

Kad je određen uzdužni profil, poprečni se profil određuje tako da se postigne ravnotežno stanje. To se određuje kopiranjem prirode (uzorni potez vodotoka), računski ili modelskim ispitivanjem. Računski se određuje ovisnost količine nanosa o širini profila, pa se širina profila određuje prema očekivanoj količini nanosa. U modelskom ispitivanju poprečni se profil tako dugo mijenja dok se transportirana količina nanosa, uzimajući u obzir mjerilo modela i zakone sličnosti, ne uskladi s očekivanom količinom nanosa.

Osiguranje dna. Svaki se vodotok ukopava tokom vremena sve dublje u tlo. Ta se prirodna pojava može zahvatima u vodotok toliko pojačati da postane štetna. Poznato je produblivanje korita rijeke Rajne, koje se produbilo od kraja prošlog stoljeća za nekoliko metara.

Zbog produbljenja korita nastaju smetnje u opskrbi vodom i u plovidbi (smanjenje dubine u lučkim bazenima, teškoće u pogonu brodskih prevodnica).

Uzroci sniženja dna korita jesu: skraćenje toka, ograničenje širine korita koje se izvodi kao regulacija za malu vodu, smanjenje donosa vučenog nanosa, smanjenje poplavnih površina tako da se visoki vodostaji povisuju, što povećava pokretnu silu, bagerovanje u koritu vodotoka. Da bi se ograničila erozija dna korita, moraju se uzroci odstraniti ili njihovo djelovanje smanjiti.

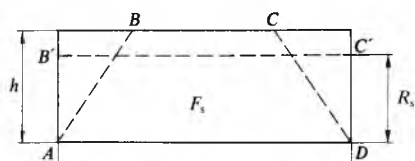
Ipak, da bi se osigurao predviđeni visinski položaj dna, potrebni su građevni zahvati, i to u obliku ploha (popločenje, pokriveni sloj) ili točaka (pragovi na dnu, temeljni pragovi).

Za popločavanje dna potrebni promjer 50% zrna određuje se prema izrazu

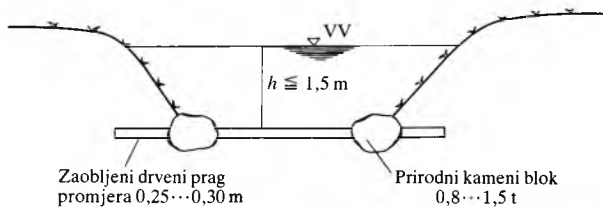
$$d_{50} = \frac{\rho R_s I (k/k_h)^{3/2}}{0,04(\rho_s - \rho)} \quad (26)$$

gdje je ρ gustoća vode, R_s hidraulički polumjer prema udjelu protoka koji djeluje na dno (sl. 40), I pad razine vode, ρ_s gustoća nanosa, a k/k_h omjer koeficijenta dna i zrna (za ravno dno $k/k_h = 1,0$, za valovito dno $k/k_h = 0,5$). Promjer je najmanjeg zrna $d_{min} = 0,6d_{50}$, a najvećeg $d_{max} = 1,6d_{50}$. Potrebna debljina sloja približno je jednaka promjeru maksimalnog zrna.

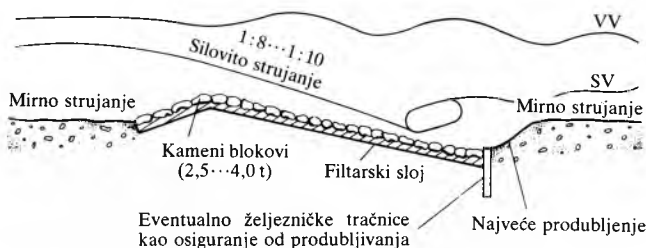
Temeljni pragovi postavljaju se u dno da bi se ono održalo na željenoj visini. Na sl. 41 vidi se primjer primjene drvenih



Sl. 40. Uz određivanje hidrauličkog polumjera R_s prema udjelu protoka koji djeluje na dno.
 $F_s = ABCD = AB'C'D'$, $R_s = F_s/B_s$



Sl. 41. Osiguranje dna korita pomoću drvenih pragova



Sl. 42. Osiguranje dna korita kamenim blokovima

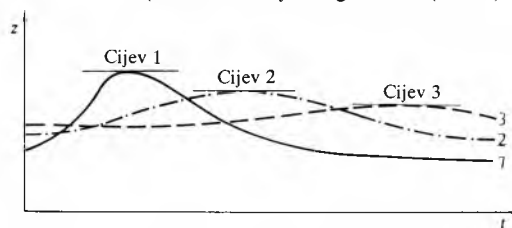
pragova u koritu potoka. Razmak pragova ne bi smio biti veći od $L_{max} = D/(2I)$, gdje je D promjer drvene oblice. Ta je udaljenost potrebna da dubljenje korita ostane u dopuštanim granicama.

U velikim koritima u posljednje se vrijeme postavljaju pragovi od kamenih blokova (sl. 42). Najveće se naprezanje pojavljuje u donjoj trećini praga gdje nastaje hidraulički skok.

Umjesto temeljnih pragova mogu se graditi ustave.

Osiguranje obala. Obalni pokosi i riječno dno granične su plohe između vode u rijeci i podzemne vode u tlu doline. Ako se taloži vrlo fini nanos na dnu vodotoka, nastaje brtveni sloj na dnu korita ili te fine čestice prodiru u dno korita. Oba procesa brtve dno, pa se izjednačenje između riječne i podzemne vode odvija u prvom redu kroz obalni pokos.

Podzemna se voda kreće polaganom, a njezino je kretanje ovisno o propusnosti tla. Povišenjem vodostaja u rijeci postepeno se podiže vodostaj podzemne vode u tlu pored korita, a podzemna se voda obogaćuje riječnom vodom. Što je tlo u dolini propusnije, brže se podiže razina podzemne vode i dalje se proteže porast njezine razine. Ako, dakle, veliki protoci brzo protječu, trajanje je vala prekratko da bi se tlo doline opskrbito vodom. Zbog toga su s vodoprivrednog gledišta nepovoljna glatka riječna korita i brzi prolaz velikih voda. Ako se piezometarske cijevi za mjerenje razine podzemne vode (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 425) postavje okomito na tok rijeke, mogu se registrirati promjene te razine. Zbog polaganog kretanja podzemne vode promjena razine ovisi o udaljenosti od riječnog korita (sl. 43).



Sl. 43. Promjene vodostaja podzemne vode. Piezometarska cijev 1 najbliža, a piezometarska cijev 3 najdalja od korita vodotoka

Kad je razina vode u rijeci niža od razine podzemne vode u obalnom tlu, podzemna se voda kreće prema rijeci, pa vodotok djeluje kao odvodni kanal. Rijeka se hrani iz zaliha podzemne vode u riječnoj dolini, pa dotok podzemne vode osigurava protok u sušnom razdoblju.

LIT.: R. Winkel, Die Grundlagen der Flussregulung. W. Ernst & Sohn, Berlin 1947. – F. Schaffernak, Flussmorphologie und Flussbau. Springer-Verlag, Wien 1950. – J. Duhm, Der Flussbau. Verlag Georg Fromme Co., Wien 1951. – A. Schoklitsch, Handbuch des Wasserbaus (2 Bände). Springer-Verlag, Wien 1962. – A. Wechmann, Hydrologie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1964. – H. Press, Wasserwirtschaft, Wasserbau und Wasserrecht. Werner-Verlag, Düsseldorf 1966. – E. Nakel, Gewässerausbau. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1970. – E. Svetličić, Hidraulika otvorenih korita (1, 2. i 3. dio). OVP, Zagreb 1977. – D. Vischer, A. Huber, Wasserbau. Springer-Verlag, Berlin 1979. – E. Svetličić, Otvoreni vodotoci – regulacija vodenih tokova. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1987.

E. Svetličić

REKTIFIKACIJA, difuzijska tehnološka operacija za razdvajanje kapljeviti smjesa u frakcije na osnovi razlika hlapljivosti njihovih sastojaka sustavnim ponavljanjem djelomičnog isparivanja i kondenzacije u izravnom kontaktu protustruja kapljeviti i parnih faza tih smjesa. Tokom rektifikacije hlapljiviji se sastojci koncentriraju u parnoj, a teže hlapljivi u kapljevitoj fazi.

U američkoj literaturi rektifikacija se naziva *frakcijskom destilacijom*, jer je rektifikacija zapravo specijalni postupak destilacije (v. *Destilacija*, TE 3, str. 232).

Rektifikacija se vodi stupnjevanim postupcima i postupcima kontinuiranog kontakta faza.

Za rektifikaciju stupnjevanim postupcima upotrebljavaju se kolone s protočnim pliticama, a za rektifikaciju kontinuiranim kontaktom faza služe kolone s prokapskim tijelima (punjene kolone).

Izbor između tih dvaju postupaka u prvom redu ovisi o potrebnim dimenzijama aparature, o njenoj težini, o nekim njenim funkcijskim odlikama, te o nekim karakteristikama pojne smjese.

Tako se kad je promjer kolone manji od 1 m obično odabiru kolone s prokapskim tijelima, jer je proizvodnja malih plitica vrlo skupa. Međutim, velike kolone s prokapskim tijelima nisu povoljne zbog poteškoća oko raspodjele kapljevine u njima i velike težine njihova punjenja.

Kolone su s prokapskim tijelima povoljnije kad je procesni sustav sklon pjnjenju, kad je agresivan, a materijal za korozijski otporne plitice preskup, te kad je potrebno da pad tlaka odnosno količina kapljevine u koloni bude manja nego što bi bila u koloni s pliticama.

Prednosti su kolona s pliticama, osim manje težine, što su povoljnije u preradbi kapljevina iz kojih se mogu izlučivati čvrste tvari koje bi brzo smanjile djelotvornost prokapskih tijela začepljivanjem šupljina i oblaganjem njihovih površina. Te su kolone povoljnije i kad treba odvoditi toplinu iz procesnog sustava izvođenjem dijela kapljevine iz neke plitice, hlađenjem kapljevine izvan kolone i vraćanjem u kolonu na sljedeću pliticu, ili kad treba izvoditi dio kapljevine kao bočni proizvod.

Dalje su prednosti kolona s pliticama da se lakše održavaju i da se lakše prilagođuju promjeni opterećenja uz održavanje prihvatljive djelotvornosti.

Drugi aparati s kojima su rektifikacijske kolone spregnute u postrojenja ne ubrajaju se u aparate za rektifikaciju u užem smislu. To su kondenzatori, spremnici, pumpe i isparivači. Ostala oprema rektifikacijskih kolona obuhvaća cjevovode, instrumente za nadzor i vođenje procesa, toplinsku izolaciju, te potporne konstrukcije s konstrukcijama za posluživanje i održavanje.

Za razliku od destilacije, koja se upotrebljava već mnogo stoljeća, rektifikacija je poznata tek od početka XIX. stoljeća. H. L. Pistorius dobio je 1817. pruski patent za rektifikacijsku aparaturu koju je nazvao destilacijskim aparatom sa dva kotlića. Iste godine u francuskom je časopisu *Bull. Soc. Encouragement* opisan aparat za rektifikaciju vina (Cellier-Bulementhal).

REKTIFIKACIJA STUPNJEVANIM POSTUPCIMA

Rektifikacija stupnjevanim postupcima može se promatrati kao serija približno ravnotežnih destilacija (*ravnotežnih stupnjeva*) međusobno povezanih tako da se iz svake od njih para uvodi u kapljevina više smještenog stupnja, a kapljevina u niže smješteni stupanj. Smjesa koju treba rektificirati (pojna smjesa) može se privoditi na različite načine. Međutim, opis stupnjevane rektifikacije u ovom je članku ograničen na

najčešći slučaj u praksi, kad se pojna smjesa uvodi u jedan od stupnjeva bliže sredini njihova niza (sl. 1).

Prema tome, u tom procesu udio lakše hlapljivih sastojaka u pari raste, a u kapljevini se smanjuje u smjeru strujanja kroz sustav. Obrnuto, u smjeru strujanja kroz sustav udio teže hlapljivih sastojaka u kapljevini raste, a u pari se smanjuje.

Kako se sastojci s nižim vrelištem koncentriraju u pari, temperatura opada od nižeg prema višem stupnju, pa postiže minimum u najvišem stupnju, gdje se odvodi posljednja para proizvedena u procesu. Suprotno tome, temperatura je najviša na mjestu gdje se kapljevina izvodi iz sustava.

Za održavanje tih temperaturnih razlika i za isparivanje iz posljednjeg stupnja potrebna se toplina privodi sustavu pojnom smjesom ili u stupanj iz kojega se izvodi kapljeviti proizvod ili na oba ta mjesta. Potrebna toplina približno je jednaka latentnoj toplini isparivanja.

Za djelovanje rektifikacije potrebno je paru (količinu pare V_1) ukapljivati i od tako dobivene kapljevine vraćati jedan njen dio, *pretok (refluks)*, L_R , u prvi stupanj (sl. 1). Ostatak kapljevine nakon izdvajanja pretoka izvodi se iz sustava kao *destilat (vršni proizvod)*.

To ukapljivanje može biti, kao u prikazanom primjeru, potpuno, tzv. *totalnim kondenzatorom*, kad se dobiveni kondenzat dijeli na pretok i destilat, ili pak djelomično, tzv. *parcijalnim kondenzatorom*, kad se posebno ukapluje dio vršne pare za pretok, a posebno preostali dio za destilat. Za razliku od procesa u totalnom kondenzatoru, u parcijalnom se kondenzatoru provodi ravnotežno odjeljivanje kondenzata od preostale (lakše hlapljive) pare, pa on predstavlja jedan ravnotežni stupanj izvan kolone. Sastav i količina pretoka dobivenog parcijalnim kondenzatorom određeni su toplinom koja se odvodi hlađenjem (odnosno temperaturom parcijalne kondenzacije).

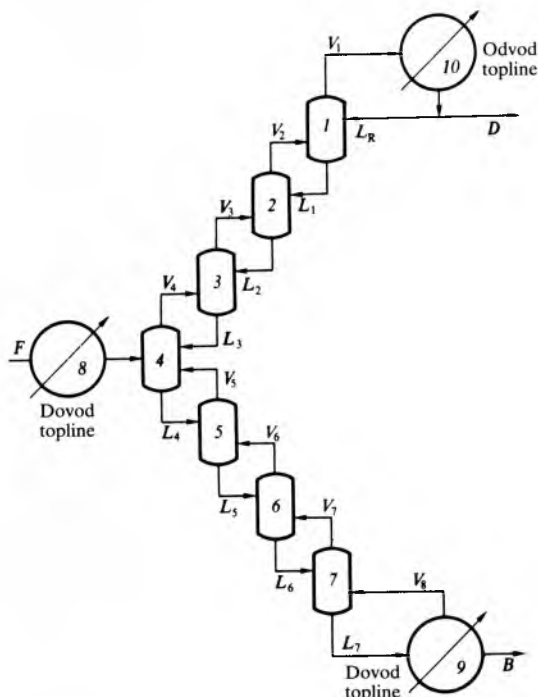
Pretok ukapluje dio količine pare V_2 koja dopijeva u prvi stupanj, pa tako nastaje količina kapljevine L_1 koja ga napušta (pretok prvog stupnja). Analogno tome, od dijela pare V_3 i pretoka prvog stupnja L_1 nastaje pretok drugog stupnja L_2 . Osim toga, pretoci iz pojedinih stupnjeva apsorbiraju teže sastojke pare i time podupiru koncentraciju lakših sastojaka u pari i težih sastojaka u kapljevini. Da nema pretoka, ne samo što bi količina pare što napušta prvi stupanj (V_1) bila jednaka pari što napušta drugi stupanj (V_2) nego bi to bili i njihovi sastavi. Isto bi tako bili sastav i količina pare što napušta drugi stupanj (V_2) jednaki onima pare što napušta treći stupanj (V_3) itd.

Analogno funkciji pretoka na vrhu sustava ravnotežnih destilacija, za rektifikaciju je potrebno odmah nakon izlaska iz donjeg dijela tog sustava djelomično ispariti kapljevina koja napušta sustav i dobivenu paru vraćati u kapljevina posljednjeg stupnja.

Omjer pretoka i destilata (L_R/D) naziva se *radnim omjerom pretoka*. Omjer pretoka iz bilo kojeg stupnja i pare što iz njega izlazi (L_1/V_1 , L_2/V_2 , ...) naziva se *unutrašnjim omjerom pretoka*.

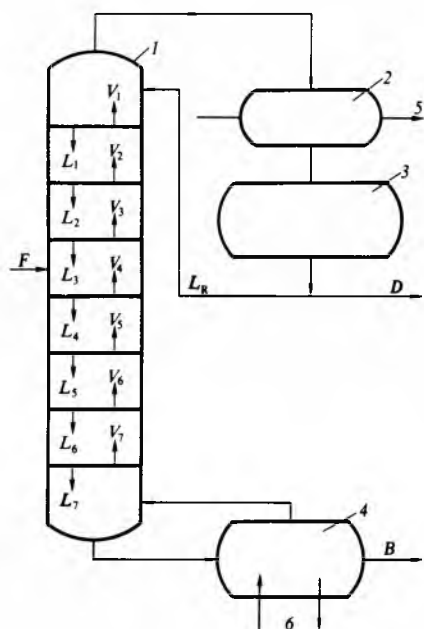
Rektifikacijska kolona s pliticama. Unutar svakog stupnja rektifikacije treba razdvojiti kapljevina koja u njemu nastaje (od pretoka iz gornjeg i kondenzata pare iz donjeg stupnja) u novu paru i kapljevina, uz konstantnu temperaturu i konstantni tlak. Dakako, za to je potreban prisnan dodir faza na pliticama, koje su u rektifikacijskim kolonama smještene jedna iznad druge. One su potpuno obujmljene vanjskim plaštem aparata. Tipične kolone takve vrste (sl. 2) funkcioniraju u sprezi s totalnim kondenzatorom i spremnikom vršnog proizvoda te s isparivačem proizvoda dna kolone.

Svaka plitica kolone (sl. 2) odgovara jednom ravnotežnom stupnju (sl. 1). U određenu pliticu kolone uvodi se pojna smjesa koja zbog razlike između svoje gustoće i gustoće parne faze u plitici počinje teći prema dnu aparata. Isti utjecaj uzrokuje i suprotno gibanje parne faze. Miješanjem s kapljevina što dotječe iz gornje plitice i kontaktom s parnom fazom što struji iz donje plitice sastav se pojne smjese počinje mijenjati odmah na početku tog puta. Zbog tih promjena sastavi se kapljevite faze što napušta ulaznu pliticu i pojne smjese već razlikuju. Te su promjene usko povezane s promjenama sastava parne faze, jer se sastav pare koja dolazi u pliticu razlikuje od sastava pare koja je napušta.



Sl. 1. Prikaz rektifikacije kao serije ravnotežnih destilacija. 1...7 ravnotežni stupnjevi, 8 i 9 grijajući, 10 kondenzator; F količina pojne smjese, L_R pretoka i D destilata, $V_1 \dots V_7$ količine pare i $L_1 \dots L_7$ količine kapljevine koje napuštaju stupnjeve 1...7, B proizvod dna

Izuzevši posljedice miješanja s pojnom smjesom, u svim se sljedećim pliticama prema dnu kolone zbivaju slične promjene kapljevite i parne faze što struje kroz aparat. Konačno kapljevita smjesa istječe u isparivač. Na putu od ulaza u taj aparat do njegova ispusta, gdje se odvodi proizvod dna, grijanjem se generira parna faza potrebna za proces u koloni.



Sl. 2. Shematski prikaz postrojenja za stupnjevanu rektifikaciju. 1 rektifikacijska kolona, 2 vršni kondenzator, 3 spremnik, 4 isparivač, 5 rashladni medij, 6 medij za zagrijavanje (ostale oznake kao na slici 1)

U svim pliticama, počevši od prve iznad one kojoj se privodi pojna smjesa do mjesta izvođenja parne faze iz kolone, zbivaju se slične promjene sastava kao i u pliticama ispod toga dijela kolone, ali kapljevita se faza generira samo vraćanjem pretoka.

Prema tome, kolone za takvu rektifikaciju imaju dva dijela u kojima se procesi ipak ponešto razlikuju: gornji, s kapljevitom fazom što se generira pretokom (*sekcija za rektifikaciju*), i donji, u kojemu se kapljevita faza generira miješanjem pojne smjese s kapljevitom fazom generiranom pretokom (*sekcija za otparivanje*).

U preradbi nafte rektificira se uz privođenje pojne smjese na više mjesta, te uz izvođenje vršnog proizvoda i proizvoda dna, a još se oduzimaju i bočne struje materijala. Zbog toga su navedeni pojmovi prilično neodređeni.

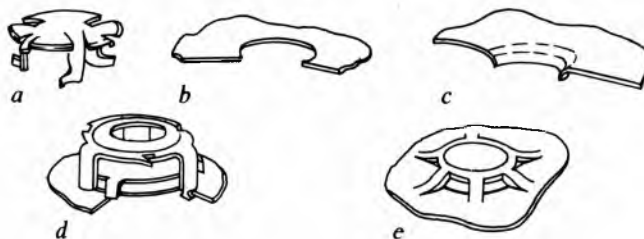
Očito, mogućnosti približavanja takve rektifikacije modelu procesa s ravnotežnim stupnjevima ovisi o djelotvornosti plitice, a konačni rezultat odjeljivanja ovisi ne samo o relativnoj hlapljivosti sastojaka smjese nego i o broju plitica i omjeru struja kapljevite i parne faze. Dakako, konstrukcija kolona za stupnjevanu rektifikaciju mora se prilagoditi zahtjevima koji potječu iz spomenutih činilaca, pa postoji više tipova tih kolona. Za njihovu su konstrukciju važni i drugi uvjeti, osobito temperatura i tlak procesa.

Tipovi rektifikacijskih kolona s pliticama međusobno se najviše razlikuju prema konstrukciji unutrašnjih dijelova. Plašt kolone smije se, naime, promatrati kao jednostavna tlačna posuda sa stijenkama takve debljine koja odgovara tlaku u koloni i od materijala otpornog na koroziju tvarima s kojima je u dodiru.

Dimenzije rektifikacijskih kolona s pliticama ne ovisi mnogo o tipu njihovih plitica. Međutim, ipak o tome znatno ovisi investicijski troškovi. Zbog toga je ispravan izbor plitica kolone važan činilac ekonomičnosti tih aparata.

Za protočne kolone danas se najviše upotrebljavaju *sitaste* (perforirane) i *ventilne plitice*. Takve su kolone već gotovo posve istisnule iz upotrebe kolone sa *zvonastim pliticama* (v.

Apsorpcija plinova, TE 1, str. 328). Umjesto zvana, za dispergiranje para u kapljevину imaju sitaste plitice jednostavno perforirana dna, a ventilne neke vrste ventilnih naprava (sl. 3).



Sl. 3. Tipovi ventilnih naprava za rektifikacijske kolone s ventilnim pliticama, a zaporni organ za naprave tipa V-1 i tipa V-4, b sjedište naprave tipa V-1 i c tipa V-4, d ventilna naprava tipa A-1 i e tipa V-0

Prednosti su sitastih i ventilnih plitica prema zvonastima: manja masa, niža cijena, jednostavnija ugradnja, veća prilagodljivost protoka (fleksibilnost), veći proizvodni kapacitet, manji pad tlaka u koloni i veća djelotvornost. Osim toga, konstrukcija im je jednostavnija, pa se lakše čiste i održavaju. Nedostatak im je manja pouzdanost, zbog toga što se lakše otkidaju.

Sitaste se plitice upotrebljavaju kad se ne traži veća fleksibilnost i kad je poželjna najniža moguća cijena aparature. Ventilne plitice imaju najveću fleksibilnost i najveći proizvodni kapacitet, ali su nešto skuplje od sitastih. Postoje četiri osnovna tipa ventilnih naprava. Od njih je tip V-1 standardan (sl. 3), a može se upotrijebiti u svim prilikama. Otvor je u ploči za ventilnu napravi tipa V-4 oblikovan poput Venturijeve sapnice. Zbog toga je pad tlaka u njoj dosta manji nego u drugim ventilnim napravama pa je pogodna za rektifikaciju pod sniženim tlakom. Naprava se tipa V-0 ne pokreće. Može zadovoljiti kad se ne traži veća fleksibilnost. Ventilna naprava A-1 izvorni je tip ventilne naprave. Ima lagan poklopac koji je može sasvim zatvoriti i posebnu balastnu ploču kojom se postiže dvostupanjski učinak, te uređaj za održavanje ventila na mjestu.

Tablica 1
USPOREDBA PLITICA REKTIFIKACIJSKIH KOLONA
PREMA NJIHOVIM SVOJSTVIMA

Tip plitice	Redoslijed prednosti prema			
	kapacitetu	fleksibilnosti	djelotvornosti	cijeni
Zvonasti	III	II	III	III
Sitasti	II	III	II	I
Ventilni	I	I	I	II

Iako su, prema osnovnim činiocima koje treba uzeti u obzir pri izboru tipa plitice (tabl. 1), ventilne plitice najpovoljnije, u svakom pojedinom slučaju treba ispitati sve činioce koji utječu na izbor tipa plitice kao najpogodnijeg.

Projektiranje rektifikacijskih kolona s pliticama

Osnova su projektiranja svake rektifikacijske kolone dva zahtjeva koja treba zadovoljiti. Prvo, treba dobiti proizvod tražene kvalitete, i drugo, kolona mora biti sposobna za preradbu zadane količine smjese, uz mogućnost promjene te količine bez promjene kvalitete proizvoda unutar određenih granica. Pri projektiranju treba odrediti procesni tlak, broj potrebnih plitica, konstrukciju plitice i plašta kolone te, na kraju, ostalu opremu rektifikacijskog postrojenja.

Broj rektifikacijskih kolona. Pri definiranju kvalitete proizvoda dobivenih rektifikacijom smjese s više komponenta treba uzeti u obzir da se u jednoj koloni može izvršiti odjeljivanje samo između dviju komponenata.

Tako se npr. kod kapljevinske smjese sa pet komponenata može rektifikacijom u jednoj koloni odjeljivanje vršiti između prve i druge, druge i treće, treće i četvrte, te četvrte i pete komponente.

Komponente među kojima se vrši odjeljivanje nazivaju se *laganom* i *teškom ključnom komponentom*, a ostale *lakšim*, odnosno *težim od ključnih komponenata*. Takvom se rektifikacijom dobiva destilat s komponentama lakšim od ključne i proizvod dna s komponentama težim od ključne. U tim proizvodima raspodijeljene su ključne komponente pojne smjese. U skladu s tim binarne se pojne smjese mogu promatrati i kao sustavi od samo lagane i teške ključne komponente. Prema tome, za odjeljivanje C komponenata potrebno je rektifikacijsko postrojenje sa $C - 1$ kolonom.

Tlak rektifikacije. Tlak pod kojim treba voditi rektifikaciju može se odrediti analizom njegova utjecaja na odjeljivanje. Tako se može utvrditi da se s povećanjem tlaka ravnotežne koncentracije parne i kapljevite faze približavaju. Osim toga, pod kritičnim je tlakom parna faza identična s kapljevitom, pa uz veći tlak od kritičnoga postoji samo jedna faza. Zbog toga se s povećanjem tlaka otežava odjeljivanje, pa je za zadani učinak odjeljivanja potrebno više ravnotežnih stupnjeva. To znači da su za stupnjevanu rektifikaciju pod većim tlakovima potrebne više kolone s više plitica i s debljom stijenkom plašta. Drugim riječima, s povećanjem se procesnog tlaka povećavaju investicijski troškovi rektifikacije.

Obrnuto, smanjivanjem se tlaka olakšava odjeljivanje, jer razlike ravnotežnih koncentracija parne i kapljevite faze rastu, pa se smanjuje i potreban broj ravnotežnih stupnjeva. Ipak, snižavanjem tlaka povećava se volumen parne faze, pa se tako povećava i potreban promjer kolone, što opet povećava investicijske troškove.

Zbog toga je za izbor tlaka, ako on nije diktiran nekim drugim, specifičnim uvjetima, potrebno optimiranje s obzirom na investicijske troškove.

Cinici koji utječu na izbor tlaka jesu: tlak para pretoka i karakteristike rashladnog sredstva potrebnog za ukapljivanje u kondenzatoru spregnutom s kolonom.

Ako je to npr. voda iz rashladnog tornja koja ima temperaturu do najviše $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura pretoka ne može biti niža od $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ako je, pak, napon para pretoka na toj temperaturi 1 MPa , i kolona mora biti konstruirana za tolik radni tlak. Međutim, ako rashladno sredstvo može ohladiti pretok na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlak bi para mogao biti $0,3\text{--}0,4\text{ MPa}$, pa bi se kolona mogla konstruirati za rad pod tim, nižim tlakom.

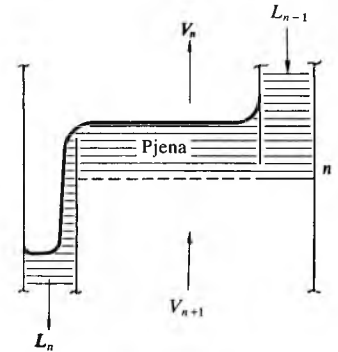
Na izbor tlaka rektifikacije utječe još i termička stabilnost komponenata pojne smjese. Ako se one raspadaju, polimeriziraju ili međusobno reagiraju kad procesna temperatura dosegne neku kritičnu vrijednost zbog povećanja tlaka, tada je, dakako, potrebno odabrati dovoljno malen procesni tlak da se ta temperatura ne bi dostigla ni na jednom mjestu u koloni.

Ostale procesne varijable rektifikacije. Za proračun je rektifikacijskih kolona potrebno utvrditi broj mogućih varijabla (N_v), među koje je uključen i tlak, pa matematičkim izrazima prikazati njihove odnose i zatim među njima odrediti neovisne jednadžbe (ograničenja). Ako je broj ograničenja $N_c = N_v$, rektifikacijski je sustav potpuno određen. Ako postoji razlika $N_i = N_v - N_c$, postoji i toliko varijabla koje još treba odrediti da bi se potpuno definirao sustav. Analizom se obično dobiva da je $N_i = C + 6$, gdje je C broj komponenata pojne smjese. Razlika N_i predstavlja stupnjeve slobode ili broj projektnih varijabla koje treba odrediti da bi se utvrdio

rad kolona. Varijable koje se obično određuju pri projektiranju kolone prikazane su u tablici 2.

Prema tome, kad se rektificira binarna smjesa u postrojenju s totalnim kondenzatorom, dobiva se $N_i = 8$, a za smjesu s deset komponenata $N_i = 16$. Međutim, pri rektifikaciji u postrojenju s *parcijalnim kondenzatorom* sustav ima jednu varijablu manje.

Broj stupnjeva rektifikacije. S obzirom na funkciju plitica kao kontaktnih uređaja (sl. 4), njihovo je djelovanje to intenzivnije što se više približavaju ravnoteži sastavi i temperature parne (V_n) i kapljevite (L_n) faze koje napuštaju pliticu. No, i ta je ravnoteža idealizirano stanje sustava, nedostižno u praksi, pa tu djelotvornost treba definirati kao postotak ili udjel potpune (stopostotne, odnosno jedinične) djelotvornosti teorijske plitice. Zbog toga je određivanje potrebnog broja ravnotežnih stupnjeva osnova proračuna rektifikacijskih kolona s pliticama, a za određivanje potrebnog broja stvarnih plitica mora se još samo utvrditi djelotvornost odabranog tipa stvarne plitice. Djelotvornost stvarnih plitica vrlo se teško može računski točno predvidjeti, jer na mehanizam prijenosa mase i energije u njima utječe mnoštvo činitelja, pa se ona obično određuje eksperimentima i usporedbom. Dijeljenjem potrebnog broja teorijskih plitica djelotvornošću stvarnih plitica dobiva se potreban broj stvarnih plitica.



Sl. 4. Prikaz djelovanja n -te plitice rektifikacijske kolone. L_{n-1} i L_n količine kapljevite faze, V_{n+1} i V_n količine parne faze

Kako se složenost proračuna broja potrebnih teorijskih plitica u prvom redu povećava sa složnošću sastava pojne smjese, i metode se međusobno razlikuju, već prema broju komponenata.

Konstrukcija plitice. Da bi plitice bile što djelotvornije, potrebno je da površina i trajanje kontakta između pare i kapljevine budu što veći, kako bi se postigao što veći prijenos. Zatim se nastoji da izmjena mase i energije na pliticama ne bude praćena suvišnim padom tlaka i da funkcioniranje plitice bude stabilno, pa određivanje njene djelotvornosti obuhvaća i optimiranje s obzirom na te zahtjeve.

Konstruiranje rektifikacijske kolone s pliticama počinje dimenzioniranjem plašta kolone i raspoređivanjem plitica i uređaja za vođenje struja materijala, prostora za oslobađanje para iznad vršne plitice i prostora za prihvat kapljevite faze na dnu. Zatim se konstruiraju potrebni priključci za dovodnje i odvođenje struja materijala, te razdjeljivač parne faze koja se iz isparivača vodi u kolonu ispod najdonje plitice.

Proračun stupnjevane rektifikacije dvokomponentnih smjesa

Bilance materijala i energije sustava na kojima se zasniva određivanje broja potrebnih teorijskih plitica za rektifikaciju izrađuju se za ustaljeni režim. Pri tome se bilance energije zasnivaju na entalpijama procesnih faza, a uzima se da su molarne entalpije smjesa zbrojevi molarnih entalpija udjela komponenata tih smjesa pri istoj temperaturi i tlaku, što je za takve proračune dovoljno točno.

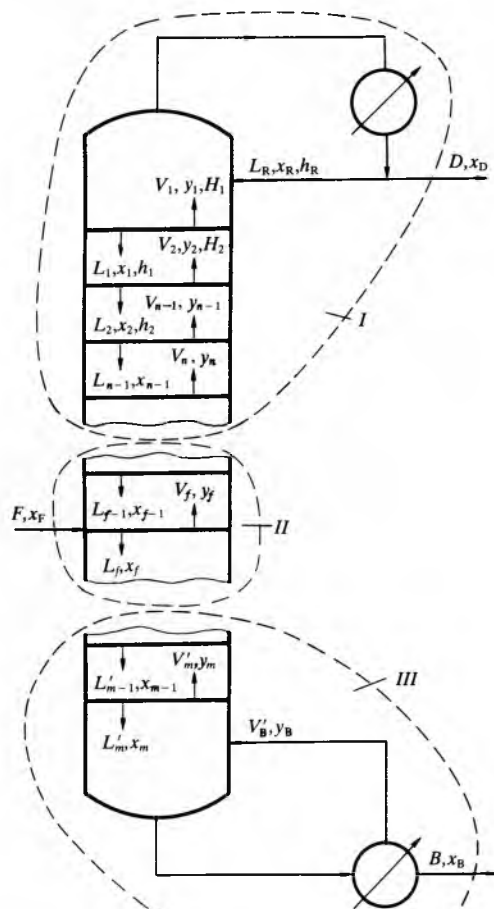
Za proračun potrebnog broja teorijskih plitica najprikladnije je posebno promatrati procese u tri sekcije procesne aparature (sl. 5): u sekciji *I* iznad ulazne plitice pojne smjese koja obuhvaća sekciju za rektifikaciju i totalni kondenzator kad on postoji, u sekciji *II* oko ulaza pojne smjese i u sekciji

Tablica 2

VARIJABLE KOJE OBIČNO TREBA ODREDITI ZA PRORAČUN REKTIFIKACIJSKE KOLONE

Varijabla	Broj varijabla
Količina sirovine	1
Sastav sirovine	$C - 1$
Entalpija sirovine	1
Sastav destilata i proizvoda dna	2
Temperatura pretoka ili njegova entalpija	1
Tlak u koloni	1
Omjer pretoka (L/D ili L/V) ili broj plitica	1
Ukupno (N_i)	$C + 6$

III koja obuhvaća dio za isparivanje i isparivač. Budući da je sastav struja materijala pri rektifikaciji dvokomponentnih smjesa potpuno određen udjelom samo jedne komponente, dovoljno je i bilancirati promjene sastava samo jedne komponente. Povoljnije je za to odabrati hlapljiviju komponentu. Pri tome su x_R, x_1, x_2, \dots množinski udjeli, a h_R, h_1, h_2, \dots molarne entalpije u kapljevitoy fazi, dok su y_1, y_2, \dots množinski udjeli, a H_1, H_2, \dots molarne entalpije u parnoj fazi promatrane komponente.



Sl. 5. Podjela rektifikacijske kolone s pliticama na sekcije. I sekcija iznad ulaza pojne smjese, II sekcija ulaza pojne smjese, III sekcija ispod ulaza pojne smjese, x množinski udjeli u kapljevitoy fazi, h molarne entalpije u kapljevitoy fazi, y množinski udjeli u parnoj fazi, H molarne entalpije u parnoj fazi (ostale oznake kao na slici 1)

Od procesnih su varijabla u prikazanom primjeru obično četiri već određene zahtjevima koje to postrojenje mora zadovoljiti. Obično su to količina, sastav i entalpija, odnosno temperatura sirovine, te sastav destilata. Procesni se tlak bira kako je već navedeno, a omjer pretoka tako da se njegovim izborom postigne optimum investicijskih troškova i troškova za grijanje procesnog sustava. S tim se podacima onda mogu odrediti i sve ostale varijable.

Analitički proračun broja teorijskih plitica za rektifikaciju dvokomponentnih smjesa primjenjuje bilance materijala i energije oko svake plitice za izračunavanje promjene sastava struja od plitice do plitice. Pretpostavljeno je da su para i kapljevine koje napuštaju pojedinu pliticu u ravnoteži. Metoda je ilustrirana na slici 5. Računi počinju izradbom bilance materijala za sekciju I. Pri tome je očito da je jedini materijal što ulazi u tu sekciju količina pare V_n iz n -te plitice, a da je napuštaju količine destilata D i kapljevine L_{n-1} iz plitice $n-1$, pa je bilanca materijala za tu sekciju

$$V_n = L_{n-1} + D. \quad (1)$$

Pomoću već navedenih množinskih udjela hlapljivije komponente dobiva se

$$V_n y_n = L_{n-1} x_{n-1} + D x_D, \quad (2)$$

pa je udio pare koja ulazi u tu sekciju

$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} x_{n-1} + \frac{D}{V_n} x_D, \quad (3)$$

ili uzimajući u obzir izraz (1):

$$y_n = \frac{L_{n-1}}{L_{n-1} + D} x_{n-1} + \frac{D}{L_{n-1} + D} x_D. \quad (4)$$

Iz stanja na vrhu kolone slijedi da je

$$x_R = x_D = y_1, \quad (5)$$

jer u postrojenju za rektifikaciju s totalnim kondenzatorom sastav para što napuštaju vršnu pliticu mora biti jednak sastavu destilata, dok za količinu para iz vršne plitice (V_1) vrijedi

$$V_1 = L_R + D, \quad (6)$$

gdje je L_R pretok koji se vraća do te plitice.

Udio se kapljevine koja napušta vršnu pliticu (x_1) može izračunati iz udjela para koje tu pliticu napuštaju (y_1) i uvjeta ravnoteže na tom mjestu. Nakon toga, da se bilanca materijala vršne plitice potpuno odredi prema jednadžbi (3), treba još izračunati i udio para (y_2) što ulaze u nju, te količine tih para (V_2) i kapljevine (L_1) što je napuštaju. Za to se može upotrijebiti bilanca energije vršne plitice:

$$L_R h_R + V_2 H_2 = V_1 H_1 + L_1 h_1 + Q_G, \quad (7)$$

gdje su Q_G gubici topline.

Pri tome se postupa tako da se najprije iz jednadžbe (7) odrede V_2 i L_1 pomoću jednadžbi (1) i (6), a pomoću pretpostavljenih vrijednosti za entalpiju H_2 , jer ona nije poznata. Te se pretpostavljene vrijednosti mijenjaju sve dok se ne odrede uvjeti na sljedećoj nižoj teorijskoj plitici. Kad se s tim vrijednostima izračuna udio para y_2 , može se izračunati i udio x_2 kapljevine koja napušta drugu nižu teorijsku pliticu (analogno određivanju x_1 iz uvjeta ravnoteže na toj plitici), a kad je on poznat, potrebno je provjeriti točnost pretpostavljene temperature na toj plitici, odnosno vrijednosti H_2 , pa ako je potrebno, korigirati je i prema tome ispraviti prethodni račun.

Bilanciranje se na analogan način nastavlja kroz čitavu sekciju I, za sve sukcesivne teorijske plitice, sve dok se za sastav kapljevine ne dobije sastav jednak ili barem približno jednak sastavu pojne smjese. Očito je broj teorijskih plitica potrebnih za rektifikaciju jednak broju tih bilanca.

Na analogan se način dobiva i ukupna bilanca materijala sekcije III, pa je

$$V_m = L_{m-1} - B, \quad (8)$$

gdje je B količina proizvoda s dna kolone. Iz tog izraza dobiva se materijalna bilanca hlapljivije komponente za tu sekciju:

$$V_m y_m = L_{m-1} x_{m-1} - B x_B, \quad (9)$$

iz koje slijedi da je udio para što napuštaju sekciju

$$y_m = \frac{L_{m-1}}{V_m} x_{m-1} - \frac{B}{V_m} x_B, \quad (10)$$

ili odatle pomoću (8)

$$y_m = \frac{L_{m-1}}{L_{m-1} - B} x_{m-1} - \frac{B}{L_{m-1} - B} x_B. \quad (11)$$

I postupak je bilanciranja s tim jednadžbama od plitice do plitice sekcije III analogan postupku bilanciranja od plitice do plitice u sekciji I. To se bilanciranje nastavlja sve dotle dok se za sastav kapljevine ne dobije traženi sastav proizvoda dna ili takav sastav da ta kapljevine sadrži manje hlapljivije komponente nego što odgovara zahtjevima u pogledu učinka odjeljivanja. Broj je teorijskih plitica potrebnih da se to postigne također jednak broju tih bilanca.

Opisana analitička metoda nije, zbog složenosti, prikladna za upotrebu u praksi. Zato se obično upotrebljava pojednostavnjena metoda u kojoj se zanemaruju gubici i toplina miješanja, a pretpostavlja se da su entalpije para i pripadni molarni tokovi tvari što prolaze kroz plitice konstantni u jedinici vremena. Te pretpostavke vrijede ako ne nastaju promjene dodavanjem u procesni sustav ili odvođenjem iz njega na njegovu putu kroz kolonu. Iz toga slijedi da je u takvu modelu i tok kapljevite faze konstantan.

Prema pojednostavnjenoj metodi obje su struje materijala u sekcijama I i III, promatrane odvojeno, konstantne, ali se, promatrane u cijelosti, s obzirom na kolonu, razlikuju količinama materijala što ga transportiraju, jer se među tim sekcijama uvodi pojna smjesa. Budući da za sekciju I vrijedi:

$$L_{n-1} = \text{const.}; V_n = \text{const.}, \quad (12)$$

slijedi da jednadžba (3) mora biti linearna funkcija od x , tj. jednadžba pravca

$$y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D, \quad (13)$$

s nagibom L/V , gdje je $(D/V)x_D = \text{const.}$ odsječak na ordinati. Taj se pravac naziva *pogonskim* ili *radnim pravcem*. Slično se, uz iste pretpostavke, dobiva za sekciju III jednadžba radnog pravca

$$y_m = \frac{L'}{V'} x_{m-1} - \frac{B}{V'} x_B, \quad (14)$$

gdje je $(B/V')x_B = \text{const.}$ odsječak na ordinati, s time da je L'/V' nagib pravca, gdje je $L' \neq L$ i $V' \neq V$.

Kolona konstruirana na osnovi takvih proračuna upotrebljava se kao standard za usporedbu s kolonama sa stvarnim pliticama. Uspoređivanjem se može odrediti djelotvornost stvarnih plitica. Takvi podaci onda služe dalje za projektiranje drugih kolona za iste ili slične svrhe.

Grafički proračun broja teorijskih plitica za rektifikaciju dvokomponentnih smjesa provodi se McCabe-Thieleovom metodom. To je, zapravo, grafičko računanje sastava procesnih faza rektifikacijskog sustava na osnovi pojednostavnjene analitičke metode, uz pretpostavku da je pretok zasićena kapljevina. Grafički proračun provodi se u pravokutnom koordinatnom sustavu pomoću općih podataka. Oni obuhvaćaju pravac $x=y$, kao geometrijsko mjesto točaka sastava pojne smjese i proizvoda, te ravnotežne krivulje, koje su geometrijsko mjesto točaka sastava struja materijala u pojedinim stupnjevima kad se među njima uspostavi ravnoteža određena procesnim tlakom i temperaturom.

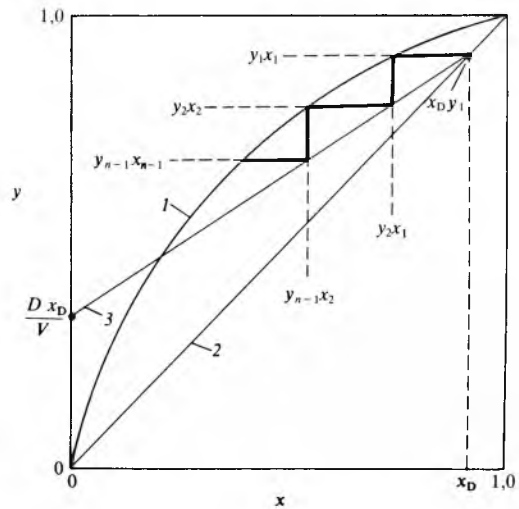
Zbog različitog odstupanja od idealiziranog modela oblici su ravnotežnih krivulja para i kapljevina različitih smjesa često vrlo različiti, pa stoga njihovo iscrpno opisivanje nije moguće, već se ograničava na najčešće slučajeve, tj. one s ravnotežama uz tzv. pozitivno odstupanje od idealiziranog ponašanja (kad su ravnotežne krivulje konveksne).

Objašnjenje te metode prikazano je na slici 6 u primjeru za sekciju I kolone na slici 5. Pri tome se, nakon što su pripremljeni opći podaci, nacrtaju radni pravci. Za to je na raspolaganju više podataka što slijede iz zadatka, među njima odsječak na ordinati Dx_D/V i sjecište pravca $x=y$ s pravcem $x=x_D$.

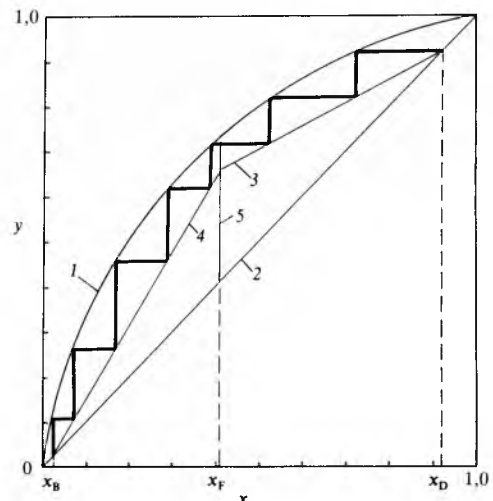
Budući da je pogonski pravac geometrijsko mjesto točaka sastava struja materijala na ulazu u pojedine stupnjeve, broj se potrebnih teorijskih plitica u tom dijagramu dobiva ucrtavanjem stepeničaste linije između tog pravca i ravnotežne krivulje. Počinje se od točke sastava destilata, a završava kad se dospije do točke sastava koji odgovara sastavu pojne smjese, kao pri opisanom analitičkom bilanciranju. Očito je onda broj teorijskih plitica potrebnih za proces u toj sekciji jednak broju tih stepenica.

Naime, vodoravne dužine te linije odgovaraju promjenama sastava struja materijala, jer su to najkraći putovi do ravnoteže (npr. od točke sastava x_D, y_1 do točke sastava x_1, y_1), a okomite dužine odgovaraju razlikama ravnotežnih sastava na plitici i neravnotežnih sastava tih struja na njihovim ulazima u susjednu nižu pliticu.

Pri primjeni grafičke metode na sekciju III postupa se analogno. Za ucrtavanje radnog pravca na raspolaganju su sjecišta pravca $x=y$ s pravcem $x=x_B$ te radnog pravca 3 sekcije I s pravcem $x=x_F$. Kroz ta sjecišta mora prolaziti radni pravac 4 sekcije III kada je pojna smjesa zasićena kapljevina.



Sl. 6. Princip određivanja broja teorijskih plitica McCabe-Thieleovom grafičkom metodom za sekciju I na slici 5. 1 ravnotežna krivulja, 2 pravac $x=y$, 3 radni pravac, x i y množinski udjeli hlapljivije komponente u kapljevitoj i parnoj fazi



Sl. 7. Princip određivanja broja teorijskih plitica McCabe-Thieleovom grafičkom metodom za čitavu kolonu na slici 5. 1 ravnotežna krivulja, 2 pravac $x=y$, 3 radni pravac za sekciju I, 4 radni pravac za sekciju III, 5 pravac q

S podacima na osnovi kojih se odvojeno određuju brojevi potrebnih teorijskih plitica za sekcije I i III može se jednim dijagramom, npr. kao na slici 7, McCabe-Thieleovom metodom odrediti broj potrebnih teorijskih plitica za čitavu kolonu. Iz tog dijagrama slijedi da su brojevi potrebnih teorijskih plitica za sekcije I i III jednaki brojevima presjeka linija promjena sastava s ravnotežnom krivuljom koji se nalaze iznad odnosno ispod presjeka radnih pravaca. Presjecište je radnih pravaca u tom dijagramu točka nekog sastava struja materijala što se uspostavlja još i pod utjecajem pojne smjese.

Utjecaj pojne smjese na ulaznoj plitici ovisi o sastavu, količini i toplinskim uvjetima te smjese. Za matematičko je opisivanje tog utjecaja prikladno u proračun uvesti količinu q zasićene kapljevite faze što se formira na ulaznoj plitici dovođenjem jedinične količine pojne smjese.

U takvim je računima, dakako, važno u kakvom se agregatnom stanju pojna smjesa uvodi u procesni sustav. Tako se, npr., kad je pojna smjesa vruća kapljevina, mora početi računati s bilancom kapljevite faze sustava, pa je

$$L' = L + qF, \quad (15)$$

gdje je F količina pojne smjese; odatle se dobiva

$$q = \frac{L' - L}{F}. \quad (16)$$

Ako je pojna smjesa para, mora se početi računati s bilancom parne faze sustava, pa je

$$V = V' + (1 - q)F, \quad (17)$$

odakle se dobiva

$$q = \frac{V' - V}{F} + 1. \quad (18)$$

Prema tome, ako je pojna smjesa zasićena kapljevina, a njen sastav jednak sastavu kapljevite faze na ulaznoj plitici, dovodenjem jedinične količine (jednog mola) smjese nastaje jedinična količina kapljevite faze, pa je $q = 1$. Ako je, pak, pojna smjesa zasićena para, njenim dovodenjem u procesni sustav ne nastaje nova količina kapljevite faze, pa je $q = 0$. Na osnovi toga mogu se odrediti i područja vrijednosti q za ostala stanja pojne smjese (tabl. 3). Iz definicije za q slijedi da je to i omjer topline potrebne za konverziju jednog mola pojne smjese u zasićenu paru i molarne topline isparavanja te smjese.

Tablica 3

KOLIČINA KAPLJEVINE ŠTO SE FORMIRA OD JEDINIČNE KOLIČINE POJNE SMJESE U REKTIFIKACIJSKOJ KOLONI

Stanje pojne smjese	Količina kapljevine q
Vruća kapljevina s temperaturom ispod vrelišta	$q > 1$
Zasićena kapljevina	$q = 1$
Dvofazni sustav (kapljevina i para)	$1 > q > 0$
Zasićena para	$q = 0$
Pregrijana para	$q < 0$

Pomoću (15) i ukupne bilance sekcije III ($V' = L' - B$) jednadžba (14) prelazi u oblik

$$y_m = \frac{L + qF}{L + qF - B} x_m - \frac{B}{L + qF - B} x_B, \quad (19)$$

pa se tako dobiva nagib radnog pravca za tu sekciju.

Sjecište je radnih pravaca sekcija I i III ujedno i jedna od točaka dužine koja je geometrijsko mjesto svih točaka sastava faza na ulaznoj plitici pojne smjese za pripadne vrijednosti q (pravac q). Očito još jedna točka pravca q mora biti točkom sastava pojne smjese na pravcu $x = y$, pa je time pravac q i određen.

Kad je pojna smjesa zasićena kapljevina, kako je to u dijagramu na slici 7, sjecište radnih pravaca 3 i 4 leži na ordinati kroz $x = x_F$, pa na njoj mora ležati i pravac q . Želi li se, pak, dobiti opća jednadžba pravca koji predstavlja lokaciju točaka sjecišta radnih pravaca za sve vrijednosti q u tablici 3, odnosno za toplinske uvjete pojne smjese, mora se početi računati s bilancom materijala prema jednadžbama (2) i (9), upotrijebivši vrijednosti y_i i x_i kao koordinate sjecišta dvaju radnih pravaca. Jednadžbe (2) i (9) prelaze, dakle, u oblik

$$V_n y_i = L_{n-1} x_i + D x_D, \quad (20)$$

$$V_m y_i = L_{m-1} x_i - B x_B. \quad (21)$$

Odbivši jednadžbu (20) od jednadžbe (21) i pomoću krajnje bilance hlapljivije komponente

$$F x_F = B x_B + D x_D \quad (22)$$

za čitav se proces dobiva

$$\frac{V_m - V_n}{F} y_i = \frac{L_{m-1} - L_{n-1}}{F} x_i - x_F, \quad (23)$$

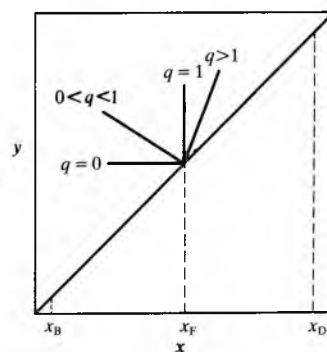
te konačno odatle pomoću (16) i (18):

$$y_i = \frac{q}{q-1} x_i - \frac{1}{q-1} x_F. \quad (24)$$

Slika 8 prikazuje moguće položaje pravca q za područja vrijednosti prema tablici 3. Svi prolaze kroz točku sastava pojne smjese $y_i = x_i = x_F$ na pravcu $x = y$. Za izračunavanje koordinata u sjecištu radnih pravaca mogu se iz (24), (20) i (21) izvesti jednadžbe:

$$x_i = \left(\frac{L}{D} + 1 \right) x_F + \frac{q-1}{\frac{L}{D} + q} x_D, \quad (25)$$

$$y_i = \frac{L}{D} x_F + \frac{q}{\frac{L}{D} + q} x_D. \quad (26)$$


 Sl. 8. Mogući položaji pravca q

Granice funkcioniranja rektifikacijskih kolona s pliticama očito su određene nekim vrijednostima unutrašnjeg omjera pretoka. Minimalna granična vrijednost unutrašnjeg omjera pretoka $(L/V)_{\min}$ – a njome je određena i vrijednost $(L'/V')_{\min}$ – određuje donju granicu djelovanja rektifikacijske kolone. Ta se granična vrijednost obično naziva *minimalnim pretokom*. S druge strane, maksimalna granična vrijednost unutrašnjeg omjera pretoka $(L/V)_{\text{tot}}$, odnosno $(L'/V')_{\text{tot}}$, koji se naziva *totalnim pretokom*, određuje gornje granice djelovanja rektifikacijske kolone.

Stupnjevana rektifikacija u režimu blizu minimalnog pretoka. Minimalni pretok postiže se slabljenjem struje kapljevite faze, kad L konačno postane toliko malen u usporedbi s V da više nije dovoljan za dalje obogaćivanje parne faze na njezinu putu kroz kolonu hlapljivijom komponentom. Tada prestaje odjeljivanje komponenata, a time i rektifikacija.

Prema tome, rektifikacija je uz minimalan pretok zamišljen proces, a zapravo se ona može ostvariti samo uz neku vrijednost omjera pretoka $(L/V)_{\text{rad}} > (L/V)_{\min}$.

Dakako, kad bi rektifikacija bila provediva u režimu s minimalnim pretokom, za nju bi bio potreban beskonačan broj stupnjeva. Iz toga slijedi da je potrebna to viša kolona sa što više plitica, što je manja vrijednost $(L/V)_{\text{rad}}$. Za to je, dakako, potrebna i skuplja aparatura.

Za promatranu rektifikaciju može se $(L/V)_{\min}$ analitički odrediti iz ukupne bilance materijala procesnog sustava od ulaza pojne smjese do oduzimanja destilata. Za tu se svrhu bilanca, u skladu s (1), smije napisati u obliku

$$V_{\min} = L_{\min} + D. \quad (27)$$

Budući da su kod minimalnog pretoka razlike sastava iste faze između dva uzastopna stupnja beskrajno male, smije se uzeti da je $x_f = x_{f-1}$, pa se za bilancu hlapljivije komponente dobiva izraz

$$V_{\min} y_f = L_{\min} x_f + D x_D. \quad (28)$$

Supstitucijom V_{\min} i L_{\min} vrijednostima iz (27), dobiva se

$$L_{\min} = D \frac{x_D - y_f}{y_f - x_f} \quad (29)$$

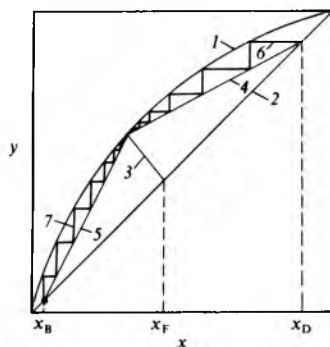
$$i \quad V_{\min} = D \frac{x_D - x_f}{y_f - x_f} \quad (30)$$

Dijeljenjem (29) sa (30) dobiva se

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \frac{x_D - y_f}{x_D - x_f} \quad (31)$$

Tako se minimalni pretok može odrediti zadanim podacima i podacima koji se mogu izračunati iz ravnotežnih sastava parne i kapljevite faze procesnog sustava.

I za određivanje minimalnog pretoka postoji McCabe-Thieleova grafička metoda (sl. 9). Pripadni se pravac q povuče od sastava pojne smjese na dijagonali $x=y$ do ravnotežne krivulje, pa se onda nacrtaju radni pravci spajajući tog sjecišta s istim točkama kao i u dijagramu na slici 7. Vrijednost se minimalnog pretoka određuje iz nagiba radnog pravca sekcije za rektifikaciju.



Sl. 9. Grafičko određivanje broja teorijskih plitica McCabe-Thieleovom metodom uz minimalni pretok. 1 ravnotežna krivulja, 2 pravac $x=y$, 3 pravac q , 4 radni pravac sekcije I, 5 radni pravac sekcije III, 6 i 7 stepeničaste linije sekcija, x i y kao na slici 6

Iz tog je dijagrama također očito da je za rektifikaciju uz minimalni pretok potreban beskrajan broj stupnjeva, jer se u njemu stepenastom konstrukcijom nikad ne doseže sjecište radnih pravaca. To vrijedi za obje strane sjecišta radnih pravaca.

Stupnjevana rektifikacija u režimu totalnog pretoka. Totalni je pretok neka vrijednost pretoka koja se postiže jačanjem struje kapljevite faze, tj. kad postane

$$\frac{L}{V} = 1; \quad \frac{L'}{V'} = 1. \quad (32)$$

Tada se oba radna pravca poklapaju s pravcem $x=y$. To izravno slijedi iz jednadžbi radnih pravaca (4) i (11), bilanci materijala (1) i (8) i uvjeta (12), pa se dobiva

$$y = \frac{L}{L+D}x + \frac{D}{L+D}x_D, \quad (33)$$

$$y = \frac{L'}{L'-B}x - \frac{B}{L'-B}x_B, \quad (34)$$

a odatle se, uzевši i uvjete uz koje rektifikacija prestaje ($D=0$, $B=0$, a tada je, u skladu s bilancom sekcije III, i $F=0$), lako zaključuje da nagibi radnih pravaca moraju biti

$$\frac{L}{L+D} = \frac{L'}{L'-B} = 1. \quad (35)$$

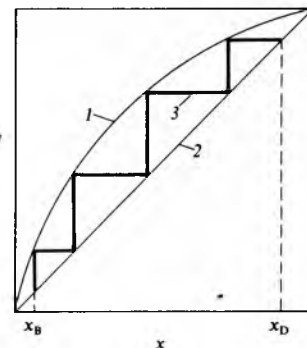
Drugim riječima, da bi rektifikacija tekla i pri velikim vrijednostima omjera pretoka, mora nagib sekcije I biti manji od 1, a sekcije III veći od 1, dakle

$$\frac{L'}{L'-B} = \left(\frac{L'}{V'}\right)_{\text{rad}} > 1 > \frac{L}{L+D} = \left(\frac{L}{V}\right)_{\text{rad}}. \quad (36)$$

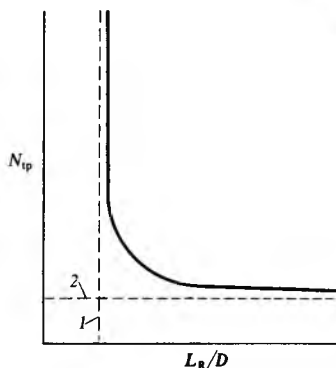
Grafički je prikaz rektifikacije uz totalni pretok (sl. 10) jednostavan, jer se radni pravci sekcija I i III poklapaju s pravcem $x=y$. Iz tog je prikaza očito da je kod totalnog pretoka broj potrebnih stupnjeva minimalan. Prema tome slijedi da su prednosti rektifikacije pri većim vrijednostima $(L/V)_{\text{rad}}$ u tome što je za njih potreban manji broj plitica.

Investicijski troškovi rektifikacije u režimima blizu $(L/V)_{\text{tot}}$ ipak nisu tako mali kako bi se moglo očekivati s obzirom na mali broj plitica, jer su potrebne ne samo kolone s pliticama

veće površine nego i veći kondenzatori i isparivači. Osim toga, tada se povećavaju pogonski troškovi jer recirkuliraju veće količine kapljevite faze uz veći utrošak topline i sredstva za hlađenje.



Sl. 10. Grafičko određivanje broja teorijskih plitica McCabe-Thieleovom metodom uz totalni pretok. 1 ravnotežna krivulja, 2 pravac $x=y$, 3 stepeničasta linija



Sl. 11. Ovisnost potrebnog broja teorijskih plitica (N_{tp}) o omjeru pretoka (L_r/D) . 1 pravac za $(L_r/D)_{\min}$, 2 pravac za $(L_r/D)_{\text{tot}}$

Ovisnost potrebnog broja plitica o omjeru pretoka može se prikazati krivuljom (sl. 11) kojoj su asimptote dva međusobno okomita pravca. Pravac paralelan s ordinatom odgovara minimalnom pretoku, a pravac paralelan s apscisom minimalnom broju plitica potrebnih uz totalni pretok.

Izbor radnog omjera pretoka i broja plitica ovisi o ekonomskom razmatranju i ograničen je na dosta uzak interval vrijednosti L/V , odnosno L'/V' . To se ocjenjuje pomoću pogonskih troškova i troškova investicije. Dakako, pri tome treba izabrati takav omjer pretoka da se što više iskoriste prednosti i što više eliminiraju nedostaci graničnih uvjeta funkcioniranja kolone.

Proračun stupnjevane rektifikacije višekomponentnih smjesa

Za određivanje sastava faza pri rektifikaciji dvokomponentnih smjesa dovoljno je poznavati udio samo jedne komponente.

Kad se, međutim, promatra rektifikacija višekomponentnih smjesa, udio svake komponente ovisi o udjelima svih ostalih komponentata. Zbog toga se svi udjeli moraju izračunavati iz podataka o ravnotežnim stanjima. Obično se ti podaci prikazuju konstantama ravnoteže, $K=y/x$, koje su funkcije temperature i tlaka za svaku komponentu sustava.

Kad se rektifikacijom neke višekomponentne smjese dobiva samo laka frakcija s nižim vrelištem i teška frakcija s višim vrelištem, proizvodi se smiju promatrati kao komponente. Tada se o tim proizvodima često govori kao o *pseudokomponentama*, pa se učinak odjeljivanja specificira područjem vrelišta ili sastavom proizvoda.

Proračuni od plitice do plitice obuhvaćaju određivanje procesnog tlaka, omjera pretoka, raspodjele komponentata u destilat i proizvod dna te iteracijski proračun temperature sastava i količina struja na svakoj plitici. Proračunava se redom, počevši s destilatnom, pa niz kolonu do ulaza pojne smjese, a potom od proizvoda dna uz kolonu do plitice na koju ulazi pojna smjesa. Postupak primjenjuje materijalne i toplinske bilance te podatke o ravnoteži faza.

Točan se broj plitica dobiva kada se dostignu temperatura i sastav pojne smjese iz obaju proračuna, započelih s uvjetima

na vrhu, odnosno dnu kolone. Da se dostigne dovoljno dobro slaganje s uvjetima pojne smjese, potreban je velik broj pokusa, jer je vrlo teško odrediti točnu raspodjelu komponenta u destilat i proizvod dna. Obično je dovoljno da se poklapaju sastavi lagane i teške ključne komponente u kapljevini ili pari sa sastavima odgovarajućih faza pojne smjese.

Navedene teškoće osobito ometaju ispravan smještaj ulazne plitice. Za kontrolu ispravnosti toga smještaja može se upotrijebiti tzv. *Kirkbrideova jednadžba*:

$$\lg \frac{n}{m} = 0,206 \lg \frac{B}{D} \left(\frac{x_{Tk}}{x_{Lk}} \right)_F \left[\frac{(x_{Lk})_B}{(x_{Tk})_D} \right]^2, \quad (37)$$

gdje su n i m brojevi teorijskih plitica iznad i ispod ulazne plitice, a Tk i Lk indeksi za oznaku teške i lake ključne komponente.

Zbog velike složenosti sustavi se za rektifikaciju višekomponentnih smjesa danas proračunavaju elektroničkim računalima, najčešće *Lewis-Mathesonovom* ili *Thiele-Geddesovom metodom*.

Prva se zasniva na sličnim pretpostavkama o konstantnom omjeru L/V , odnosno L'/V' , kao već opisana metoda za dvokomponentnu smjesu. Najprije se odrede procesni tlak, udjeli komponenta u proizvodima, položaj ulazne plitice i omjer pretoka, pa se proračunava sekcija za rektifikaciju od plitice do plitice. Za tu se svrhu pretpostave procesne temperature na svakoj plitici, pa se te pretpostavke provjeravaju i korigiraju iteracijskim izračunavanjem vrelišta. Na isti se način izračunava donji dio kolone, počevši od isparivača i završivši kod ulazne plitice. Uzima se da je dobiveno rješenje približno točno kad rezultati zadovoljavaju uvjet

$$\left(\frac{x_{Lk}}{x_{Tk}} \right)_f \cong \left(\frac{x_{Lk}}{x_{Tk}} \right)_F \cong \left(\frac{x_{Lk}}{x_{Tk}} \right)_{f-1} \quad (38)$$

Prema Thiele-Geddesovoj metodi proračun počinje s pretpostavljenim temperaturnim profilom kolone, nakon što se izaberu procesni tlak, omjer pretoka, položaj ulazne plitice i uvjeti pod kojima se pojna smjesa uvodi u kolonu. Proračun se nastavlja iteracijskim korigiranjem od plitice do plitice, dok razlika između pretpostavljenih i izračunanih vrijednosti ne postane dovoljno malena. Sastav i količina destilata dobivaju se nakon što se utvrde temperature.

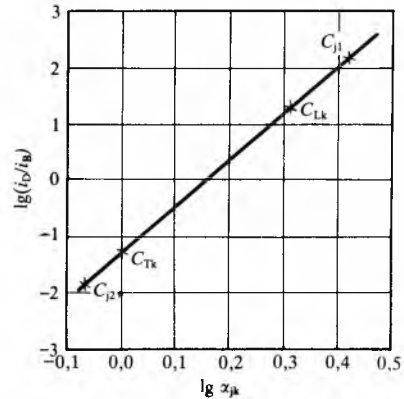
Brze metode proračuna stupnjevane rektifikacije višekomponentnih smjesa upotrebljavaju se za određivanje broja teorijskih plitica kao funkcije omjera pretoka, minimalnog broja plitica i minimalnog pretoka. Metode obično služe za studij utjecaja omjera pretoka na troškove investicije i rada kolone. Za određivanje $(L/V)_{\min}$ preporučuje se *Underwoodova metoda*, za ocjenu minimalnog broja plitica uz $(L/V)_{\text{tot}}$ *Fenskeova jednadžba*, a za određivanje broja teorijskih plitica, uz odabrani $(L/V)_{\text{rad}}$, *Gillilandova grafička korelacija*. Sastavi i količine proizvoda te temperature na vršnoj plitici i u isparivaču, na kojima se zasniva računanje tim metodama, određuju se na isti način kao i u proračunu od plitice do plitice.

Izračunavanje udjela komponentata u proizvodima rektifikacije višekomponentnih smjesa počinje određivanjem ključnih komponentata i njihovih udjela na osnovi tražene kakvoće proizvoda, iscrpaka i odabranog postupka. Za određivanje udjela svih komponentata u proizvodima prikladna je *Geddes-Hengstebeckova metoda*, koja se zasniva na jednadžbi

$$\lg \frac{i_D}{i_B} = C \lg \alpha_{jk}, \quad (39)$$

gdje su i_D i i_B udjeli pojedine komponente u destilatu i proizvodu dna, α relativna hlapljivost (v. *Destilacija*, TE 3, str. 233) promatrane komponente (j) s obzirom na ključnu komponentu (k), a C konstanta ovisna o promatranim komponentama.

Ta se jednadžba rješava grafički (sl. 12) pomoću dijagrama u kojem je nacrtan pravac kroz točke koje pripadaju ključnim komponentama. Za to je potrebno odrediti relativne hlapljivosti svih komponentata pojne smjese. Raspodjela komponentata u destilat i proizvod dna kolone očitava se na pravcu koji je nacrtan kroz vrijednosti za ključne komponente.



Sl. 12. Ovisnost omjera udjela komponentata u proizvodu rektifikacije višekomponentnih smjesa o relativnoj hlapljivosti tih komponentata

Pri tome se za prosječnu procesnu temperaturu kolone smije uzeti temperatura pojne smjese ili aritmetička sredina rosišta para što napuštaju vršnu pliticu i vrelišta proizvoda dna, koji su definirani jednadžbama

$$\sum x_i = \sum \left(\frac{y_i}{K_i} \right) = 1, \quad (40)$$

$$\sum y_i = \sum (K_i x_i) = 1. \quad (41)$$

Na osnovi temperatura tih rosišta i vrelišta, uz zadani tlak, određuje se područje radnih temperatura kolone. Postupa se tako da se odaberu ravnotežne temperature i time vrijednosti K_i za svaku komponentu pri zadanom procesnom tlaku. Račun se nastavlja iteracijski sve dok ne budu zadovoljene jednadžbe (40) i (41).

Izračunavanje minimalnog omjera pretoka Underwoodovom metodom zasniva se na pretpostavkama da su molarni pretok i relativna hlapljivost konstantni, pa vrijedi jednadžba

$$\left(\frac{L}{D} \right)_{\min} + 1 = \sum_1^n \frac{x_{iD}}{\frac{\alpha_i - \Theta}{\alpha_i}}, \quad (42)$$

gdje indeks i označava bilo koju komponentu, α_i njenu relativnu hlapljivost s obzirom na tešku ključnu komponentu ili s obzirom na najtežu komponentu, a Θ veličinu kojoj vrijednost mora zadovoljiti uvjet

$$\alpha_{Tk} < \Theta < \alpha_{Lk} \quad (43)$$

i jednadžbu

$$1 - q = \sum_1^n \frac{x_{iF}}{\frac{\alpha_i - \Theta}{\alpha_i}}. \quad (44)$$

Postupa se tako da se vrijednost dobivena iz (44) uvrsti u (42) pa se $(L/D)_{\min}$ izračuna pomoću već određenog sastava destilata.

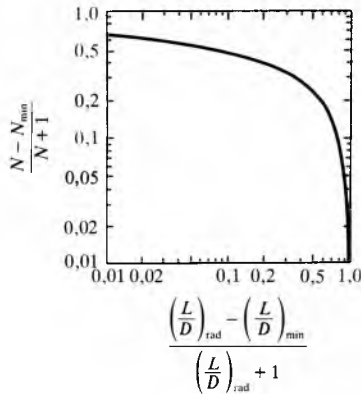
Izračunavanje minimalnog broja teorijskih plitica (N_{\min}) *Fenskeovom metodom* zasniva se na pretpostavci da ponašanje procesnog sustava ne odstupa mnogo od idealiziranog, pa se računa da je $K_i = \text{const.}$ i $\alpha_i = \text{const.}$ u području procesnih temperatura. Tako se ne čini prevelika pogreška pa se dobivaju dovoljno dobri rezultati. Uz takve se pretpostavke N_{\min} pri totalnom pretoku može izračunati jednadžbom

$$N_{\min} = \frac{\lg \left(\frac{x_{Lk}}{x_{Tk}} \right)_D \left(\frac{x_{Tk}}{x_{Lk}} \right)_B}{\lg (\alpha_{Lk/Tk})_{pr}}, \quad (45)$$

gdje je $(\alpha_{Lk/Tk})_{pr}$ prosječna relativna hlapljivost lake komponente s obzirom na tešku ključnu komponentu; za tu se

vrijednost preporučuje uzeti aritmetičku sredinu vrijednosti za α izračunanih za temperature na vrhu i na dnu kolone.

Izračunavanje potrebnog broja teorijskih plitica (N) za traženo odjeljivanje pri odabranom pretoku zasniva se na Gillilandovoj krivulji (sl. 13). Ona se određuje pod pretpostavkom da se pojna smjesa uvodi u kolonu na optimalnom mjestu. Pri tome se postupa tako da se pomoću već utvrđene vrijednosti $(L/D)_{\min}$ i odabrane vrijednosti $(L/D)_{\text{rad}}$ odredi vrijednost varijable na apscisi, a potom se ocijeni vrijednost varijable na ordinati, koja je jednaka omjeru $(N - N_{\min}) : (N + 1)$. Odatle se može odrediti broj teorijskih plitica N .



Sl. 13. Gillilandova krivulja za određivanje broja teorijskih plitica N . N_{\min} minimalni broj teorijskih plitica, $(L/D)_{\text{rad}}$ stvarni omjer pretoka, $(L/D)_{\min}$ minimalni pretok

Da bi se zadovoljio uvjet potreban za uspješnu primjenu Gillilandove krivulje, preporučuje se ulaznu pliticu predvidjeti na mjestu koje odgovara proračunu prema jednadžbi (37). Ipak se, bez obzira na to, preporučuje priključke za napajanje kolone ugraditi na mjestima koja su nekoliko plitica iznad ili ispod tako određene plitice.

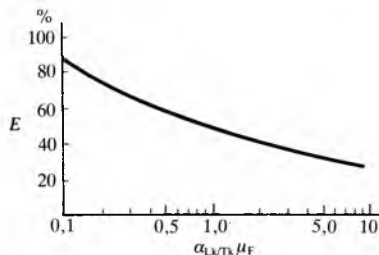
Djelotvornost plitice i kolone. Osim o varijablama procesnog sustava i konstrukciji plitica, djelotvornost plitica ovisi i o njihovom položaju u rektifikacijskoj koloni.

Varijable procesnog sustava imaju velik utjecaj na djelotvornost plitica. To su procesni tlak i temperatura, omjer pretoka, gustoća i viskoznost procesnih faza te relativne hlapljivosti njihovih komponenata. Dakako, na djelotvornost plitica utječu tip i izvedba plitica. Pojedinačni su utjecaji poznati, ali se o njihovu međusobnom i zajedničkom djelovanju zna vrlo malo. Zbog toga se za procjenu djelotvornosti plitica upotrebljavaju tzv. *Murphreejeve efikasnosti*, osobito *Murphreejeva* efikasnost za parnu procesnu fazu, koja se dobiva iz izraza

$$E_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}, \quad (46)$$

gdje je y_n^* udio para koje su u ravnoteži s kapljevinom.

Djelotvornost plitica ovisi o njihovom položaju u koloni zbog razlika temperatura i tlakova, količina struja i sastava



Sl. 14. O'Connellova empirijska krivulja. E djelotvornost plitice, $\alpha_{LK/TK}$ relativna hlapljivost lake prema teškoj ključnoj komponenti, μ_F prosječna viskoznost pojne smjese pri temperaturi kao aritmetičkoj sredini temperatura na vrhu i dnu kolone

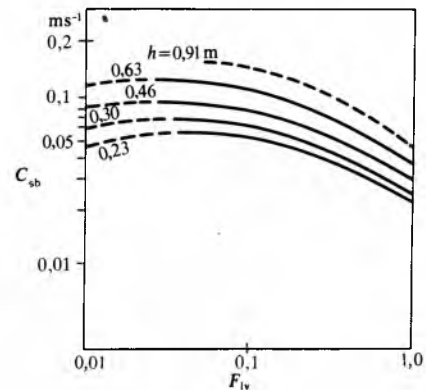
procesnih faza, te međufaznog prijenosa tvari na pojedinim mjestima u koloni. Zbog toga je djelotvornost plitica na vrhu i na dnu kolone obično manja od djelotvornosti plitica u sredini, pa ju je najbolje procijeniti prema djelotvornostima na trima različitim mjestima u koloni.

Najbolje se djelotvornost plitica određuje prema djelotvornosti plitica u sličnim kolonama. Kad nema takvih podataka, djelotvornost se plitica procjenjuje pomoću teorijskih i empirijskih jednadžbi. Jedna je od njih tzv. *O'Connellova empirijska krivulja* (sl. 14), koja je dobivena proučavanjem 32 industrijske i 5 laboratorijske kolone. Ona dobro zadovoljava za rektifikaciju smjesa ugljikovodika, klorugljikovodika i alkohola.

Visina kolone. Visina se kolone određuje na osnovi odabranog razmaka plitica. Da bi se postigli veliki protoci parâ i omogućila ugradnja dovoljno velikih ulaznih otvora za održavanje, taj razmak u velikim kolonama koje se montiraju na otvorenom iznosi 0,6...0,9 m. Da bi se izbjeglo skupo podupiranje visokih kolona, plitice se u kolonama manjeg promjera (do 1,2 m) obično postavljaju na razmaku od 0,45 m, a ponekad i manje. Specijalno su mali razmaci plitica (50...100 mm) u kriogeničkim kolonama (npr. za rektifikaciju zraka), jer je u tim procesima propuštanje vrlo štetno, pa ga treba ograničiti i malim dimenzijama kolona.

Za izračunavanje ukupne visine kolone, visini se njena dijela s pliticama dodaju visine komora iznad vršne i ispod zadnje plitice. Te se visine određuju na osnovi vremena potrebnog za zadržavanje procesnih faza u aparatu, pri čemu se uzima u obzir i visina postolja (košuljice).

Promjer kolone obično se zasniva na uvjetu da maksimalni protok u koloni bude manji od 85% onog protoka pri kojem započinje potapanje kolone. Početak potapanja kolona sa zvonastim i sitastim pliticama određuje se pomoću *Fairove korelacije* (sl. 15).



Sl. 15. Fairova grafička korelacija za određivanje promjera kolone sa zvonastim i sitastim pliticama. F_{iv} parametar definiran izrazom (47), C_{sb} parametar definiran izrazom (48), h razmak plitica

Svaka Fairova krivulja, za pripadnu vrijednost razmaka plitica, prikazuje tok funkcije $F_{iv} = f(C_{sb})$, gdje je

$$F_{iv} = \frac{L}{V} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (47)$$

parametar koji ovisi o omjeru pretoka (L/V) i omjeru gustoća procesnih faza (ρ_v/ρ_L), a

$$C_{sb} = U_n \left(\frac{\rho_v}{\rho_L - \rho_v} \right)^{0,5} \quad (48)$$

parametar (prema Soudersu i Brownu) ovisan o linearnoj brzini (U_n) strujanja para i o gustoćama kapljevite i parne faze. Linearna je brzina strujanja para kvocijent volumnog protoka i čiste površine plitice (razlike površine presjeka kolone i površine odvoda iz plitice).

Izravna je primjenljivost tih krivulja ograničena. I'rovo, krivulje se odnose na procesne sustave s kapljevitom fazom površinske napetosti $\sigma_1 = 0,02$ N/m. Za procesne sustave s

kapljevitom fazom druge površinske napetosti mora se računati s korekcijskim faktorom

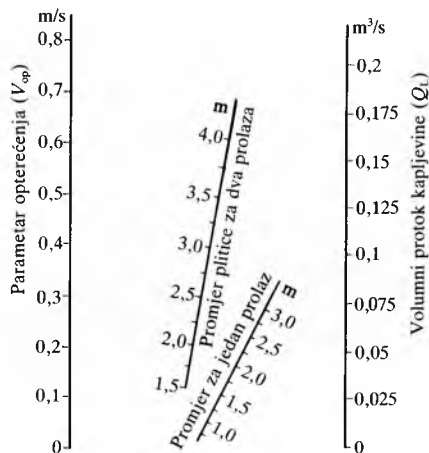
$$\frac{C_{sb}}{(C_{sb})_{\sigma_1}} = \left(\frac{\sigma}{0,02} \right)^{0,2} \quad (49)$$

Drugo je ograničenje Fairgovih krivulja da one vrijede samo kad omjer površine otvora i aktivne površine plitice iznosi 0,1, pa je za druge vrijednosti omjera potrebna korekcija. Tako se, npr., kad je vrijednost tog omjera 0,06, odnosno 0,08, dobivena vrijednost C_{sb} mora pomnožiti sa 0,8, odnosno sa 0,9.

Treći je uvjet za uspješnu primjenu takva proračuna da procesni sustav, poput smjesa ugljikovodika, nije sklon pjenjenju. Inače, treba imati u vidu da se proizvodni kapacitet kolone može smanjiti i na 60% od točke potapanja prema toj korelaciji. Promjer kolona s ventilnim pliticama može se približno odrediti pomoću nomograma na slici 16. Najprije se izračuna parametar opterećenja parama:

$$V_{op} = Q_v \left(\frac{\rho_v}{\rho_L - \rho_v} \right)^{0,5} \quad (50)$$

gdje je Q_v volumni protok para. Tom protoku odgovara protok kapljevite faze (Q_L) na desnoj strani nomograma. Sjecište spojnice tih točaka s linijom promjera kolone daje potreban promjer kolone za predvideni broj prolaza kapljevite.



Sl. 16. Nomogram za procjenu promjera kolone s ventilnim pliticama, V_{op} parametar prema izrazu (50)

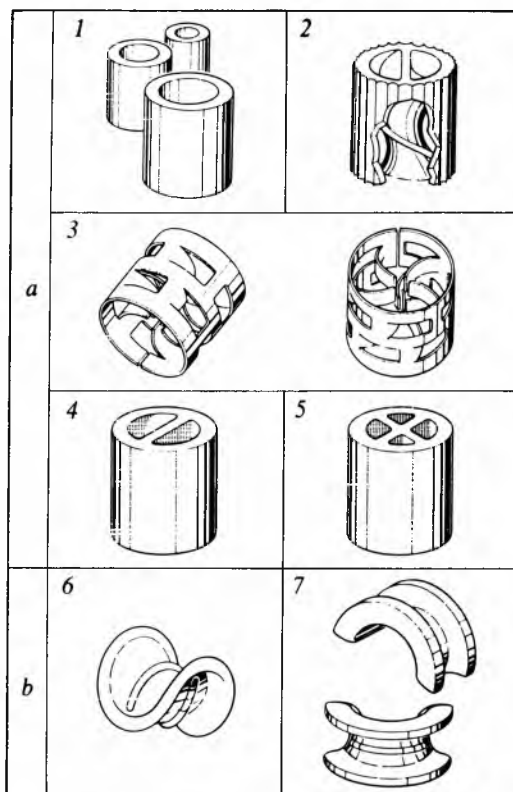
Pri izboru broja prolaza kapljevite treba uzeti u obzir da se s povećanjem broja prolaza smanjuje promjer kolone, ali se smanjuje i broj ventilnih naprava i duljina puta struja, što štetno djeluje na odjeljivanje.

Raspored plitica najčešće se prepušta proizvođačima specijaliziranim za njihovu konstrukciju.

REKTIFIKACIJA KONTINUIRANIM KONTAKTOM FAZA

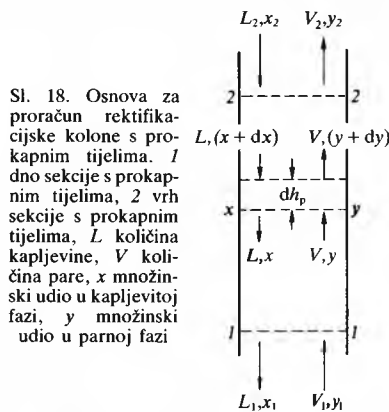
U kolonama za rektifikaciju kontinuiranim kontaktom faza upotrebljavaju se prstenasta i sedlasta prokapna tijela (sl. 17; v. *Apsorpcija plinova*, TE 1, str. 329). Od njih se najviše upotrebljavaju Raschigovi, Lessingovi i Pallovi prsteni, te Intalox i Berlova sedla. Od prstenastih prokapnih tijela najjeftiniji su Raschigovi, a najdjelotvorniji su Pallovi prsteni. Slobodni je prostor u kolonama što su napunjene sedlastim prokapnim tijelima manji, a kapacitet im je veći. Danas se daje prednost upotrebi Intalox-sedala i Pallovih prstena.

Dimenzije su prokapnih tijela od 3...150 mm. Ona su najčešće od keramičkih materijala, ali su često i od metala (od legiranih čelika, aluminija, bakra, željeza, pa i titana, već prema agresivnosti procesnih sustava), organskih i polimernih materijala te stakla. Njihov izbor ovisi o cijeni po jedinici volumena, otpornosti prema koroziji i djelotvornosti. Detaljni podaci mogu se naći u priručnicima.



Sl. 17. Tipovi prokapnih tijela: a prstenasta i b sedlasta prokapna tijela; 1 Raschigovi prsteni, 2 prsten Cyclohelix, 3 Pallovi prsten, 4 Lessingov prsten, 5 prsten s križnom pregradom, 6 Berlovo sedlo, 7 Intalox-sedlo

Broj prijenosnih jedinica. Kolone za rektifikaciju kontinuiranim kontaktom faza mogu se proračunavati na analognoj osnovi (sl. 18) kao kolone za apsorpciju plinova (v. *Apsorpcija plinova*, TE 1, str. 330 i 331). Pri tome nazivi kao što su prijenosne jedinice, njihova visina i broj imaju isto značenje.

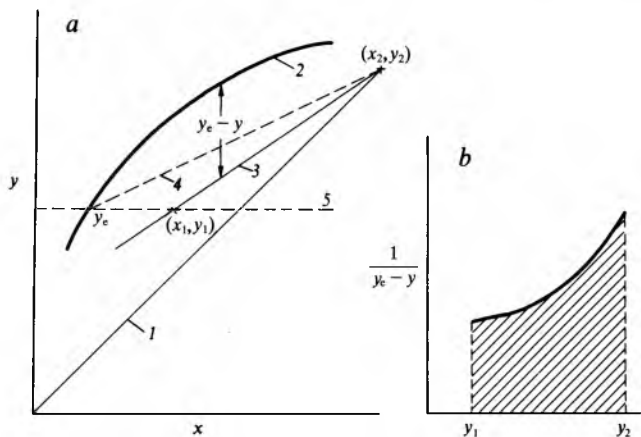


Sl. 18. Osnova za proračun rektifikacijske kolone s prokapnim tijelima. 1 dno sekcije s prokapnim tijelima, 2 vrh sekcije s prokapnim tijelima, L količina kapljevite, V količina pare, x množinski udio u kapljevitoj fazi, y množinski udio u parnoj fazi

Tako su u tim proračunima brojevi ukupnih prijenosnih jedinica definirani jednadžbama

$$N_{uv} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y_e - y} \quad \text{i} \quad N_{uL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x - x_e} \quad (51)$$

gdje je y_e sastav koji bi imala parna faza u ravnoteži s kapljevitom fazom sastava x , a x_e sastav koji bi imala kapljevita faza u ravnoteži s parnom fazom sastava y . Jednadžba za parnu fazu rješava se obično grafičkom integracijom (sl. 19) tako da se, prvo, u dijagramu x, y ucrtaju pravac $x = y$, radni pravac i ravnotežna krivulja procesnog sustava. Zatim se pomoću potrebnog broja vrijednosti $y_e - y$ iz tog dijagrama nacrtaju krivulja u dijagramu $y, 1/(y_e - y)$. Iz toga se dobiva broj ukupnih prijenosnih jedinica (N_{uv}) koji je proporcionalan površini ispod krivulje (sl. 19b).



Sl. 19. Postupak grafičke integracije za određivanje broja prijenosnih jedinica rektifikacijskih kolona s prokapskim tijelima. *a* dijagram x, y , *b* dijagram $y, 1/(y_e - y)$; 1 pravac $x = y$, 2 ravnotežna krivulja, 3 radni pravac za $(L/V)_{rad}$, 4 radni pravac za $(L/V)_{min}$, 5 dno kolone

Visina prijenosnih jedinica. Za izračunavanje pripadne visine prijenosnih jedinica za film, posebno za parnu i kapljevitu fazu, mogu se izvesti izrazi

$$H_V = \frac{V}{k_{Va}} p \quad \text{i} \quad H_L = \frac{L}{k_{La}} \rho_L, \quad (52)$$

gdje su k_{Va} i k_{La} koeficijenti prijenosa tvari za filmove parne, odnosno kapljevite faze, karakteristični za vrstu i dimenzije prokapskih tijela, p je procesni tlak u koloni, a ρ_L gustoća kapljevine. Pomoću H_V i H_L određuju se ukupne visine prijenosne jedinice iz izraza

$$H_{uv} = H_V + \lambda H_L \quad \text{i} \quad H_{ul} = H_L + \frac{H_V}{\lambda}, \quad (53)$$

gdje je λ omjer nagiba ravnotežne krivulje i radnog pravca.

Osim određivanjem visine i broja prijenosnih jedinica, rektifikacijske se kolone s prokapskim tijelima mogu proračunavati i metodom određivanja visine ekvivalentne teorijskoj plitici.

Visina sloja prokapskih tijela izračuna se tada iz izraza

$$h_p = N_{uv} H_{uv}. \quad (54)$$

U literaturi se može naći mnogo podataka o vrijednostima visina prijenosnih jedinica. Tako su na raspolaganju nomogrami iz kojih se za razna punila mogu očitati visine za H_V u ovisnosti o tlaku, temperaturi i linearnoj brzini para, a i tabelirane vrijednosti za H_L (tabl. 4). Ipak se uvijek treba oslanjati na eksperimentalne podatke ako su raspoloživi.

Tablica 4
VRIJEDNOSTI H_L ZA NEKE TIPOVE PROKAPNIH TIJELA

Naziv	Dimenzije mm				
	12	18	25	40	50
Raschigovi prsteni	0,073	0,092	0,104	0,143	0,177
Pallovi prsteni	—	—	—	0,122	0,150
Intalox-sedla	0,061	0,079	0,089	0,122	—

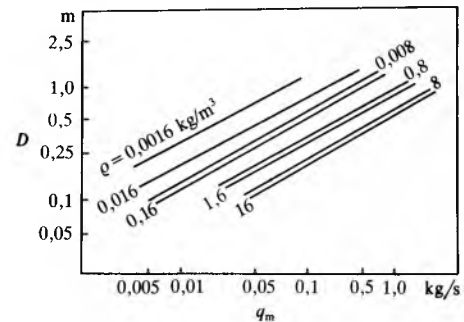
Proračun je kolona na osnovi prijenosnih jedinica dugotrajan. Zato se često i za proračun kolone s prokapskim tijelima primjenjuje metoda određivanja broja teorijskih plitica. Visina sloja prokapskih tijela se tada dobiva množenjem broja teorijskih plitica s visinom ekvivalentnom teorijskoj plitici (VETP). Određivanje VETP obično se osniva na iskustvu i eksperimentima, a mnoge su vrijednosti, upotrebljive za tu visinu, publicirane.

Promjer rektifikacijskih kolona s prokapskim tijelima grubo se može odrediti pomoću dijagrama (sl. 20) na kojem je ucertana ovisnost promjera kolone o masenom protoku za pojedine dimenzije prokapskih tijela. Promjer se kolone,

međutim, određuje kad se računa sa stvarnim brzinama strujanja procesnih faza i brzinama potapanja kolone.

Brzina potapanja kolone s prokapskim tijelima jest brzina strujanja parne faze od koje se daljim ubravanjem po drugi put počinje naglo povećavati pad tlaka kroz kolonu.

Stanje u tom trenutku naziva se *točkom potapanja*. Prvi put se ubravanje porasta tlaka pojavljuje kad su šupljine u sloju prokapskih tijela većim dijelom ispunjene kapljevinom. To se stanje naziva *vizualnim potapanjem*.



Sl. 20. Ovisnost promjera kolone D za rektifikaciju kontinuiranim kontaktom faza o masenom protoku q_m i gustoći plina ρ

Da se osigura veća rezerva, općenito se predviđa brzina strujanja para 60...75% od točke potapanja. Ipak kolone s prokapskim tijelima bolje odjeljuju ako rade u režimu blizu točke potapanja, jer su tada tijela bolje promočena i pare bolje raspodijeljene. Za određivanje linearne brzine strujanja pri potapanju kolone s nekim prokapskim tijelima postoje različiti nomogrami. Pomoću njih i množenjem određenim faktorima mogu se izračunati i brzine strujanja pri potapanju kolona s drugim prokapskim tijelima.

Za proračun promjera kolona s prokapskim tijelima pad tlaka kroz aparat nije bitan, osim za rektifikaciju u vakuumu. Potrebno je samo kontrolirati da li je procesni tlak koji slijedi iz odabrane brzine strujanja i izračunanog promjera kolone prihvatljiv.

LIT.: R. J. Robinson, E. R. Gilliland, Elements of Fractional Distillation. McGraw-Hill Book Co., New York 1950. – E. Kirschbaum, Destillier- und Rektifizierteknik. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960. – B. D. Smith, Design of Equilibrium Stage Processes. McGraw-Hill Book Company, New York 1963. – E. J. Henley, H. K. Staffin, Stagewise Process Design. J. Wiley and Sons, New York 1963. – M. Van Winkle, Distillation. McGraw-Hill Book Company, New York 1967. – C. J. King, Separation Processes. McGraw-Hill Book Company, New York 1971. – B. D. Smith, B. Block, K. C. D. Hickman, Section 13, Distillation, u djelu: R. H. Perry, C. H. Chilton, Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill Book Co., New York 1973. – R. Billet, Industrielle Destillation. Verlag Chemie, GmbH, Weinheim 1973. – J. R. Bachurst, J. H. Harker, Process Plant Design. Heinemann Educational Books, London 1973. – C. D. Holland, Fundamentals of Multicomponent Distillation. McGraw-Hill Book Company, New York 1981.

F. Šef

RENDGENSKA TEHNIKA, uređaji i postupci za proizvodnje i primjenjivanje rendgenskog zračenja. Zbog njegove velike prodornosti mnogo se primjenjuje za medicinsku rendgensku dijagnostiku i terapiju, tehničku rendgensku dijaskopiju, defektoskopiju, strukturnu analizu, spektralnu analizu itd. (v. Defektoskopija, TE 3, str. 183; v. Kristalografija, TE 7, str. 375; v. Nuklearno zračenje, TE 9, str. 535).

Rendgensko zračenje otkrio je 1855. god. njemački fizičar W. C. Röntgen, koji ga je nazvao X-zrakama, a tako se još i danas često naziva na engleskom (X-rays). Za samo nekoliko mjeseci istraživanja on je pronašao njihova osnovna svojstva i ukazao na mogućnost njihove primjene za medicinsku i tehničku dijaskopiju. Za to je 1901. god. dobio prvu Nobelovu nagradu za fiziku.

Osnovno svojstvo rendgenskog zračenja za dijaskopijsku primjenu jest ovisnost njegovog intenziteta o gustoći tvari