jer o njima ovisi odvijanje reakcija.

Za odvijanje jediničnih procesa osobito su važni prijenos i prijelaz tvari i topline. Kemijske reakcije koje se smiju promatrati kao termički neutralne vrlo su rijetke. Najčešće se ne smije zanemariti endotermijski, odnosno egzotermijski učinak reakcije, te temperatura reakcijskog sustava, pa se jedinični procesi obično izvode uz istodobnu primjenu jediničnih operacija prijelaza i prijenosa topline, a i drugih jediničnih operacija koje podupiru prijelaz i prijenos. Najčešće su to operacije koje istodobno podupiru i prijelaz, odnosno prijenos mase (što može biti potrebno i kad prijelaz ili prijenos topline nisu bitni), npr. miješanje, cirkulacija crpkama.

Za prilagođivanje klasifikacije jediničnih procesa rješavanju problema njihova opisivanja radi organiziranog proučavanja i proračunavanja za tehničku primjenu predlažu se različiti drugi principi njihova grupiranja. Obično se pri tom niti ne govori o jediničnim procesima, nego o procesima reakcijske tehnike, koji obuhvaćaju spomenute operacije prijelaza i prijenosa. Tako se, npr., ti procesi mogu grupirati u procese u homogenim fluidnim fazama (posebno plinskim, posebno kapljevitim), u heterogenim fluidnim sustavima (posebno suspenzija faza LL, posebno sustavima faza GL), u nekatalitičke procese s čvrstim tvarima i procese na čvrstim kataliza-

Tablica 4
GLAVNI JEDINIČNI PROCESI

Naziv	Opis	Naziv	Opis
Alkilacija	Ugrađivanje alkilnih skupina u molekule organskih spojeva i dobivanje element-alkilnih spojeva (v. <i>Alkilacija</i> , TE 1, str. 210)	Hidrogenacija i hidrogenoliza	Katalitički procesi koji obuhvaćaju reakcije vodika s različitim, u prvom redu organskim spojevima, odnosno materijalima (v. <i>Hidrogenacija</i> , TE 6, str. 386), te sinteze amonijaka i organskih spojeva iz smjesa ugljik(II)-oksida i vodika
Amonoliza	Reakcija dobivanja amida cijepanjem estera amonijaka (v. <i>Amidi</i> , TE 1, str. 264)	Hidratacija i hidroliza	Adsorpcijsko, apsorpcijsko i kemijsko vezivanje vode na različite spojeve i materijale (hidratacija), te cijepanje molekula različitih tvari vodom (hidroliza)
Aromatizacija	U užem smislu, reakcije dobivanja aromatskih spojeva dehidrogenacijom alicikličkih, u širem i dehidrociklizacijom viših alkana (v. <i>Aromatski spojevi</i> , TE 1, str. 419; v. <i>Nafta</i> , TE 9, str. 190)	Izmjena iona	Reverzibilne kemijske reakcije nekih čvrstih tvari (izmjennjivača iona) s kapljevitim smjesama (obično vodenim otopinama) kojima se među tim fazama izmjenjuju ioni (v. <i>Izmjena iona</i> , TE 6, str. 576)
Kalciniranje i dehidratacija	Procesi prženja, tj. grijanja do temperature ispod tališta radi uklanjanja vode ili drugih hlapljivih sastojaka materijala. Općenito se kalcinacija razlikuje od dehidratacije time što se provodi na višim temperaturama	Izomerizacija	Reakcije konverzije organskih spojeva, pretežno ugljikovodika, u spojeve s istim bruto-formulama, ali drugačijim rasporedom atoma u molekuli
Izgaranje	U užem smislu, brzi oksidacijski procesi popraćeni velikim porastom temperature sustava; u širem smislu, sve reakcije popraćene takvim toplinskim učincima s barem jednim plinovitim sudionikom	Neutralizacija	U običnom smislu, reakcije kiselina i baza kojima nastaju soli i voda, točnije, reakcija vodikova i hidroksilnog iona kojom nastaje voda, ili pozitivnih i negativnih iona u nevedenim otopinama kojima nastaje otapalo i solima sličan spoj
Kondenzacija	Za razliku od jediničnih operacija kondenzacije, kemijske reakcije kojima se spajaju dvije ili više molekula uz izdvajanje vode ili neke druge jednostavne tvari. Uključuje i polikondenzaciju (nastajanje polimera kondenzacijom)	Nitracija	Ugrađivanje nitro-skupina u molekule organskih spojeva, uglavnom supstitucijom vodika (v. <i>Nitracija</i> , TE 9, str. 350)
Diazotiranje i kuplovanje	Reakcije amina, uglavnom primarnih, s nitritima u kiselim sredinama kojima se dobivaju azo-spojevi (v. <i>Dušik</i> , TE 3, str. 513), te reakcije tih spojeva s drugima, osobito fenolima	Oksidacija	U širem smislu, procesi kojima se kemijski veže kisik, ali pod jediničnim procesima oksidacije obično se razumijevaju samo tehnička oksidacija sumpora, amonijaka i procesi oksidacije radi proizvodnje organskih spojeva (v. <i>Oksidacija i redukcija</i> , TE 9, str. 588)
Elektroliza	Procesi u elektrokemijskim reaktorima (v. <i>Elektrokemija</i> , TE 4, str. 363; v. <i>Elektroliza alkalijskih klorida</i> , TE 4, str. 405)	Polimerizacija	Procesi dobivanja tvari (polimera), najčešće, s gigantskim molekulama od spojeva s jednostavnim molekulama (monomera) (v. <i>Polimerizacija</i> , TE 10, str. 573)
Esterifikacija	Reakcije dobivanja estera, u prvom redu iz alkohola i kiselina (v. <i>Esteri</i> , TE 5, str. 353), uključujući i sulfatiranje	Piroliza i kreiranje	Procesi cijepanja složenih molekula djelovanjem topline radi dobivanja materijala s jednostavnijim molekulama
Fermentacija	U užem smislu, procesi katalizirani biokatalizatorima (enzimima; v. <i>Enzimi</i> , TE 5, str. 334), u širem, još i procesi proizvodnje tih katalizatora	Redukcija	Procesi kojima se povećava broj elektrona nekog atoma, odnosno atomske skupine, uglavnom u proizvodnji organskih spojeva (v. <i>Oksidacija i redukcija</i> , TE 9, str. 588)
Halogeniranje	Ugrađivanje atoma halogenih elemenata u molekule organskih spojeva (v. <i>Halogenacija</i> , TE 6, str. 342)	Sulfoniranje	Reakcije dobivanja sulfonskih kiselina i njihovih soli, odnosno sulfo-halogenida
Hidroformilacija (Okso-sinteza)	Reakcije dobivanja aldehida adicijom ugljik(II)-oksida i vodika na dvostruke veze ugljikovih atoma u molekulama organskih spojeva (v. <i>Aldehidi</i> , TE 1, str. 190)		

torima, elektrokemijske, fotokemijske i elektrotermijske kemijske procese, te procese plazmene kemije.

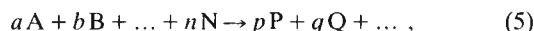
Unutar skupine nekatalitičkih procesa s reakcijama sa čvrstim tvarima razlikuju se oni s reakcijama u jamskim pećima (posebno s reakcijama crne metalurgije, posebno s reakcijama metalurgije obojenih metala), procesi u konvertorima (s metalurškim reakcijama oksidacije propuhivanjem talina zrakom) i procesi prženja. Među posljednjima razlikuju se procesi u etažnim i rotirajućim pećima, procesi za provođenje reakcija staljivanjem lebdećih čestica, reakcija u fluidiziranom sloju i uz direktno grijanje prenosioćima topline. Među procesima na čvrstim katalizatorima razlikuju se oni s reakcijama plinske katalize u nepomičnom i u fluidiziranom sloju, te oni s reakcijama u sustavu faza GLS.

Osnove jediničnih procesa. Neke zajedničke osnove jediničnih procesa postoje već zbog toga što oni obuhvaćaju kemijske reakcije, pa se odvijaju približno u skladu s općenitim zakonima kemijske termodinamike (v. *Termodinamika*) i kemijske kinetike (v. *Kemijska kinetika*, TE 7, str. 45). Obično je već na početku nekog jediničnog procesa potrebno raspolagati podacima o opsegu pretvorbe (konverziji) i iskorištenju (iscrpk) u reakciji, jer o tome ovisi izbor reaktora i način povezivanja tog stadija s drugim stadijima u procesno postrojenje. (Konverzija i iscrpak dotjeruju se tokom razvoja procesa izborom uvjeta u reaktoru, potrebnih da se dostigne približenje kemijskoj ravnoteži i primjerena brzina pretvorbe. Zbog toga i konverzija i iscrpak u jediničnom procesu zavise od intenziteta svojstava sustava pri kojima se ostvaruju odabrani uvjeti: temperatura i tlak u reaktoru,

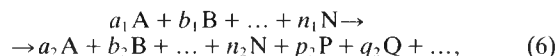
koncentracija reaktanata u reakcijskoj smjesi, trajanje reakcije, priroda katalizatora, specijalni parametri.)

Konverzija reakcijom u jediničnim procesima definira se kao udjel neke tvari uvedene u reaktor, koji nedostaje u produktu reakcije. Određuje se pomoću količina tvari iz jednadžbi kojima se prikazuju reakcije procesa.

Budući da konverzija nikad nije potpuna, pa općenito nije moguće, ili nije poželjno, uvoditi u proces stehiometrijske količine reaktanata (obično su potrebni u suvišku), za određivanje konverzije ne mogu poslužiti stehiometrijske jednadžbe kao što je npr.



gdje su $a, b, \dots, n$ množine tvari A, B, ..., N koje ulaze u reaktor, a $p, q, \dots$ množine tvari P, Q, ... koje nastaju reakcijom i čine produkte. Namjesto tog izraza za određivanje konverzije moraju se upotrijebiti bilančni opisi reakcije, npr. jednadžba



gdje su indeksom 1 označene množine tvari koje ulaze u reaktor, a indeksom 2 množine tvari koje iz njega izlaze.

Ako je, npr., N sudionik koji se u ulaznom materijalu nalazi u najmanjem suvišku, i to tako da je $n_1 = kn$, dobiva se

$$a_1 > ka; \quad b_1 > kb, \dots, \quad (7)$$

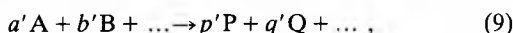
pa je i konverzija različita za svaki reaktant, tj. ne može se

definirati ukupna konverzija koja određuje stupanj do kojeg se odvija reakcija (6). U praksi se pojam konverzije obično ograničuje na jedan ili dva reaktanta. Tako je, ako je A glavni reaktant, konverzija

$$U_A = \frac{a_1 - a_2}{a_1} = 1 - \frac{a_2}{a_1} \quad (8)$$

Za konverziju ostalih reaktanata dobivaju se analogni izrazi. Obično se konverzija izražava u postocima dobivenim množenjem vrijednosti izračunatih iz (8) sa 100.

Iscrpak se također može potpuno smisleno definirati samo ako se veže uz jedan reaktant. Za to je potrebno razlučiti sporedne produkte u one koji su stehiometrijski povezani s nastajanjem željenog produkta i one koji to nisu, jer samo reakcije kojima nastaju posljednji treba smatrati uzročnicima smanjivanja iscrpka. (Uz produkte sporednih, pratećih reakcija u posljednje treba ubrojiti i međuprodukte glavne reakcije.) Zato je uz reakciju (6) potrebna i modificirana stehiometrijska jednadžba. Ako se ona prikaže kao



gdje je P glavni produkt, onda se dobiva da je iscrpak s obzirom na reaktant A

$$Y_A = \left(\frac{p_2}{a_1}\right) : \left(\frac{p'}{a'}\right) \quad (10)$$

Za iscrpke s obzirom na druge reaktante također se dobivaju analogni izrazi. Također se taj iscrpak često prikazuje kao postotak.

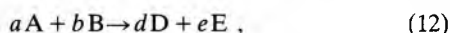
Međutim, često je navedeno razlučivanje teško, pa se iscrpak izražava kao množina ili kao masa produkta koji se dobiva od 100 molova, odnosno od 100 kg ishodnog materijala. Za razliku od iscrpka prema tim pragmatičnim definicijama, iscrpak izražen prema (10) često se naziva teorijskim.

Omjer iscrpka i konverzije s obzirom na reaktant A

$$S_A = \frac{Y_A}{U_A}, \quad (11)$$

naziva se selektivnošću.

Odstupanje od kemijske ravnoteže u reakciji koju obuhvaća promatrani jedinični proces, npr.



može se mjeriti na osnovi izraza za konstantu ravnoteže, kao što su

$$K_p = \frac{p_D^d \cdot p_E^e}{p_A^a \cdot p_B^b}; \quad K_c = \frac{c_D^d \cdot c_E^e}{c_A^a \cdot c_B^b}, \quad (13)$$

gdje su p_A, p_B, p_D, p_E parcijalni tlakovi sudionika kad je reakcija plinska, a c_A, c_B, c_D, c_E njihove koncentracije u drugim reakcijama.

Pri tom se vrijednosti za K_p , odnosno K_c , ili nalaze u priručnicima, ili se proračunavaju pomoću termodinamičkih funkcija, a vrijednosti na desnim stranama izraza (13), postignute reakcijom, određuju mjerenjima. Rad na poboljšavanju konverzije isplati se samo ako je razlika konstante ravnoteže i tih vrijednosti dovoljno velika.

Brzina pretvorbe glavni je činilac u razvoju jediničnih procesa, pa je u tom poslu potrebno raspolagati izrazima koji je dobro opisuju. Za tu svrhu zadovoljavaju matematički izrazi vremenskog odvijanja pretvorbe koji u nekom području dovoljno točno reproduciraju rezultate ispitivanja. (Općenito pri tom nije potrebno objasniti reakcijski mehanizam, pa niti ga upotrijebiti za izvođenje formalnog izraza brzine reakcije.)

Prikladne mjerne veličine za brzinu pretvorbe mogu biti utrošene količine nekog reaktanta u jedinici vremena, odnosno nastale količine nekog proizvoda. U proračunavanju reaktora za homogene reakcije i intermitentni pogon najbolje je te količine izraziti volumenom (V) punjenja reaktora i

koncentracijama (c) tih tvari. Tada se za brzine pretvorbe dobivaju izrazi oblika

$$r = \frac{1}{V} \cdot \frac{d(cV)}{dt} = \frac{dc}{dt} \quad (14)$$

Jednaki se izrazi mogu upotrijebiti i za predviđanje brzine pretvorbe u kontinuiranom pogonu ako se za V uzme volumen reakcijske smjese koji dospijeva u reaktor u jedinici vremena.

Za proračun reaktora koji rade u drugim uvjetima prikladna je upotreba izraza brzine pretvorbe analognih izrazima kemijske kinetike, npr. s obzirom na reaktant A u reakciji (6) ako je ona ireverzibilna, pa je njena konstanta ravnoteže vrlo velika, te se prisutnost reaktanata u proizvodu smije zanemariti

$$r_A = -k_A c_A^a c_B^b \dots, \quad (15)$$

odnosno ako je reverzibilna, pa je njena konstanta ravnoteže malena

$$r_A = -k_{A,1} c_A^a c_B^b \dots + k_{A,2} c_P^d c_Q^e \dots \quad (16)$$

Pri tom se konstante brzine reakcije $k_A, k_{A,1}, k_{A,2}$ mogu izračunati iz Arrheniusove jednadžbe pomoću eksperimentalnih podataka (v. *Kataliza*, TE 6, str. 712). Time se ujedno opisuju i utjecaj temperature na brzinu pretvorbe. Eksponenti u jednadžbama (15) i (16) određuju se empirijski tako da što bolje opisuju ukupni tok reakcije, uključivši i utjecaje procesa prijelaza i prijenosa. Često se, za razliku od mikrokinetike, takvo opisivanje brzine pretvorbe naziva makrokinetikom.

Perspektive daljeg razvoja jediničnih procesa prije svega se nalaze u tome što se svakim od njih ujedinjuju zajedničke karakteristike brojnih individualnih kemijskih reakcija u industrijskoj provedbi. Među ostalim, to omogućuje segregaciju procesnih postrojenja prema jediničnim procesima, proširivanje mogućnosti upotrebe manjih postrojenja za provedbu više reakcija i ujedno specijalizaciju zaposlenog osoblja za pojedine jedinične procese (npr. hidrogenaciju, nitriranje).

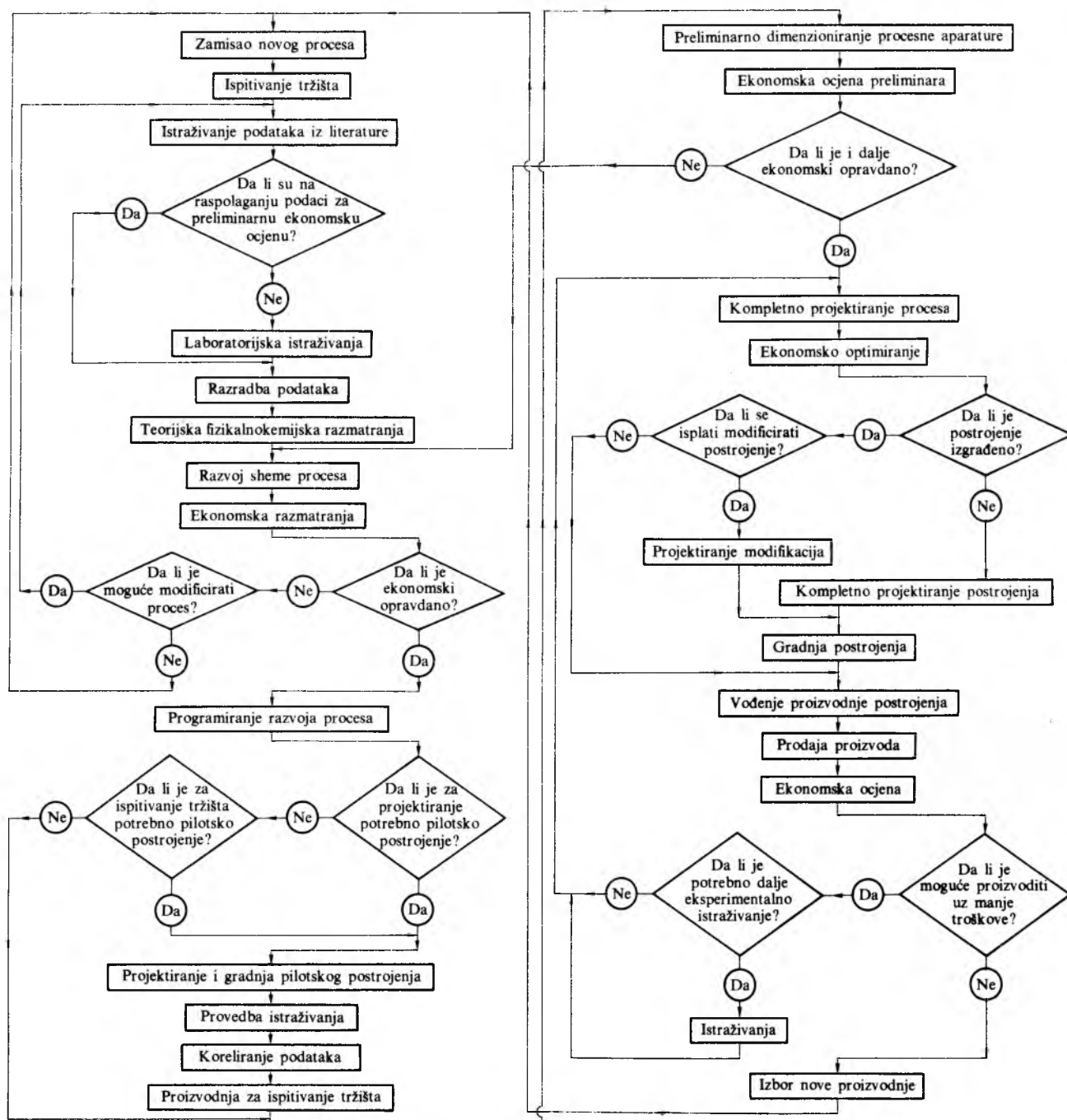
Osim toga, rješavanje problema jediničnih procesa često je najvažniji posao u razvoju čitavog procesa, jer troškovi nabave i pripreme sirovina obično čine najveći dio troškova proizvodnje, pa se najveće uštede mogu ostvariti povećavanjem konverzije ili iscrpka.

Također i u projektiranju opreme uopćenja koja se dobivaju razvijanjem jediničnih procesa bolje pomažu nego zaključci koji se mogu izvesti iz odvojenog promatranja pojedinih reakcija.

PROJEKTIRANJE I POGON PROCESNIH POSTROJENJA

Podizanje i eksploatacija procesnih postrojenja u suvremenim uvjetima privređivanja imaju ne samo tehničko i financijsko nego i društveno značenje, pa se moraju uklapati u dugoročne programe razvoja. Taj je zahtjev uzrokovan nizom međusobno povezanih uvjeta koji traže sve širu integraciju proizvodnje, ili stimuliranje, odnosno suzbijanje ekspanzije pojedinih njenih sektora u skladu s promjenama na tržištu. Među ostalim, sve su više potrebna rafinirana i skupa istraživanja, stalno i sve se brže razvijaju tehnološki postupci, a time se i sve brže poboljšavaju procesi i procesna oprema. Zbog toga je općenito potrebno promatrati razvitak procesnih postrojenja kao permanentnu tehničko-ekonomsku djelatnost (koja se ne prekida ni uspješnom realizacijom postrojenja).

Već prema svrsi novog procesnog postrojenja, priprema za gradnju, projektiranje i pogon mogu biti vrlo različiti. Kad se radi o postrojenju za proizvodnju nekog novog proizvoda ili za proizvodnju već poznatog proizvoda nekim novim procesom u industrijskom mjerilu, priprema može obuhvatiti sljedeće faze (sl. 6): preliminarna razmatranja, istraživanja, projekt procesa, projekt postrojenja, gradnju postrojenja sa stavljanjem u pogon, vođenje pogona s održavanjem postrojenja, te prodaju proizvoda s analizom tržišta. Redoslijed tih faza, međutim, nije jednoznačno određen jer su one među-



Sl. 6. Shema kompletnog proučavanja, projektiranja i gradnje procesnog postrojenja

sobno zavisne. Osobito se isprepleću radovi na projektu procesa s radovima na projektu postrojenja. Na tim poslovima potrebna je suradnja specijalista različitih tehničkih struka. U ovom članku izlaganje je ograničeno na radove u području procesne tehnike.

Kad je potrebno povećanje proizvodnog kapaciteta poznatog procesa, priprema je obično jednostavnija.

Preliminarna razmatranja

Osim zamisli novog postrojenja, preliminarna razmatranja u prvom redu obuhvaćaju preliminarnu analizu financijskih aspekata. Budući da je ostvarenje novog postrojenja najčešće povezano s velikim investicijskim troškovima (koje zbog toga treba na neki način procijeniti), obično je prvi zahtjev koji mora biti zadovoljen kad se pristupa pripremi gradnje novog postrojenja da se ekonomskim rezultatima njegove eksploatacije postigne veća rentabilnost nego nekim drugim ulaganjem.

Međutim, osim procjene rentabilnosti, analiza društvenog značenja njegove gradnje mora obuhvatiti i ispitivanje niza drugih utjecaja njegove gradnje i eksploatacije (utjecaj na okoliš, stanje i razvoj lokalnih infrastrukture, vanjski transport, zaposlenost stanovništva). Zbog toga je prije pristupa projektiranju procesa potrebno još i (barem načelno) odabrati postupak prikladan za njegovu provedbu, odabrati proizvodni kapacitet i odrediti lokaciju budućeg postrojenja. Brojni činioci koje treba razmotriti obično su zamršeno zavisni jedan od drugoga, pa se ni to ne može obaviti sukcesivno prema navedenim fazama, već se u njihovoj obradbi moraju tražiti najpovoljniji kompromisi suprotnih zahtjeva.

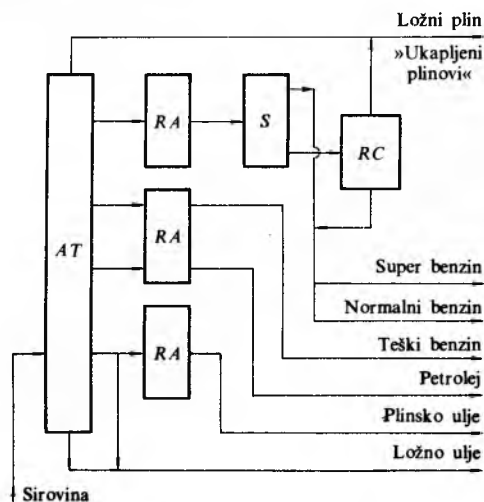
Izbor procesa. Zamisao procesa za dobivanje novog proizvoda može nastati samo na osnovi istraživanja u fundamentalnim znanostima. Međutim, primjena novog procesa nije nužno vezana za dobivanje novih proizvoda. Češće je ta primjena nametnuta raspoloživošću novim sirovinama od

kojih se može dobiti isti proizvod ili primjenom nove aparature ili novih postupaka ostvarenih tehnološkim napretkom.

Jedan od problema koji se skoro uvijek pojavljuju u izboru poznatih procesa za industrijsku proizvodnju poznatih proizvoda jest što su skoro redovno već u upotrebi različiti postupci. Oni se mogu razlikovati time što služe za preradu različitih sirovina, ili se sastoje od različitih kombinacija procesnih koraka, ili jedno i drugo. Tada se izbor zasniva na tehničko-ekonomskoj usporedbi alternativa. Među ostalim, ona obuhvaća analize raspoloživosti sirovinama, karakteristika i cijena sirovina, proizvodnih troškova, iskorištenja eventualnih sporednih proizvoda, troškova nabavke licencijske.

Velike proizvodne organizacije sa svojim istraživačkim službama mogu biti suočene s dilemom da li kupiti licencijsku već razvijenog procesa ili pokušati same razvijati konkurentni postupak. Prva od tih alternativa zahtijeva obično velika ulaganja, ali omogućuje brzu proizvodnju. Nasuprot tome, druga je alternativa povezana s nesigurnim izgledima u uspjeh i mnogo kasnijim početkom proizvodnje. U rješavanju te dileme treba računati i s kompenzacijom dijela troškova u drugoj alternativi koju bi mogla omogućiti prodaja vlastite licencijske. Druga alternativa može biti i jedini izlaz, jer često nema licencijske na prodaju.

U fazi preliminarnih razmatranja izbor procesa je sasvim načelne prirode, pa za to zadovoljavaju njegove principijelne (blok) sheme. Tim shemama (sl. 7) ne prikazuje se aparatura, već samo slijed najvažnijih procesnih faza i glavne struje materijala.



Sl. 7. Principijelna shema procesa jednostavne rafinerije nafte. AT atmosferska destilacija, RA rafinacija, S splitter, RC katalitičko reformiranje

Kapacitet procesnih postrojenja koja treba projektirati obično se primjerava u skladu s težnjom da bude što veći i s ograničenjima koja nameće tržište. Težnja što većem proizvodnom kapacitetu pojavljuje se općenito zbog toga što se s povećavanjem postrojenja smanjuju jedinični troškovi proizvodnje (troškovi proizvodnje po jedinici mjere proizvoda).

Iako su ti odnosi različiti za različite kategorije proizvoda, zavisnost se jediničnih troškova proizvodnje općenito može prikazati nekom eksponencijalnom funkcijom s eksponentom $n < 1$.

Zbog toga, osobito u bazičnoj industriji, gdje je utjecaj toga činioca najjači, općenito se teži koncentraciji proizvodnje u malobrojnim postrojenjima velikog kapaciteta, često povezanim s postrojenjima za izravnu upotrebu dijela proizvoda.

Dakako, postrojenja s proizvodnim kapacitetom većim od potražnje njihovih proizvoda ne mogu biti potpuno iskorištena. Postrojenjima s kapacitetom premalenim za pokriće potražnje ne može se iskoristiti ekonomski potencijal tržišta.

Rentabilnost je proizvodnje tada manja od one koja se može postići proizvodnjom primjereno kapacitiranim postrojenjima.

Primjeravanje kapaciteta postrojenja, koja treba projektirati, potražnji određuje se pomoću ispitivanja tržišta. U prvom redu treba odrediti tzv. interval tržišta (potencijalno područje prodaje proizvoda u uvjetima ravnoteže ponude i potražnje), pa su ta istraživanja u uskoj vezi s određivanjem lokacije nove proizvodnje.

Besprijekorno primjeravanje kapaciteta nekog postrojenja treba obuhvatiti i predviđanja njegove ekspanzije u skladu s ekspanzijom tržišta. Zato je potrebno odrediti rast ponude i potražnje proizvoda na tržištu kao funkciju vremena. To je, opet, u uskoj vezi s računom rentabilnosti proizvodnje tog postrojenja s obzirom na investicijske troškove i konkurenciju, pa zahtijeva procjenu tih troškova prema kapacitetu i predviđanje razvoja drugih postrojenja za proizvodnju onih proizvoda koji mogu utjecati na tržište.

Lokacija procesnih postrojenja proučava se samo kad se predviđa gradnja potpuno novih postrojenja takvog proizvodnog kapaciteta koji zahtijeva i opravdava gradnju svih potrebnih pratećih postrojenja (tzv. servisa) i infrastrukture. Inače se izravno pristupa proširivanju već postojećih postrojenja.

Međutim, ni tada izbor lokacije ne ovisi samo o ekonomskim razlozima. Ponekad se nova postrojenja lociraju u političkim središtima prema širim planovima industrijalizacije. Pri tom nije toliko važna financijska rentabilnost koliko je to perspektiva društveno-ekonomskog razvoja sredine.

Iako lokacija novih postrojenja može biti predodređena uvjetima dobivanja sirovina, kapacitetom njihovih ležišta ili drugim uvjetima koje nameću zemlje u kojima se dobivaju te sirovine. Osobito je to često u proizvodnji i preradi nafte i rijetkih minerala.

Kad je lokacija procesnih postrojenja ovisna o ekonomskim uvjetima, zahtijeva se u ovisnosti o smještaju da se postignu najpovoljniji troškovi proizvodnje. Obično na to utječu troškovi vanjskog transporta sirovina i proizvoda, ali mogu biti i mnogi drugi (npr. troškovi eksploatacije, amortizacije).

Osnovna dilema pri tom može biti da li postrojenje locirati u već industrijaliziranoj ili neindustrijaliziranoj zoni. Prva od tih alternativa obično nudi već postojeće infrastrukture, korisnije veze s drugim industrijama i veće tržište, a druga jeftiniju radnu snagu, veće mogućnosti kasnijih proširenja, povoljnije kreditiranje. Često karakteristike postrojenja omogućuju prvu orijentaciju u toj, tzv. fazi *makrolokacije*. Obično je opravdana decentralizirana lokacija bazične industrije velikog kapaciteta s integriranim proizvodnim ciklusom, koja prerađuje jeftine osnovne sirovine u blizini izvora tih materijala. Suprotno, obično je povoljnije locirati postrojenja industrije sekundarnih proizvoda u razvijena središta, jer je u njima obično jeftinija infrastruktura, lakše osiguranje kvalificiranog kadra i ekonomičniji plasman proizvoda.

U drugoj, tzv. fazi *mikrolokacije* definitivno se određuje mjesto na kojem treba graditi postrojenje. Među ostalim, pri tom su važni topografski uvjeti, svojstva terena, hidrološke i meteorološke prilike, uvjeti važni za dispoziciju otpacima.

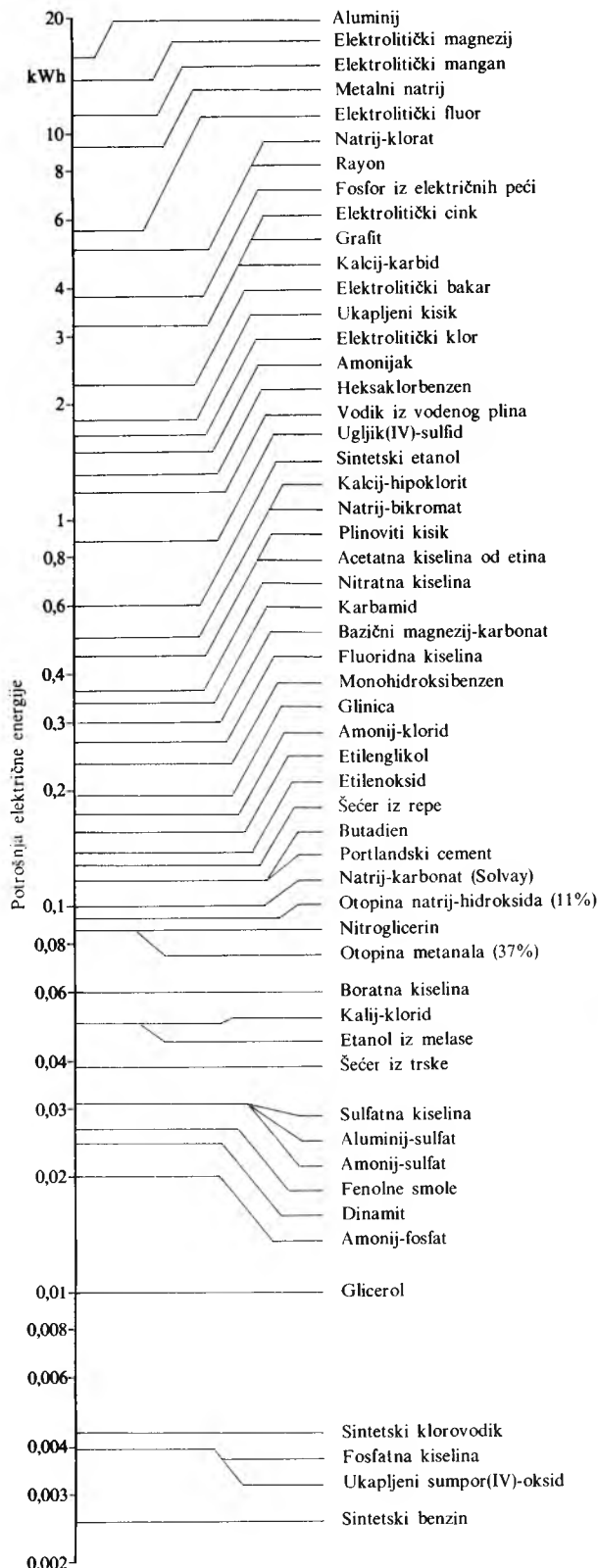
Uvjeti opskrbe sirovinama. Da bi neko mjesto bilo povoljno za lokaciju postrojenja, na njemu moraju vladati uvjeti za izravnu opskrbu sirovinama ili barem za njihovu ekonomičnu dopremu. Za to je potrebno ispitati ne samo da li predviđeni izvori tih sirovina mogu ekonomično zadovoljiti potrebe prema predviđenom kapacitetu postrojenja nego da li će to moći i u budućnosti, uzevši u obzir i njegovu ekspanziju.

Glavni činilac su transportni troškovi. Zbog toga je obično povoljno locirati postrojenja kojima se za dobivanje razmjerno malih količina proizvoda procesiraju velike količine sirovina blizu izvora tih materijala. Međutim, ako su razlike količina sirovina i proizvoda koji se dobivaju od njih malene, lokacija za to potrebnih postrojenja u blizini izvora nije toliko bitna. Najbolji su primjer za to rafinerije nafte koje se lociraju i na vrlo velikim udaljenostima od njenih nalazišta.

Uvjeti opskrbe energijom utječu na lokaciju postrojenja koja treba projektirati često na analogan način. Ipak, taj se

dio problema lokacije najčešće može riješiti jednostavnije, jer se izvori energije lakše mogu supstituirati jedni drugima.

Obično se pri tom radi o električnoj energiji za pogon elektromotora, regulacijskih sustava, za rasvjetu, a ponekad i za same procese (npr. u elektrotermijskim, elektrokemijskim procesima), te o izvorima topline za sve procesne korake i servise povezane s grijanjem. Osnovni podaci za analize u vezi s tim izvorima jesu potrebe predviđenih postrojenja.

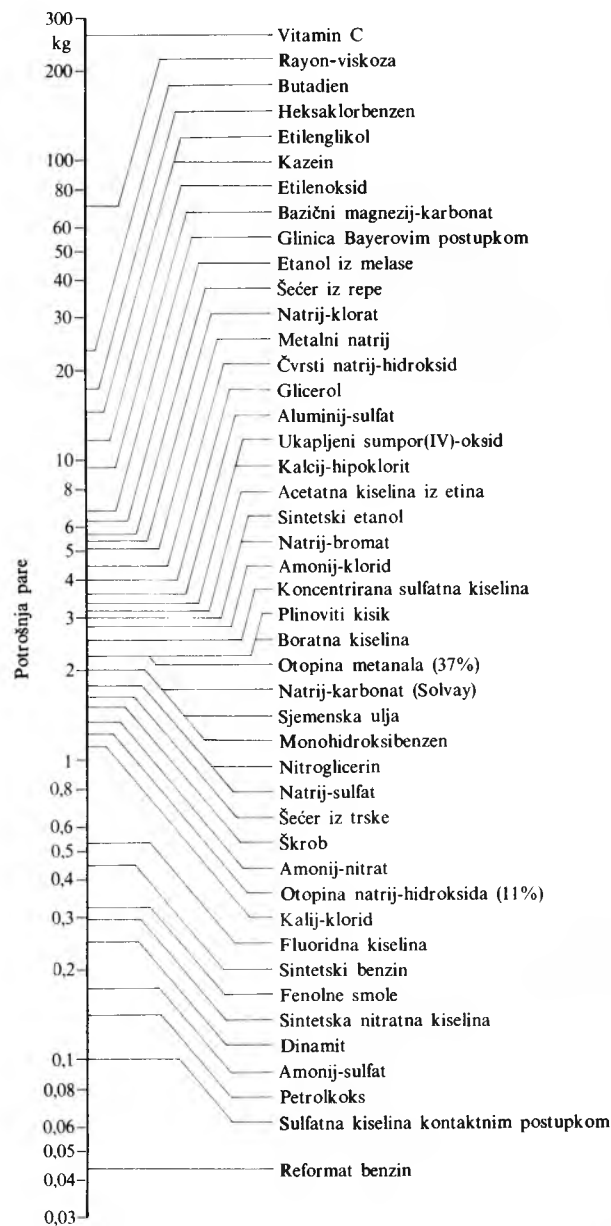


Sl. 8. Potrošnja električne energije za dobivanje 1 kg proizvoda u nekim postrojenjima procesne tehnike

Podaci o utrošku električne energije za dobivanje 1 kg proizvoda prikladni za preliminarna razmatranja u razvoju postrojenja, kao što su na sl. 8, obično se mogu naći u priručnicima. Izravno su upotrebljivi u razmatranju razvoja postrojenja malog i srednjeg kapaciteta koja treba opskrbljivati električnom energijom iz vanjske mreže. Za preliminarna razmatranja razvoja velikih postrojenja koja treba autonomno opskrbljivati električnom energijom ti se podaci lako konvertiraju u podatke o potrošnji goriva za vlastitu proizvodnju te energije.

Za razliku od električne energije, toplina se u procesnim postrojenjima skoro uvijek proizvodi autonomno. Zbog raznolikosti za to potrebnih goriva teže se nalaze svi analogni podaci o njihovoj potrošnji. Od podataka koji se mogu upotrijebiti za proračunavanje te potrošnje u priručnicima obično služe samo podaci o potrošnji procesne pare (sl. 9). Ostali se najčešće moraju dobiti ili proračunati iz drugih izvora.

Troškovi nabave goriva mogu mnogo utjecati na lokaciju postrojenja koje treba projektirati, jer su vrlo zavisni od troškova njihove dopreme, a ti često rastu proporcionalno s duljinom transporta. Ti su utjecaji manji u zonama u kojima



Sl. 9. Potrošnja pare za dobivanje 1 kg proizvoda u nekim postrojenjima procesne tehnike

postoje distribucijske mreže kapljevityh i plinovityh goriva. Mnogo su nepovoljniji za postrojenja izolirana od središta opskrbe. U analizi tih uvjeta, posebno za manja postrojenja, može biti osobito važno utvrditi da li se isplati primjena alternativnog loženja raznovrsnim gorivima, već prema fluktuacijama njihovih cijena. Obično je analiza troškova loženja jednostavnija u postrojenjima u kojima se prerađuju sirovine za proizvodnju goriva i njihove preradevine, kao što su, npr., postrojenja za preradu nafte, ugljena, proizvodnju petrokemikalija, jer je njihova opskrba energijskim gorivom autonomna.

Uvjeti opskrbe vodom vrlo su često presudni za lokaciju procesnih postrojenja, jer je potrošnja vode tih postrojenja (sl. 10) obično vrlo velika. (Dakako, tome treba dodati i

potrošnju vode za proizvodnju pare.) Zbog toga opskrba tih postrojenja vodom iz vanjske mreže rijetko dolazi u obzir. Opskrba vodom autonomnim postrojenjima (vlastitim crpilištima, sredstvima za pripremu i recirkulaciju), iako skoro uvijek tehnički ostvarljiva, može biti mnogo manje, odnosno više povoljna na jednoj nego na drugoj lokaciji.

Dispozicija otpacima. Uvjeti dispozicije otpacima u posljednje su vrijeme sve važniji za lokaciju procesnih postrojenja, jer se postavljaju sve strožiji zahtjevi. Analiza dispozicije otpacima obuhvaća utvrđivanje prisutnosti i koncentracije štetnih sastojaka u otpadnim proizvodima, vodama i plinovima, te potrebnu zaštitu i troškove da se oni učine neškodljivima prije dovođenja u kontakt s okolišem u skladu sa svojim karakteristikama.

Uvjeti tržišta i transporta. Blizina procesnih postrojenja tržištu može biti povoljna i kad se njihovom proizvodnjom dobivaju mnogo veće količine proizvoda nego što se troši sirovina, kad su proizvodi osjetljivi ili lako pokvarljivi, ili kad su samo lokalno važni.

Smanjenje transportnih troškova uvijek je osnovni motiv. Pri tom se razmatra raspoloživost transportnih veza i brzina transporta. Budući da transport sirovina i proizvoda može biti veoma različit, može biti potrebna usporedbena analiza dopreme sirovina i otpreme proizvoda za nekoliko alternativnih lokacija. Obično lokacije na kojima vlada konkurencija među različitim transportnim sredstvima osiguravaju djelotvornost tog transporta i smanjenje transportnih troškova. Loše transportne veze mogu ne samo uzrokovati previsoke transportne troškove nego i zahtijevati velike zalihe, a time i velike kapacitete skladišta, što povećava investicijske troškove. Posljedice toga mogu biti nepovoljno zaleđivanje kapitala, a i duži prekidi dopreme i otpreme, pa i prekidi proizvodnje.

Kako transportni troškovi rastu s brzinom transporta, često je potrebno osigurati lokaciju postrojenja koja za proizvodnju troše mnogo jeftinih sirovina prikladnih za dopremu vodenim putovima ili željeznicom. Cestovni transport obično je potreban samo za detaljnu i brzu otpremu.

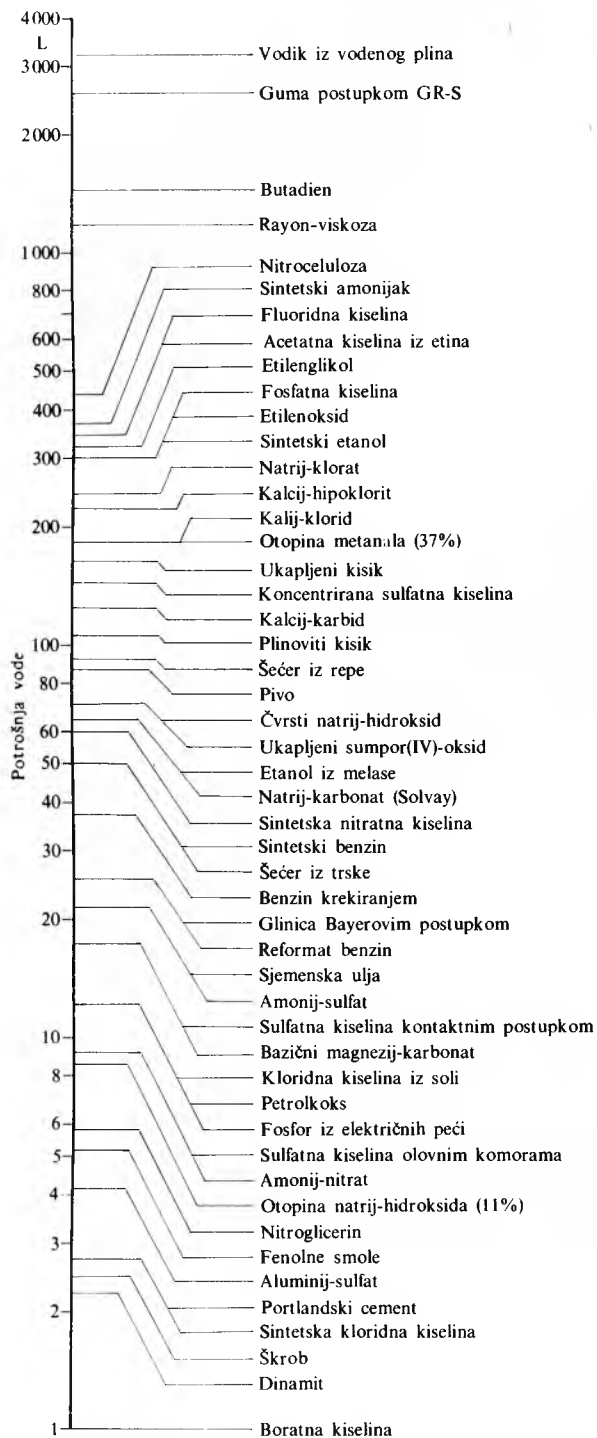
Raspoloživost kadrova može utjecati na lokaciju procesnih postrojenja, usprkos tome što visoki stupanj suvremenog tehnološkog razvoja omogućuje široku automatizaciju procesa. Lokacije u industrijski već razvijenim zonama obično omogućuju lako osiguranje kadrova za vođenje svih poslova u gradnji i pogonu tih postrojenja. Lokacije u slabo industrijaliziranim zonama obično lako omogućuju jeftinu nekvalificiranu radnu snagu, ali zahtijevaju ili izobrazbu stručnih kadrova, ili dovođenje kadrova iz razvijenih zona, uvijek uz velike teškoće i troškove.

Fiskalni i kreditni uvjeti mogu također biti vrlo utjecajni u izboru lokacije procesnih postrojenja. Da bi se favorizirao industrijski razvoj nekih zona, često se na njima smanjuju opći porezi i društveni doprinosi, daju se povoljni kreditni uvjeti i nudi sudjelovanje u investicijskim troškovima. Međutim, u analizi tih pogodnosti uvijek treba uzeti u obzir oskudicu infrastruktura i općih servisa koja obično vlada na tim lokacijama. Zbog toga su potrebna dodatna ulaganja koja mogu učiniti te prednosti beskorisnima.

Ostali uvjeti manje utječu na izbor lokacije procesnih postrojenja. Jedan od njih može biti traženje što ravnijeg terena, što bolje nosivosti i što niže cijene. Neki drugi može biti traženje zona s povoljnijim klimatskim prilikama s obzirom na troškove koji su zavisni od toga (npr. izolacija građevina, troškovi grijanja, smještaja i zdravstvene zaštite osoblja).

Istraživanje u razvoju procesnih postrojenja

Istraživanje za gradnju procesnih postrojenja može obuhvaćati sve stadije od fundamentalnog do procesnog. Pri tom se pod fundamentalnim istraživanjem razumijeva razvijanje novih spoznaja o principima jediničnih operacija i procesa, te vođenja procesa teorijskim proučavanjem i eksperimentiranjem usmjerenim objašnjavanju mehanizama procesnih ko-



Sl. 10. Potrošnja vode (litara) za dobivanje 1 kg proizvoda u nekim postrojenjima procesne tehnike

raka (npr. proučavanje prijelaza tvari, kinetičkih mehanizama industrijskih reakcija).

Sljedeća faza istraživanja obuhvaća dalje proučavanje pojedinih reakcija koje bi se mogle iskoristaviti u industriji. Pri tom se eksperimentiranjem u laboratorijskoj aparaturi utvrđuju najbolji uvjeti i traže najprikladniji katalizatori za izvođenje tih reakcija. Svrha im je dobivanje odgovora na pitanje da li su tim reakcijama ostvarljivi ekonomski rezultati koji obećavaju uspjeh.

Ako je odgovor na to pitanje pozitivan, pristupa se tzv. procesnom istraživanju. Pod tim se razumijeva utvrđivanje činilaca radnog režima industrijskog procesa na osnovi rezultata iz prethodne faze istraživanja, koji moraju biti poznati za preliminarnu ekonomsku analizu, te podataka za projekt industrijskog, odnosno, ako je i to potrebno, i pilotskog postrojenja. Za razliku od istraživanja u prethodnoj fazi, koje je razmjerno jeftino, procesna istraživanja već su dosta skupa, jer zahtijevaju složeniju aparaturu i veće troškove provedbe. Na osnovi nekih statističkih podataka grubo se računa da su troškovi procesnog istraživanja, istraživanja na pilotskom, odnosno industrijskom postrojenju u omjeru 1:10:200. Zbog toga se istraživanja na pilotskom postrojenju obično provode na teret investicijskih troškova i ubrajaju se u radove na projektu procesa.

Projektiranje procesa

Proces se projektira samo ako se radovima na prethodnim fazama razvoja utvrdi da je on tehnički provedljiv i da su povoljni izgledi za prodaju njegovih proizvoda. Projektiranje obuhvaća projekt i gradnju pilotskog postrojenja, provedbu istraživanja na tom postrojenju s koreliranjem time dobivenih podataka, a završava se projektiranjem industrijskog postrojenja s ekonomskom analizom.

Od glavnih dokumenata koji se moraju dobiti tim radovima već za projekt pilotskog postrojenja mora biti izrađena dovoljno točna shema procesa. Pod tim se razumijeva prikaz redosljeda procesnih koraka i za to potrebnih aparatura, s njihovim vezama za transport sustava koji se procesira.

Pilotsko postrojenje i ispitivanja na njemu. Ponekad se industrijska aparatura može dimenzionirati pomoću podataka dobivenih istraživanjem u prethodnoj fazi, pa nisu potrebna ispitivanja na pilotskom postrojenju. Međutim, češće se događa da nakon istraživanja ostaju još problemi koji se mogu racionalno riješiti samo ispitivanjem na pilotskom postrojenju. Osim tehničkih, to mogu biti i ekonomski problemi, rješavanje kojih zahtijeva ispitivanje tržišta pomoću malih količina proizvoda predviđenih novim procesom.

Zbog visokih troškova ispitivanja na pilotskom postrojenju treba pri njegovu projektu optimalno uskladiti dva suprotno djelujuća činioca. Jedan je od njih potreba ograničenja investicijskih troškova ograničavanjem dimenzija i pojednostavnjivanjem aparature. Međutim, time se smanjuje sličnost funkcioniranja pilotskog i industrijskog postrojenja, pa se ograničuju mogućnosti dobivanja pouzdanih podataka iz pilotske proizvodnje. Drugi je činilac da se zbog potrebe povećanja te pouzdanosti odaberu što veće dimenzije pilotskog postrojenja i da ono u svim pojedinostima bude što sličnije industrijskom. Osim toga, pilotsko postrojenje mora biti fleksibilno i mora dopuštati jednostavno vođenje. Fleksibilnost je pilotskog postrojenja potrebna da bi se mogli lako mijenjati činioci režima procesa kojima treba promatrati utjecaj.

Obično je mnogo činilaca režima procesa koje treba ispitati na pilotskom postrojenju, a njihova međuzavisnost zamršena. Zbog toga je obično korisno prethodno utvrditi utjecaje koji se mogu proračunati iz poznatih podataka, pa njihove činioce isključiti iz promatranja, te podrobno programirati ta ispitivanja uz primjenu statističkih kriterija.

Ispitivanjem na pilotskom postrojenju moraju se dobiti podaci i za projekt procesa i za projekt aparature industrijskog postrojenja. Podaci koji se dobivaju moraju se obraditi i prikazati u formi prikladnoj za njihovu upotrebu.

Osim za te svrhe, pilotsko postrojenje mora biti iskoristljivo i za istraživanja potrebna u fazama razvoja nakon komercijalizacije novog procesa (npr. za nalaženje povoljnijih uvjeta vođenja procesa, modifikacije proizvoda).

Dalje projektiranje industrijskog procesa jest dotjerivanje opisa, započetog izradom sheme procesa, pomoću podataka iz literature i iz prethodnih faza istraživanja, osobito istraživanja na pilotskom postrojenju, ako su i ona bila obuhvaćena. Pri tom se određuju raspored aparature i uvjeti funkcioniranja pod kojima se ostvaruje najekonomičnija proizvodnja, tj. provodi se ekonomsko optimiranje procesa.

Za to je često potrebno razmatranje nekoliko alternativa. Zbog mnogo varijabli koje utječu na funkcioniranje čitavog postrojenja obično je nemoguće tradicionalnim sredstvima provesti za to poželjnu kompletnu analizu, pa se danas ti poslovi sve više obavljaju pomoću elektroničkih računala.

Za primjenu tih metoda potrebno je definirati skup relacija (matematički model) koje analitički simuliraju proces. Relacije u tom skupu mogu se shematski grupirati u vezne, dimenzijske i funkcijske. Pod veznim relacijama razumijevaju se izrazi koji povezuju zavisne s nezavisnim operativnim parametrima (bilance materijala i energije, termodinamičke relacije). Dimenzijske relacije povezuju jednu ili više karakterističnih dimenzija aparature s nezavisnim varijablama i upotrebljavaju se za određivanje investicijskih troškova. Funkcijske relacije prikazuju veze među nezavisnim varijablama i uvjetima funkcioniranja, te omogućuju određivanje eksploatacijskih troškova.

Matematički model treba omogućiti i postavljanje funkcije ukupnih troškova. Nakon toga može se odrediti minimum te funkcije i s njime asociirani niz optimalnih vrijednosti nezavisnih varijabli, s kojima se može pristupiti definitivnom dimenzioniranju aparature.

Dokumentacija koju treba dobiti projektom industrijskog procesa, da bi se nakon toga moglo pristupiti radovima na projektu postrojenja, obuhvaća ne samo bilance materijala i energije već i, za to potrebnim podacima dopunjene, tzv. kvantificirane sheme procesa, procesne specifikacije (specifikacije režima procesa), s proračunom osnovnih dimenzija aparature, kao što su, npr., visine punjenja kolona, volumeni posuda i popratne tekstualne opise.

Za pojednostavnjenje i opće razumijevanje dokumentacije projekta procesa, što je potrebno da se lako mogu upotrebljavati svi specijalisti koji sudjeluju u poslovima na projektu postrojenja u užoj vezi s procesom, općenito je važna primjena nekih sustava simbola.

Iako na tom području još ne postoje obvezni međunarodni standardi, skoro se općenito upotrebljavaju norme koje su za to uobičajene u SAD, ili njima vrlo slične. Među ostalim, one obuhvaćaju slovne i grafičke simbole za pojedine procesne aparate i strojeve (tabl. 5 i sl. 11), kontrolne aparate (tabl. 6 i sl. 12), te procesne cijevne, komandne cijevne i električne linije (sl. 13 i sl. 14).

Tablica 5
JEDAN OD SUSTAVA SLOVNIH SIMBOLA
PROCESNIH APARATURA I STROJEVA.

C	Kompresori, puhala
D	Akumulatori, separatori kapljevina, recipijenti (i s mješalom)
E	Izmjenjivači topline
F	Peći
M	Mlinovi
P	Crpke
R	Reaktori, autoklavi
S	Rezervoari, gazometri, silosi
T	Tornjevi, kolone
V	Ventilatori
CE	Centrifuge
CR	Kristalizatori
DE	Dekantatori
DR	Sušionici
EJ	Ejktori
ES	Ekstruderi
EV	Isparivači
FI	Filtri
MS	Miješalice za čvrste tvari
TS	Transporteri čvrstih tvari
TU	Turbine
VA	Sita

Kvantificirane sheme procesa (sl. 15) zapravo su već spomenute sheme procesa, dotjerane podacima koji u sljedećoj fazi projektiranja (projektiranje postrojenja) omo-

Sl. 11. Jedan od sustava grafičkih simbola procesnih aparata i strojeva

Tablica 6
JEDAN OD SUSTAVA SLOVNIH SIMBOLA KONTROLNIH APARATA

Varijabla koja se kontrolira	Regulatori			Regulacijski ventili	Registratori	Pokazivači	Alarmi			Detektorski elementi	Uredaji za motrenje	Termometarska kućišta	Sigurnosni ventili
	registrirajući	pokazni	slijepi				registrirajući	pokazni	slijepi				
Sastav	CRC	CIC	CC		CR	CI	CRA	CIA	CA	CE			
Gustoća	DRC	DIC	DC		DR	DI	DRA	DIA	DA				
Dobava	FRC	FIC	FC	FCV	FR	FI	FRA	FIA	FA	FE	FG		
Razina	LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LRA	LIA	LA		LG		
Vlažnost	MRC	MIC	MC		MR	MI	MRA	MIA	MA	ME			
Tlak	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PRA	PIA	PA	PE			
Brzina vrtnje	SRC	SIC	SC	SCV	SR	SI		SIA	SA				
Temperatura	TRC	TIC	TC	TCV	TR	TI	TRA	TIA	TA	TE		TW	
Viskoznost	VRC	VIC			VR	VI	VRA	VIA					
Težina	WRC	WIC			WR	WI	WRA	WIA		WE			
pH	pHRC	pHIC	pHC		pHR	pHI							
Omjer dobava			rFC										
Razlika tlakova	ΔPRC	ΔPIC	ΔPC		ΔPR	ΔPI	ΔPRA	ΔPIA	ΔPA	ΔPE			
Koncentracija kisika	O ₂ RC	O ₂ IC	O ₂ C		O ₂ R	O ₂ I	O ₂ RA	O ₂ IA	O ₂ A	O ₂ E			PSV SSV TSV

Odašiljač		Generički aparat		Generički aparat s dvostrukom funkcijom	
montiran lokalno	na komandnoj ploči	montiran lokalno	na komandnoj ploči	montiran lokalno	na komandnoj ploči
Izvršni organi (ventili)					
ručni	automatski operirani				
	zračnim motorom	elektromotorom	fluidički (stapom)		
			općenito	pneumatski	hidraulički

Sl. 12. Jedan od sustava grafičkih simbola kontrolne aparature procesnih postrojenja

Procesne cijevne linije			Servisne cijevne linije	Komandne cijevne linije			Komandne električne linije
jednostavne	s plaštem	s pratećim parovodom		hidrauličke	pneumatske	kapilare	

Sl. 13. Jedan od sustava simbola procesnih, servisnih i komandnih linija za crtanje procesnih shema

Prolazni ventil	Kutni ventil	Leptirski ventil	Prigušni ventil	Membranski ventil	Ventil s iglom
Kuglasti ventil	Protupo-vratni ventil	Ventil za brzo otvaranje	Sigurnosni ventil	Slavina	Trokraka slavina
Četvero-kraka slavina	Zasun	Linijski filtar	Ekspanzijski kompenzator	Linijski separator	Kondenzni lonac
Y-odmu-ljivač	Otvoreni ispu-st u kanal	Pregrada s otvorom za suženje	Proboj-ni disk	Reduk-cijski komad	Ispust uzorka
Hlađeni ispu-st uzorka	Blindi-rani ispu-st	Priključak šmrka	Oznaka nacrtne pozicije	Oznaka tempe-rature	Oznaka tlaka

Sl. 14. Jedan od načina simboliziranja najvažnije cijevne armature i drugih podataka na linijama procesnih shema

gućuju razvoj procesa do kraja. To dotjerivanje može obuhvatiti i poboljšavanje i izmjene slijeda procesnih koraka, ali uvijek obuhvaća dopune podacima iz bilance materijala i stanja sustava koji se procesira. Među tim podacima osobito su važni podaci o masama i fizikalnom stanju tokova

materijala u procesnim linijama, njihovim tlakovima i temperaturama. Oni su potrebni za definitivni izbor konstrukcijskih materijala i dimenzioniranje aparature, uključujući i procesne cijevne linije, u projektiranju postrojenja.

Podaci iz kvantificiranih shema procesa nisu dovoljni za dimenzioniranje cijevnih linija. Za to je potrebno poznavati još i duljine i oblike tih linija, a ti se podaci mogu odrediti tek nakon provedbe prvih faza projektiranja postrojenja.

U fazi projektiranja procesa još nisu potrebni podaci o servisnim i komandnim vezama aparature, ni podaci o armaturi cijevnih instalacija, pa se oni i ne prikazuju u kvantificiranim shemama procesa.

Projektiranje procesnih postrojenja. Projektiranje procesnih postrojenja počinje izradbom definitivnih, tzv. pogonskih shema procesa (sl. 16). Kao osnovni dokumenti projekta postrojenja, te sheme moraju prikazivati svu aparaturu i sve njene cijevne i druge veze koje mogu biti potrebne za vođenje procesa (procesne, servisne i komandne), uključujući i armaturu potrebnu za njihovo funkcioniranje.

Te se sheme mogu bitno razlikovati od prethodnih zbog različitih razloga. Tako, npr., u kontinuiranim procesima, kao u prikazanom primjeru, može biti potrebno udvostručenje nekih dijelova aparature rezervima da se smanji rizik od prinudnih prekida pogona. Obično su to dijelovi koji se kvare lakše od ostalih zbog toga što sadrže više pokretnih dijelova (osobito crpke i njima slični strojevi).

S izradbom pogonskih shema procesa kompletirani su podaci za definitivno dimenzioniranje strojeva i aparata koji se nabavljaju od specijaliziranih proizvođača i izbor njihovih konstrukcijskih materijala. U normalnoj organizaciji projektiranja procesnih postrojenja poslove oko tog dimenzioniranja i izbora provode specijalisti za procesnu tehniku (procesni inženjeri) u suradnji sa strojarskim inženjerima (u vlastitoj ili drugim specijaliziranim organizacijama).

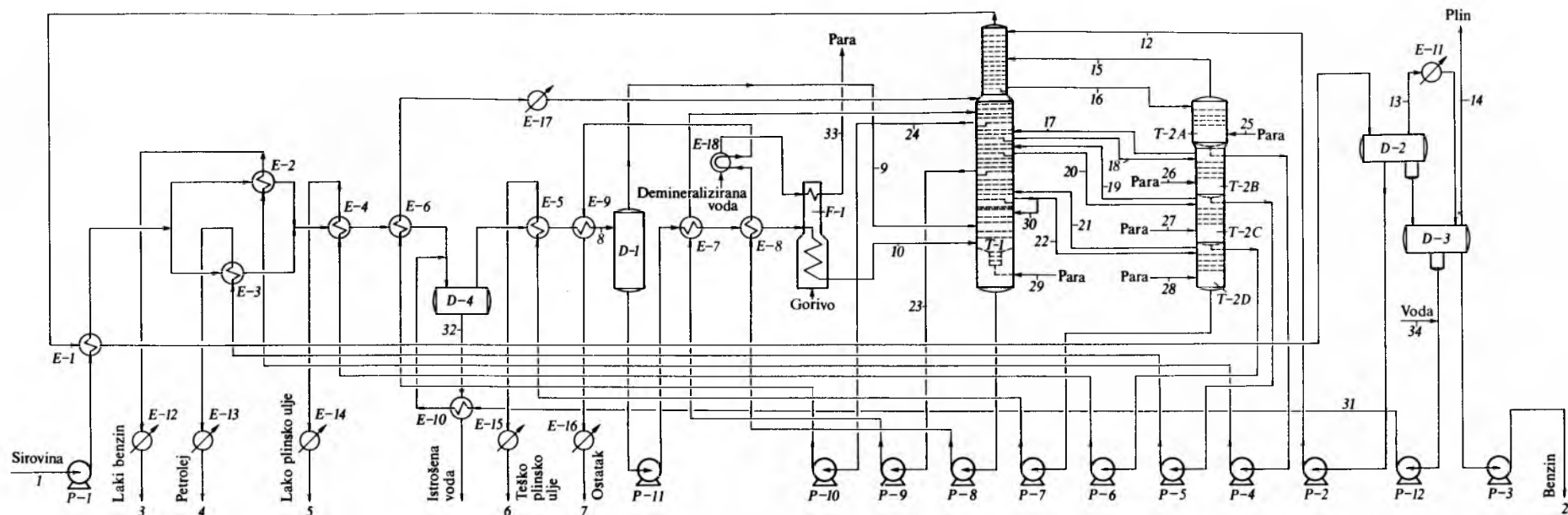
Tim se radom moraju dobiti podaci dovoljni za rad na sljedećim fazama projektiranja postrojenja: izrada prikaza prostornog razmještaja aparature (ugradbene mjere aparata i strojeva), konstrukcija i nabava opreme koja se mora posebno izraditi. Najprikladnije je prikazati te podatke na specifikacijskim obrascima, kako to čine organizacije specijalizirane za projektiranje i proizvodnju procesne opreme.

Ti se obrasci mogu manje ili više razlikovati vanjskom formom, ali uvijek sadrže iste općenite rubrike za upis podataka za iste aparate ili strojeve.

Općenite rubrike specifikacijskih obrazaca služe za brzu identifikaciju predmeta o kojemu se radi. To su nazivi organizacije koja utvrđuje specifikaciju i naručitelja, naziv i broj aparata koje treba nabaviti, odnosno konstruirati, njihove pozicije i naziv sheme u kojoj su navedene, te broj ugovora.

Tehnički podaci koje moraju pružiti specifikacijski obrasci, npr. za crpke, jesu njihova vrsta, karakteristike fluida što ga trebaju transportirati (vrsta, gustoća, viskoznost, tlak para, ledište, priroda i sadržaj) u njemu suspendiranih čvrstih tvari, agresivnost, pogonski uvjeti (dobava, tlačna i usisna visina, radni tlak i temperatura, stupanj iskorištenja, potrebna snaga, brzina vrtnje), konstrukcijske karakteristike (broj i tip rotora, tip sklopke, sustavi održavanja, hlađenja ili grijanja, vrsta spojke, orijentacija priključaka, ispitni tlak), vrsta konstrukcijskih materijala (za kućište, rotor, vratilo, brtve i druge dijelove), karakteristike pogonskog motora (ako je električni, vrsta, napon i frekvencija napojne mreže, instalirana snaga, broj polova i brzina vrtnje; ako je turbinski, tip, i, osim instalirane snage, još i tlak i temperatura pogonske pare, te ispušni tlak). Osim tih, moraju biti predviđene još i rubrike za specijalne podatke, napomene i potpise odgovornih osoba.

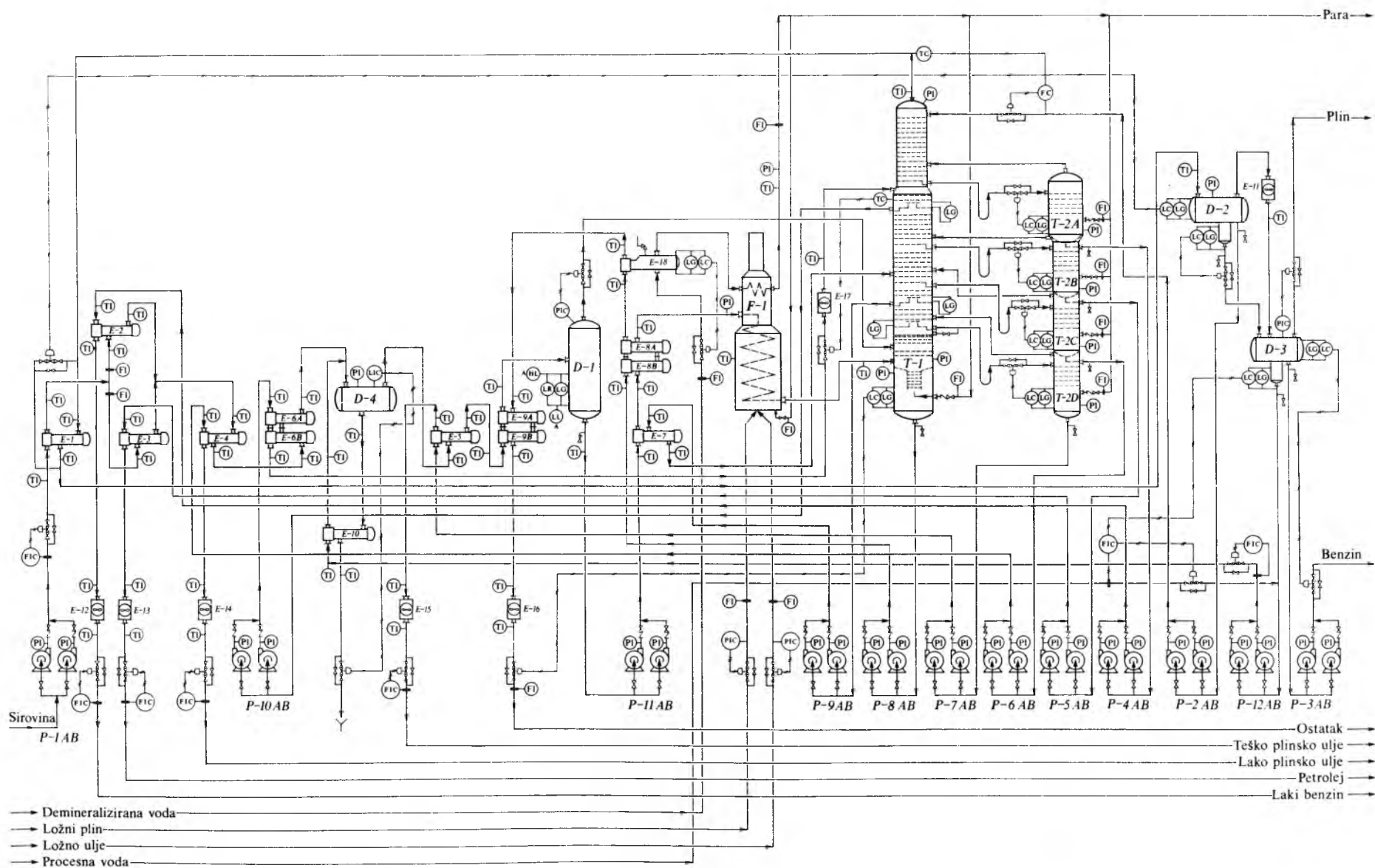
Za upotrebu tehničkih podataka iz specifikacijskih obrazaca procesnih aparata ti dokumenti obično moraju biti popraćeni i mjernim skicama u kojima, osim glavnih i ugradbenih dimenzija, moraju biti prikladno pozicionirani dijelovi što ih treba opisati u obrascu. Od općih informacija, uz već navedene, takve specifikacije sadrže dalje tehničke podatke. Npr. za izmjenjivače topline osnovni među njima obično su tip aparata, količina topline koju aparat mora prenositi, površina kroz koju se mora obaviti taj prijenos i njen ukupni koeficijent prijelaza. Pogonske i mehaničke karakteristike tih aparata i karakteristike fluida među kojima se treba odvijati izmjena topline moraju se u specifikacijskim obrascima prikazati odvojeno za prostor oko cijevi i između njih. Obično su to vrsta, sastav, toplinska vodljivost, specifična toplota, latentna toplota isparivanja, ulazne i izlazne temperature fluida, radni tlakovi i gubici tlakova u aparatu, procesni i ispitni tlakovi, metode ispitivanja, vrsta konstrukcijskih materijala, stupanj djelovanja i način provjere varova, te potrebno povećanje debljina stijenki zbog agresivnosti fluida. Posebno se moraju specifiirati priključci (njihova pozicija u skici i funkcija, vanjski i unutrašnji promjer i norma kojoj moraju odgovarati). Konstrukcijski podaci za te aparate moraju obuhvaćati broj prolaza fluida kroz prostor u cijevima i oko njih, norme kojima moraju odgovarati cijevi, njihov vanjski promjer i debljinu stijenki, broj komada po prolazu i ukupno, njihov razmak i korisnu duljinu, način njihova fiksiranja, tip podnica, naliči i način oslanjanja posude.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Ugljikovodici reda C ₂ kg/h	70																																	
Ugljikovodici reda C ₃ kg/h	680																																	
i-butani kg/h	495																																	
n-butan kg/h	1950																																	
i-pentani kg/h	1590																																	
n-pentan kg/h	2500																																	
Benzin kg/h	20830	27450																																
Laki benzin kg/h	14740		14740																															
Petrolej kg/h	12800			12800																														
Lako plinsko ulje kg/h	18150				18150																													
Teško plinsko ulje kg/h	14780					14780																												
Ostatak kg/h	107600						107600																											
Voda kg/h	1150							1150	910	220	3375	40	3335		230		190		260		205				240	200	270	210	1350		15800	15800	4400	12465
Ukupno ugljikovodici kg/h	196185	27450	14740	12800	18150	14780	107600	196185	7160	189025	55720	27650	28070	630	5050	19780	4465	17255	6245	24395	5135	19905	139700	171450						50855				
Ukupno kg/h	197335	27450	14740	12800	18150	14780	107600	197335	8070	189245	59095	27690	31405	630	5280	19780	4655	17255	6505	24395	5340	19905	139700	171450	240	200	270	210	1350	50855	15800	15800	4400	12465
Stanje	K	K	K	K	K	K	K	P/K	P	K	P	K	P	P	P	K	P	K	P	K	P	K	K	K	P	P	P	P	P	K	K	K	P	K
Temperatura °C	12	46	35	45	56	56	85	165	165	350	120	100	100	45	145	150	215	220	245	248	305	310	280	185	370	370	370	370	370	310	95	130	370	30
Pretlak bar	0,5	0,7	6	6	6	6	6	4	1,5	1,5	1	6,8	0,9	0,8	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3	1,1	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	1,5	12	12	3,5	2

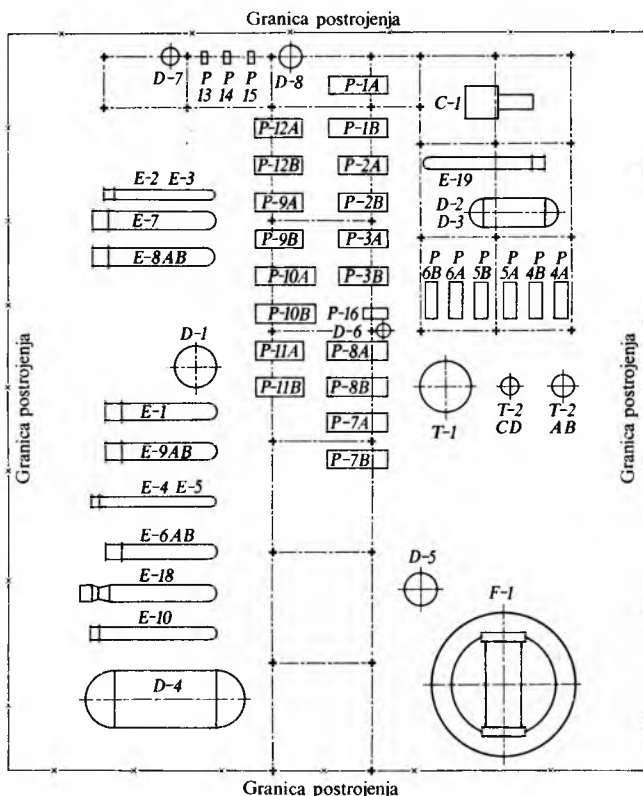
K kapljevito, P parno

Sl. 15. Kvantificirana shema procesa jednog od postupaka atmosfarske destilacije nafte



Sl. 16. Pogonska shema procesa razvijena iz kvantificirane sheme procesa u sl. 15

Za određivanje prostornog razmještaja aparature često zadovoljavaju *planimetrijski prikazi*. To su nacrti s prikazima ukupne potrebne površine za ugrađivanje opreme postrojenja po katovima građevine, s ucrtanim površinama koje će zauzimati pojedini aparati i strojevi (sl. 17), u prikladnom mjerilu (npr. 1:100, 1:200). Rjeđe je u nadležnosti procesnih inženjera izrada još i *elevacijskih prikaza*, tj. nacrti koji prikazuju prostorni razmještaj aparature postrojenja u projektu po visini. Za elevacijski prikaz prostornog razmještaja aparature nekog postrojenja potrebno je nekoliko dobro smišljenih presjeka njegova planimetrijskog prikaza.



Sl. 17. Tlocrt razmještaja aparature postrojenja potrebnog za provedbu procesa prikazanog na sl. 16

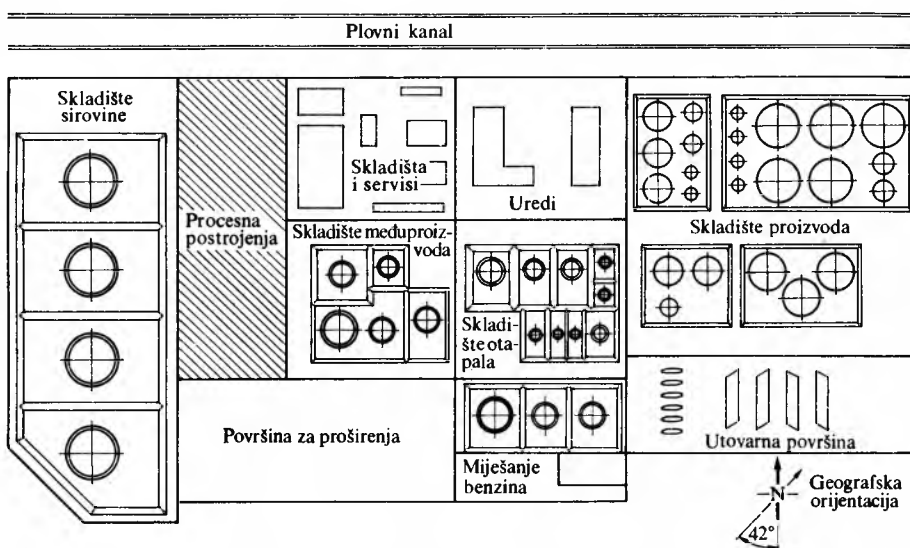
skladišna postrojenja, postrojenja za otpremu i dopremu, servisne radionice, te uredi. Kad su svi ti prikazi gotovi, može se izraditi planimetrijski prikaz razmještaja svih objekata te cjeline (sl. 18). To je osnovni dokument za projekt pripreme lokacije za gradnju, te unutrašnjih i vanjskih veza (instalacije za transport materijala i energije među objektima cjeline i njene unutrašnje prometnice, odnosno utovarna i istovarna postrojenja i instalacije, te prometnice za vezu s javnim prometnicama).

Kad su procesne cijevne instalacije vrlo složene, vrlo je teško definitivno oblikovati i dimenzionirati njihove linije samo na osnovi kvantificiranih i pogonskih shema procesa, i nacrtanih prikaza prostornog razmještaja aparature postrojenja. Tada su vrlo korisne dopune tih dokumenata modelima postrojenja. Ta se pomagala također izrađuju u prikladnom mjerilu, najbolje u istom u kojemu su izrađeni i nacrtani prikazi prostornog razmještaja. Velike organizacije i službe specijalizirane za projektiranje procesnih postrojenja obično raspolažu za to unaprijed pripremljenim dijelovima.

S izradbom specifikacija i modela uglavnom je kompletirana dokumentacija, potrebna za izvedbeni projekt postrojenja, koja je u užoj nadležnosti procesnih inženjera. U oblasti njihova rada na izvedbenom projektu postrojenja ostaje još samo formulacija zadataka za projekte drugih struka (eventualnih daljih uputa za konstrukciju opreme, zadataka za projekt električne instalacije, građevnih, montažnih i izolacijskih radova). Uz potrebna tekstualna objašnjenja, to može biti još i nacrtana dokumentacija kao što su skice za temeljenje i montažu procesnih aparata i strojeva, izradbu kanalizacijskih uređaja, prikazi položaja trošila električne energije (obično na nacrtima prostornog razmještaja) s navodima karakteristika potrošnje.

Radovi na projektiranju procesnih postrojenja završavaju se izradbom spiskova svih nabavki i radova, njihovih troškovnika i rekapitulacija. Ti su podaci potrebni za provjeru točnosti procjena investicijskih troškova učinjenih u fazi preliminarnih razmatranja razvoja, osiguranja njihova pokrića ako potrebni iznosi premašuju ranije osigurana sredstva, te izradbu podloga za ponude od isporučilaca opreme i izvođača radova.

Gradnja procesnih postrojenja. Gradnja procesnih postrojenja u prvom redu zahtijeva pripremu koja, među ostalim, obuhvaća komercijalno-tehničke poslove prikupljanja ponuda, izbor isporučilaca opreme i izvođača radova, te ugovaranje izvedbenih radova i isporuke opreme. U zaključivanju tih poslova traže se najbolja rješenja s obzirom na ponudbene rokove, garancije i financijske uvjete što ih pružaju ponuđači.



Sl. 18. Tlocrt razmještaja objekata rafinerije nafte

Na osnovi podataka kojima se raspolaze nakon izradbe pogonskih shema procesa pojedinih postrojenja neke industrijske cjeline mogu se paralelno s prikazima prostornog razmještaja procesne aparature izraditi i prikazi prostornog razmještaja u drugim objektima te cjeline, kao što su servisna i

Jedan je od osnovnih zahtjeva pri tom da se načelno osigura besprekidno i nesmetano povezivanje raznorodnih radova jednih s drugima.

Tako se, npr. mora osigurati dovršenje građevnih radova od kojih zavisi početak montaže postrojenja u predviđenom roku isporuke opreme, dovršenje prometnica, transportnih veza i postrojenja i veza od kojih zavisi opskrba sirovinama i pomoćnim materijalima, prijenos materijala među pojedinim objektima i otprema proizvoda u roku dovršenja montaže procesnih postrojenja.

Osim izvedbenih radova na podizanju postrojenja, za vrijeme dok oni traju moraju se stvoriti i drugi važni uvjeti da se zatim odmah i nesmetano pristupi pokusnoj, pa redovnoj proizvodnji. Za to je u prvom redu potrebna primjerena izvježbanost osoblja predviđenog za vođenje postrojenja (njegovu proizvodnju i održavanje). Osnovna dokumentacija potrebna za izobrazbu osoblja u obavljanju tih poslova obuhvaća priručnike s uputama za rukovanje pojedinim aparatima i strojevima, za stavljanje u pogon, te redovnu i prisilnu obustavu pogona, za kontrolu funkcioniranja postrojenja, ispravnosti stanja njegovih dijelova, za remont itd.

Pravovremena dostava te dokumentacije predviđenom voditelju postrojenja u nadležnosti je procesnih inženjera koji su sudjelovali u izradi njegova projekta. Obično je njihova obveza da, uz ujedinjavanje svih vrsta radova na podizanju postrojenja, još i izravno kontaktiraju s osobljem izabranim za vođenje proizvodnje i održavanje postrojenja radi osiguranja potpune osposobljenosti za obavljanje s time povezanih poslova.

Vođenje procesnih postrojenja započinje već pri njegovu stavljanju u pokusni pogon, za koji su također odgovorni navedeni projektanti. Međutim, u toj fazi mora se pripremiti prijenos te odgovornosti na osoblje koje će voditi postrojenje u redovnoj proizvodnji, jer se, nakon dokazivanja projektom predviđenih performansi, to mora obaviti i službenom transakcijom (kolaudacijskim zapisnikom). Zbog toga je pri stavljanju u pokusni pogon i u njegovoj provedbi potrebno i sudjelovanje osoblja koje treba preuzeti te funkcije.

Tehničke funkcije daljeg razvoja postrojenja, za koje je odgovoran voditelj u redovnoj proizvodnji, obuhvaćaju modificiranje operativnih varijabli radi njena stalnog poboljšavanja, ispitivanje kakvoće proizvoda radi postizanja njegove sve veće čistoće ili sprečavanja kvarenja, smanjivanje potrošnje pare, vode, energije i sirovina za jedinicu proizvoda radi smanjivanja jediničnih troškova, unapređivanje djelatnosti službe za održavanje postrojenja kako bi se smanjile obustave pogona radi popravka. Osim toga, voditelj postrojenja u redovnom pogonu mora prilagođivati proizvodnju zahtjevima prodaje proizvoda u skladu s uvjetima eksploatacije. U osnovi to je usklađivanje zahtjeva za postizanje kakvoće proizvodnje s istodobnim održavanjem minimuma troškova proizvodnje. To se postiže stalnim proučavanjem metoda i uvjeta rada.

U posljednje vrijeme u obavljanju poslova u vezi s tim optimiranjem sve se više upotrebljavaju statističke metode na elektroničkim računalima. Njihova primjena opravdana je u prvom redu zbog toga što je projektiranje procesnih postrojenja nužno povezano s računanjem na osnovi bar nekih približenja, pa se u redovnom pogonu pojavljuju manja ili veća odstupanja njihova stvarnog od predviđenog ponašanja. Načelno se te metode mogu grupirati u izvanlinijske i unutarlinijske (prema engleskom off-line i on-line). U prva se podaci izvedeni iz pogona proračunavaju na računalu kojim se ne utječe neposredno na proces, a u drugima se uključuje računalo u procesni kontrolni sustav.

Poslovi vođenja proizvodnje, održavanja i unapređivanja procesnih postrojenja složeno se isprepleću. Često služba tehničkog servisiranja postrojenja predlaže popravke, izmjene i poboljšanja, ali o tom obično odlučuju voditelji proizvodnje. Često i službe tehničkog servisiranja same provode modifikacije koje mogu biti korisne za proizvodnju postrojenja ili njeno vođenje.

Prodaja proizvoda, koja je u industriji općenito svrha gradnje i eksploatacije njenih postrojenja, često zahtijeva poslove složenog tehničko-komercijalnog karaktera, pa je za njihovo obavljanje često potrebno tehnički visokoobrazovano

osoblje sa solidnim poznavanjem ekonomskih disciplina. U redovnoj prodaji proizvoda procesne industrije to mogu biti, npr., poslovi istraživanja tržišta, razvoja proizvoda, tehnički servis za kupce, tzv. tehnička prodaja (tj. ona u kojoj prodavači mogu biti samo tehnički obrazovane osobe).

Specijalni poslovi tehničke prodaje proizvoda procesne industrije, za koje su potrebni procesni inženjeri, mogu obuhvaćati prodaju licencija (prava na upotrebu patenata u gradnji ili eksploataciji neke aparature, neke faze procesa ili čitavog industrijskog postrojenja).

LIT.: D. M. Considine, Process Instruments and Controls Handbook. McGraw-Hill, New York 1957. — H. F. Rase, M. H. Barow, Project Engineering of Process Plant. Wiley, New York 1957. — R. E. Johnstone, M. W. Thring, Pilot Plants, Models and Scale-up Methods in Chemical Engineering. McGraw-Hill, New York-Toronto-London 1957. — J. C. Jungers, Cinétique chimique appliquée. Technip, Paris 1958. — D. P. Campbell, Process Dynamics — Dynamic Behaviour of the Production Process. Wiley, New York 1958. — R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport Phenomena. Wiley, New York 1960. — C. H. Chilton, Cost Engineering in the Process Industries. McGraw-Hill, New York-Düsseldorf 1960. — H. Köbel, J. Schultze, Projektierung und Vorkalkulation in der chemischen Industrie. Springer-Verlag, Heidelberg 1960. — D. N. Hanson, J. H. Duffin, G. H. Somerville, Computation of Multistage Separation Processes. Reinhold, New York 1962. — B. D. Smith, Design of Equilibrium Stage Processes. McGraw-Hill, New York 1963. — J. H. Perry, Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, New York-London-Toronto 1963. — J. Hengstenberg, B. Sturm, O. Winkler, Messen und Regeln in der chemischen Technik. Springer-Verlag, Heidelberg 1964. — W. Oppelt, E. Wieke, Grundlagen der chemischen Prozessregelung. R. Oldenbourg Verlag, München 1964. — H. C. Baumann, Fundamentals of Cost Engineering in Chemical Industry. Reinhold, New York 1964. — R. Landau, The Chemical Plant: From Process Selection to Commercial Operation. Halcon, New York 1966. — C. Pratten, R. M. Dean, The Economics of Large Scale Production in British Industry. Cambridge University Press, Cambridge 1965. — A. S. Foust, I principi delle operazioni unitarie. Ambrosiana, Milano 1967. — P. Benedek, A. László, Grundlagen des Chemingenieurwesens. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1967. — R. G. E. Franks, Mathematical Modelling in Chemical Engineering. Wiley, New York 1967. — E. F. Johnson, Automatic Process Control. McGraw-Hill, New York-Düsseldorf 1967. — T. H. Lee, G. E. Adams, W. M. Gaines, Computer Process Control: Modelling and Optimization. Wiley, New York 1968. — D. M. Himmelblau, K. B. Bischoff, Process Analysis and Simulation Deterministic Systems. Wiley, New York 1968. — O. F. Rudd, C. C. Watson, The Strategy of Process Engineering. Wiley, New York 1968. — M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, Plant Design and Economics of Chemical Engineers. McGraw-Hill, New York-London-Düsseldorf 1968. — D. G. Jordan, Chemical Process Development. Interscience, New York-Sidney-London 1968. — J. R. Bright, Technological Forecasting for Industry and Government-Methods and Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1968. — E. J. Henley, E. M. Rosen, Material and Energy Balance Computations. Wiley, New York 1969. — R. Lobstein, Guide to Chemical Plant Planning. Noyes, Park Ridge, New Jersey 1969. — K. Kaplick, M. Schubert, Datenverarbeitung in der Verfahrenstechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969. — W. Neri, Progettazione e sviluppo degli impianti chimici. Vallecchi, Firenze 1970. — J. R. Kittrell, Mathematical Modelling of Chemical Reactions, Advances in Chemical Engineering. Sv. 8. Academic Press, New York 1970. — A. Schöne, Prozessrechnungssysteme der Verfahrenstechnik. Hanser, München 1970. — B. Aggteleky, Fabrikplanung. Hanser, München 1970. — D. Barba, Il calcolo elettronico nell'ingegneria chimica. Siderea, Roma 1971. — W. W. Kafarov, Kybernetische Methoden in der Chemie und chemischen Technologie. Verlag Chemie, Weinheim 1971. — K. Anke, H. Kaltenecker, R. Oetker, Prozessrechner-Wirkungsweise und Einsatz. R. Oldenbourg Verlag, München 1971. — A. I. Johnson, P. I. Shannon, Chemical Plant Simulation. Prentice-Hall, New Jersey 1971. — U. Hoffmann, H. Hoffmann, Einführung in die Optimierung. Verlag Chemie, Weinheim 1971. — E. Mach, Planung und Errichtung chemischer Fabriken. Sauerländer, Aarau-Frankfurt 1971. — G. G. Brown, Unit Operations. Wiley, New York 1971. — J. C. Slattery, Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua. McGraw-Hill, New York 1972. — O. Levenspiel, Chemical Reaction Engineering, New York-London-Sidney-Toronto 1972.

Redakcija

PROJEKTIRANJE, KONSTRUKCIJSKO, pronalaženje što povoljnije nosive konstrukcije koja zadovoljava zahtjeve što joj se postavljaju. Nosiva je konstrukcija dio građevine koji preuzima utjecaje na građevinu; ona je fizikalna realizacija nosivog sustava i fizikalna cjelina u kojoj međusobni odnosi elemenata slijede iz svojstava cjeline.

Konstrukcijsko projektiranje dio je ukupnog projektiranja. Konceptija nosive konstrukcije dio je idejnog projekta građevine (v. *Arhitektura*, TE 1, str. 336). Konstrukcijsko