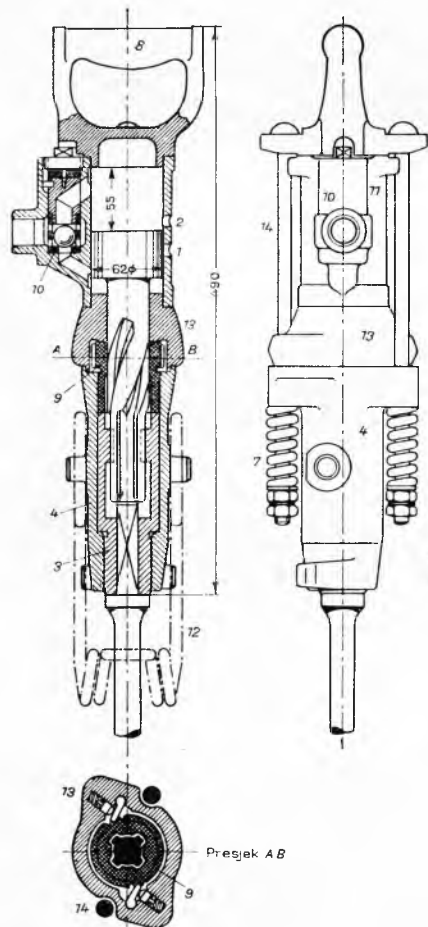


jednak je i bit će objašnjen pomoću sl. 5, koja prikazuje ručni bušači čekić.

Pojedini su dijelovi čekića među sobom spojeni sa dva svornjaka 14 i oprugama 7 za elastično odbijanje eventualnih udara stapa koji bi mogli oštetiti čekić. Stapajica ima četiri utora, ravna na prednjem i skošena na srednjem dijelu stapajice, u koje zahvataju zupci tuljca usadnika. Čekić radi kako je opisano u nastavku. Kad se kuglica razvodnika nalazi na svom donjem sjedištu, komprimirani će zrak po kanalu ulaziti u cilindar i ubrzavati stap naprijed. Zrak ispred stapa izlazić će kroz rupicu 1 sve dotle dok je prednji rub stapa ne zatvori, a zatim će početi komprimiranje preostalog zraka. U trenutku kad zadnji rub stapa otvori rupicu 2, dolazi do ispuha iza stapa, do prebacivanja kuglice u drugi (gornji) položaj uslijed kompresije s donje strane i do udara stapa na usadnik svrdla. Po završetku udarnog (radnog) hoda stapa počinje povratni, i sada zrak ulazi u cilindar s druge strane stapa ubrzavajući ga prema poklopcu. Proces je analogan prethodnom, samo se odvija u obrnutom smjeru, jer nakon što zadnji rub stapa zatvori rupicu 2



Sl. 4. Teleskopski bušači čekić



Sl. 5. Presjek ručnog bušačeg čekića. 1 donji ispuh, 2 gornji ispuh, 3 tuljac usadnika, 4 prednji dio cilindra, 7 opruga, 8 ručka s poklopcem, 9 zaporna matica, 10 kuglični razvodnik, 11 cilindar, 12 opruga za zadržavanje i izvlačenje dlijeta, 13 zaporno kućište, 14 vijak

počinje u dijelu cilindra do poklopca komprimiranje zraka, a kad prednji rub stapa otvori rupicu 1, dolazi do ispuha zraka iz prednjeg dijela cilindra i do prebacivanja kuglice u niži (radni) položaj. Uslijed kompresije dolazi i do zaustavljanja stapa ispred poklopca čekića.

U prvim se bušačim čekićima svrdlo zaokretalo ručno, u današnjim ono rotira automatski, i to na ovaj način: pri radnom hodu stapa zaporna naprava dozvoljava zapornom točku da ga stapajica svojim kosim utorima slobodno zaokrene a da se pri tom stap ne zaokrene. Pri povratnom hodu stapa zapinjače zaporne naprave ne dozvoljavaju zaokret točka u prvotni položaj, pa se stapajica prisilno zaokreće za kut određen strminom utora i dužinom stapaja. Stapajica prenosi svoje okretanje preko ravnog dijela utora na tuljac pa na usadnik svrdla, i tako na samo svrdlo.

Za bušenje u mekšim stijenama, ugljenu i soli primjenjuju se *rotacione bušilice*, koje rade na drugom principu, a u posljednje se vrijeme u svim stijenama uspješno radi rotaciono-udarnim bušenjem s potiskom 10-20 puta većim nego pri udarnom.

LIT.: A. Poljanšek, *Mehanizacija radova u steni*, Beograd 1949. — W. G. Lundstrum, ed., *Drillers' Handbook*, Cleveland, O. 1953. — G. Lathan, *Bohr- und Schießarbeiten im Bergbau*, Leipzig 1960. — M. Antunović-Kobliška, *Opšti rudarski radovi*, Beograd 1963. I. 4.1.

BUŠENJE NA VELIKU DUBINU (dubinsko bušenje), tehnika izrade dubokih bušotina, prvenstveno za pronalaženje i eksploataciju nafte i plina, ali i za druge svrhe. U načelu nema bitnih razlika između »plitkih« bušotina (otprilike do 200 m) i bušotina veće dubine, ali se zbog kompliciranijih, obimnijih i skupljih instalacija dubinsko bušenje obično izdvaja iz opće tehnologije bušenja kao posebna disciplina. Kao posljedica velikog značenja nafte u savremenoj civilizaciji, tehnika bušenja na ovu mineralnu sirovinu najbolje je razvijena, pa prikaz dubokog bušenja na naftu (koji će se dati u ovom članku) obuhvaća ovu tehničku disciplinu u cijelosti.

Nafta je bila poznata već u starom vijeku; u prvim stoljećima n. e. bila je cijenjena kao glavni sastojak »gričke vatre«, značajnog ratnog sredstva Bizanta, a upotrebljavala se i kao gorivo za svjetiljke (»sicilsko ulje«). U to se prvo doba primjene dobivala skupljanjem s površine naftonosnih kaljuža i asfaltnih jezera, npr. kraj Mrtvog mora u Palestini. Kada je potrošnja prerasla mogućnosti ovakve ograničene proizvodnje, pojave nafte počele su se istraživati i eksploatirati rudarskim metodama, tj. kopanjem jaraka i bunara. Zatim se kopaju i dublja okna, a iz njih se izrađuju hodnici. Razvija se rudarski način dobivanja nafte, primjenljiv samo za ležišta u razmjerno malim dubinama, gdje se nafta nalazila bez svog gotovo redovnog pratioca, plina, tj. u tzv. otplinjenim ležištima bez pritiska.

Tehnika izrade okana i jamskih prostorija, podgrađivanja i vjetronja u razdoblju »rudarenja na naftu« jednaka je tehnici kopanja čvrstih mineralnih sirovina. Razlika je u tome što se stijena nosilac nafte ne otkopava i ne odnosi na površinu, već se izrađuju jamske prostorije u krovinskim naslagama a iz njih do naftonosnih slojeva plitka okanca u koja se nafta cijedi i iz kojih se prikuplja. Dobivanje nafte rudarskim načinom nije moglo postići širu primjenu jer se pokazalo kao neekonomično. Tehniku dobivanja trebalo je prilagoditi osnovnim karakteristikama sirovine, tj. tekućine koja se javlja uglavnom na većim dubinama. Po tim karakteristikama nafta je slična vodi, a na području pronalaženja i korišćenja pike i slane vode postojalo je gotovo uvijek veliko iskustvo. Prema nekim podacima, Kinezi su još prije 2000 godina primjenjivali neku vrstu udarnog bušenja, koristeći se pri tom dlijetom od 100 do 200 kg, obješenim za ručno ispletenu bambusovu užu i pokretanim drvenim njihalom. Oni su, navodno, već tada izrađivali bušotine promjera 150 mm do dubine od 1200 m. Arteške bunare i do 300 m dubine imali su već i Egipćani, a u Evropi su se takvi bunari bušili u francuskoj grofoviji Artois još u XII st. (Prema imenu te grofovije su takvi bunari i nazvani.) Razumljivo je da se tehnika bušenja bunara počela primjenjivati i u bušenju na naftu kad je to postalo ekonomski potrebno.

Nafta se je prvi put pojavila iz bušotine specijalno namijenjene njezinu dobivanju 27. VIII 1859, i to u blizini mjesta Titusville u Pensilvaniji (USA). Bušotinu je izbušio E. L. Drake postupkom udaranja dlijeta obješenog za užu, postigavši konačnu dubinu od ~ 21 m (69,5 stopa). Ovaj se datum uzima kao početak razvoja naftne industrije.

Dubine bušotina danas daleko prelaze dubinu Drakeove bušotine. Dosad najveća dubina od 7723,63 m postignuta je u Teksasu, ali je bila negativna. Da bi se nadopunile zalihe, koje su, usporedene s količinama iscrpjenim 1963, pokazivale odnos od 34,5 : 1, sve više bušotina prelazi dubine od 6000 m. Dosada najdublje raskriveno ležište nafte nalazi se na dubini od 21 465 stopa (6542,5 m) u USA.

Prema poznatim podacima, prva bušenja na naftu na području Jugoslavije izvršena su oko 1800. U vremenu od 1884 do 1885 izradene su u Peklenici (Međimurje) 3 bušotine, od kojih jedna do 350 m, a u nedalekoj Selnici 4 bušotine kojih su dubine iznosile 52, 231, 274 i 280 m. Prvo značajnije ležište plina raskriveno je u Bujavici i predano iskorištavanju 1917, a prve industrijske količine nafte dobivene su sa područja Gojla 1941. Dosada najdublje ležište nafte u našoj zemlji raskriveno je u dubini od 2260-2277 m, a najdublje ležište plina u dubini od 2234-2262 m. Tragajući za ležištima nafte u području krša izradene su i u nas četiri bušotine dublje od 4000 m, od toga Rovinj 1 do dubine od 4136 m, Buljarica 3 do dubine od 4444 m, Ravni kotari 1 do dubine od 4535,5 m i Možura 1 do dubine od 4550,1 m.

Postrojenja za bušenje već i po instaliranoj snazi predstavljaju često složena industrijska postrojenja kojih je nabavna cijena razmjerno velika. Sasvim grubo, može se iznijeti da se današnje cijene takvih uređaja kreću oko 200 000-800 000 US \$, zavisno od kapaciteta postrojenja, ne računajući vrijednost alatki i zaštit-

nih cijevi. Na sl. 1 prikazano je moderno stacionarno postrojenje za bušenje vrtanjem.

S povećanjem dubine bušenja postavljaju se u pogledu konstrukcije postrojenja sve veći zahtjevi, posebice u odnosu na dimenzioniranje pojedinih sklopova, na alatke i na pogonske uređaje. S tim u vezi, postrojenja za bušenje opremaju se i sve jačim energetskim uređajima. Općih preporuka o potrebnoj snazi uređaja nema, no tablica 1 može poslužiti kao orijentacija za rotaciono bušenje.

Da se ubrza premještanje postrojenja za bušenje sa jednog radilišta na drugo i da se skрати vrijeme njegova sastavljanja i rastavljanja, konstruirana su lakopokretna postrojenja (sl. 2) koja se mogu podijeliti na dvije skupine: postrojenja na teretnim vozilima (na kotačima ili na gusjenicama) i postrojenja na saonicama.



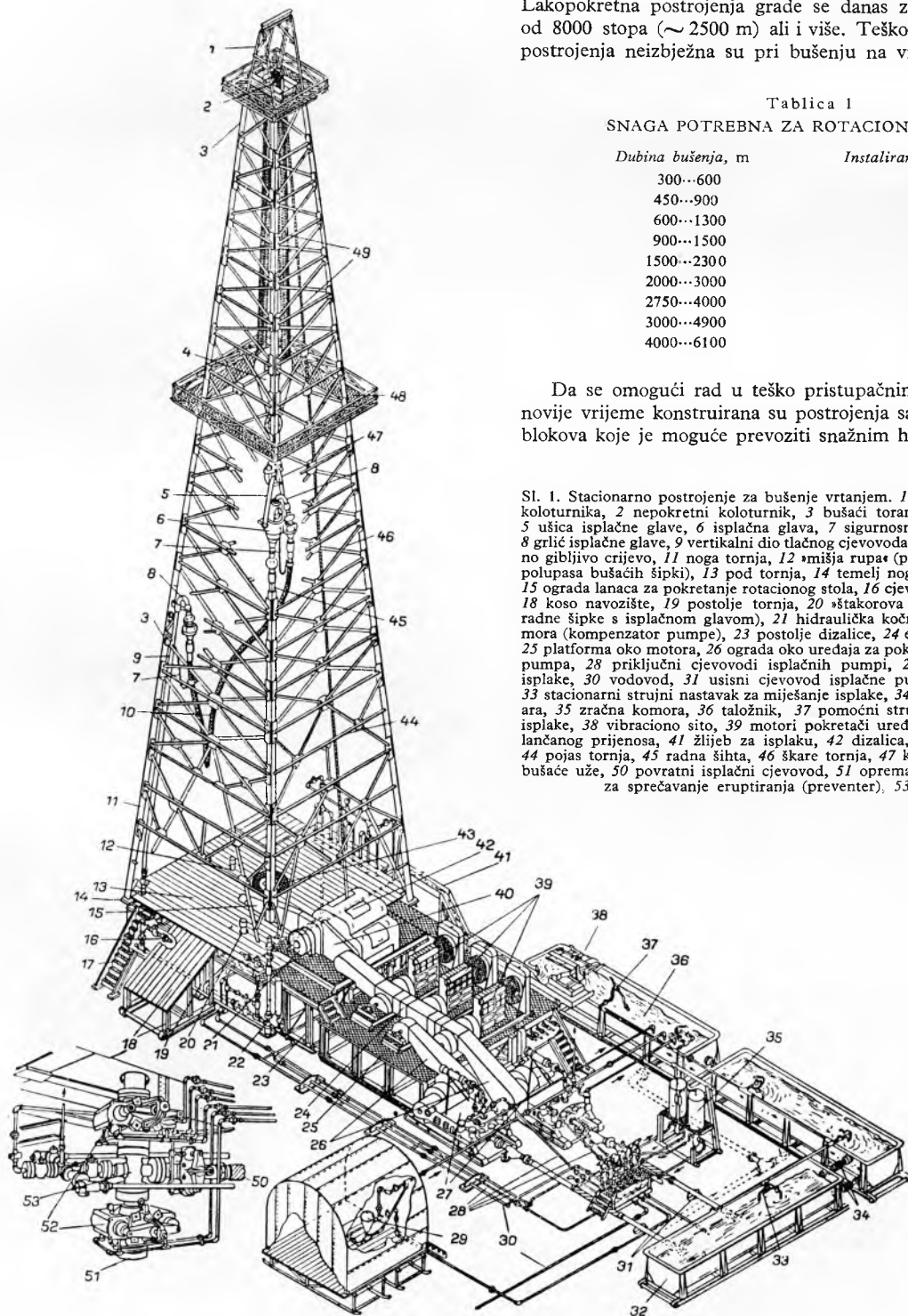
Sl. 2. Lakopokretno postrojenje za bušenje vrtanjem

Lakopokretna postrojenja grade se danas za bušenja do dubine od 8000 stopa (~ 2500 m) ali i više. Teškopokretna, stacionarna postrojenja neizbježna su pri bušenju na vrlo velike dubine.

Tablica 1
SNAGA POTREBNA ZA ROTACIONO BUŠENJE

Dubina bušenja, m	Instalirana snaga, KS
300...600	80
450...900	120
600...1300	200
900...1500	320
1500...2300	550
2000...3000	800
2750...4000	1100
3000...4900	1300
4000...6100	2000

Da se omogući rad u teško pristupačnim područjima, u najnovije vrijeme konstruirana su postrojenja sastavljena od krupnih blokova koje je moguće prevoziti snažnim helikopterima na sama



Sl. 1. Stacionarno postrojenje za bušenje vrtanjem. 1 stojka iznad nepokretnog koloturnika, 2 nepokretni koloturnik, 3 bušači toranj, 4 pokretni koloturnik, 5 ušica isplachne glave, 6 isplachna glava, 7 sigurnosni lanac isplachnog crijeva, 8 grlić isplachne glave, 9 vertikalni dio tlačnog cjevovoda isplachne pumpe, 10 isplachno gibljivo crijevo, 11 noga tornja, 12 »mišja rupa« (pomoćna rupa za odlaganje polupasa bušačih šipki), 13 pod tornja, 14 temelj noge tornja (temeljna ploča), 15 ograda lanaca za pokretanje rotacionog stola, 16 cjevovod za isplaku, 17 stube, 18 koso navozište, 19 postolje tornja, 20 »štakorova rupa« (rupa za odlaganje radne šipke s isplachnom glavom), 21 hidraulička kočnica, 22 izravnavajuća komora (kompenzator pumpe), 23 postolje dizalice, 24 element za prijenos snage, 25 platforma oko motora, 26 ograda oko uređaja za pokretanje pumpe, 27 isplachna pumpa, 28 priključni cjevovodi isplachnih pumpi, 29 lijevak za pripremanje isplake, 30 vodovod, 31 usisni cjevovod isplachne pumpe, 32 usisni rezervoar, 33 stacionarni strujni nastavak za miješanje isplake, 34 spojevi isplachnih rezervoara, 35 zračna komora, 36 taložnik, 37 pomoćni strujni nastavak za miješanje isplake, 38 vibraciono sito, 39 motori pokretači uređaja za bušenje, 40 ograda lančanog prijenosa, 41 žlijeb za isplaku, 42 dizalica, 43 rotacioni stol (rotor), 44 pojas tornja, 45 radna šihla, 46 škare tornja, 47 kuka, 48 balkon tornja, 49 bušače uža, 50 povratni isplachni cjevovod, 51 oprema ušica buštine, 52 uređaj za sprečavanje erupiranja (preventer), 53 križni komad

radilišta. U posljednje vrijeme ležišta nafte sve se više traže i u područjima ispod jezera, zaljeva i otvorenih mora. Postrojenja za bušenje postavljaju se u tim slučajevima na šipovima (pilotima), na plovnim objektima (teglenicama) ili na platformama, često izgrađenim daleko od obala u otvorenim morima. S ovakvih temelja obično se izrađuje veći broj bušotina usmjeravanih koso u različitim smjerovima. Tehnologija bušenja ovakvih bušotina ne razlikuje se od uobičajene.

Metode bušenja i sastav uređaja za bušenje. Glavne danas primjenjivane metode dubinskog bušenja jesu udarno ili perkusiono bušenje (bušenje udaranjem) i rotaciono bušenje ili vrtanje.

Po načinu odstranjivanja krhotina sa dna bušotine, udarna se bušenja mogu podijeliti na dvije velike skupine: bušenje udaranjem o suho dno i bušenje udaranjem uz ispiranje dna bušotine. Među uređaje koji se koriste principima prve skupine pripadaju postrojenja za bušenja tzv. kanadsko-galijskim načinom i pensilvanijskim načinom, a među one koji se koriste principima druge skupine, postrojenja za tzv. brzoudarna bušenja uz ispiranje dna bušotine. Ispiranje se ostvaruje neposredno (direktno) ili posredno (indirektno, obrnuto, inverzno ispiranje).

Zajedničko je svim metodama bušenja udaranjem da se stijene razrušavaju udaranjem dlijeta o dno nastupno-povratnim okomitim kretanjem kolone bušačih alatki u kanalu bušotine. Kolona bušačih alatki pri bušenju udaranjem o suho dno sastavljena je od dlijeta plosnata oblika iznad kojega slijede, redom, proširivač, teška šipka punog presjeka (tzv. udarna šipka ili optežnik) i rastezljive škare, a na kraju su uz odgovarajuće njihalo priključene ili bušaće šipke (u kanadsko-galijskih postrojenja za bušenje) ili bušaće užee (u tzv. pensilvanijskih postrojenja za bušenje). Sastav kolone bušačih alatki za brzoudarno bušenje uz ispiranje dna razlikuje se od prethodnih po tome što se u njihovom sastavu ne nalaze rastezljive škare i što su sve ostale alatke: dlijeto, proširivač, teške i bušaće šipke, opremljene kanalima za ispiranje. One su na vrhu snabdjevene rotacijskom isplachnom (isplachnom) glavom.

U bušenje vrtanjem spadaju sve metode razrušavanja stijena dlijetom koje se pod opterećenjem okreće na dnu bušotine. Zavisno od konstrukcije dlijeta, to se razrušavanje vrši rezanjem, cijepanjem, drobljenjem ili istiranjem, ili kombinacijom navedenih djelovanja. Dlijeto okreće na dnu bušotine ili motori postavljeni na površini (parni strojevi, motori s unutarnjim izgaranjem ili električki) posredstvom vrtaćeg stola (rotacijskog stola, rotora) i kolone bušačih alatki sastavljene od dlijeta, proširivača, teških i bušačih šipki, te radne šipke i isplachne glave, ili tzv. uronjeni motori (turbinske ili električke bušilice) smješteni blizu dna bušotine i uvršteni u kolonu bušačih alatki neposredno iznad dlijeta.

Bez obzira na način rada, sva postrojenja za bušenje sastavljena su od tri glavna sklopa: 1. sklopa za tegljenje (izvlačenje i spuštanje bušačih alatki i zaštitnih cijevi); 2. sklopa za bušenje i 3. sklopa za iznošenje čestica probušenih stijena na površinu. Da se olakša i ubrza spuštanje i izvlačenje teških alatki i cijevi, bušačim postrojenjima dodati su jarboli, dvoonošci, tronošci, četveroonošci ili pak tornjevi rešetkastih konstrukcija i energetska postrojenja za pokretanje navedenih postrojenja (parni strojevi, motori s unutarnjim izgaranjem ili elektromotori) i za osvjetljavanje radilišta.

Sklop za tegljenje sastoji se od dizalice opremljene bubnjem i užetom za tegljenje, nepokretnog bloka koloturnika, smještenog na vrhu (kruni) tornja, i pokretnog bloka koloturnika, snabdjevnog kukom na koju se elevatorom vješa kolona alatki za bušenje ili kolona zaštitnih cijevi pri njihovom spuštanju ili izvlačenju.

Sklop za bušenje udaranjem sastavljen je od njihala, pokretnog koljenastom osovinom koja alatkama osigurava okomito nastupno-povratno kretanje, uređaja za postepeno popuštanje alatki priključenih uz njihalo i neophodnih pogonskih i prijenosnih uređaja.

Sklop za bušenje vrtanjem sastoji se od vrtaćeg (rotacionog) stola ili od površinskih uređaja za okretanje alatki, te pripadajućih pogonskih i prijenosnih uređaja.

Sastav sklopa za iznošenje čestica probušenih stijena zavisi od toga da li se one odstranjuju povremeno (pri bušenju udaranjem o suho dno) ili neprekidno (u svih bušenja s ispiranjem i ispuhivanjem). U prvom slučaju taj se sklop sastoji od dizalice s bubnjem i užetom prebačenim preko koluta na vrhu tornja. Uz užee pričvršćena je kašika za izvlačenje mulja s dna bušotine; to je cijev duga 8 i više metara, promjera do 150 mm, opremljena pri dnu zaklop-



Sl. 3. Dlijeta za bušenje vrtanjem

cem. U drugom slučaju čestice sa dna bušotine iznose se isplakom ili plinom (zrakom) pod pritiskom, posredstvom pumpi ili kompresora, pri čemu brzina uzlazne struje isplačne tekućine iznosi 0,9...1,5 m/s i više, a brzina zraka ili plina 12...31,5 m/s.

TEHNOLOŠKI PROCES BUŠENJA

Tehnološki proces bušenja sastoji se, bez obzira na način bušenja, od triju glavnih i nekoliko sporednih operacija. Glavne su operacije: razrušavanje stijena, odstranjivanje čestica probušenih stijena sa dna bušotine i učvršćivanje izrađenog kanala bušotine ugradnjom kolone zaštitnih cijevi (u suvremenih načina bušenja) i cementiranjem.

Pri bušenju udaranjem o suho dno izmjenično se razrušava stijena i odstranjuju čestice sa dna bušotine. Pri tom je opće pravilo: što tvrda stijena to veći broj udaraca i to manja dužina koraka dlijeta, i obrnuto.

Pri udarnom bušenju uz ispiranje dna, kao i pri svim metodama vrtanja (bušenja uz okretanje alatki), operacije razrušavanja stijena i odstranjivanja njihovih čestica sa dna bušotine vremenski se poklapaju, tj. stijene se buše uz stalno ispiranje (ili ispuhivanje) dna.

Budući da je razrušavanje stijena vrtanjem posljedica složenog djelovanja pritiska na dlijeto i njegova okretanja, uz istodobno aktivno sudjelovanje ili isplačne tekućine (pri ispiranju dna) ili plinovitog sredstva (pri ispuhivanju dna), to su suvremene konstrukcije postrojenja za bušenje vrtanjem veoma elastične. One se mogu prilagoditi različitim uvjetima rada. Primjenjivanjem odgovarajućih alatki moguće je opteretiti alatke za razrušavanje pritiskom od dijelova tone do 20 i više tona.

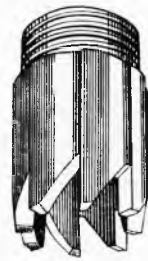
Izrađeni kanal bušotine učvršćuje se ugradnjom zaštitnih cijevi ili postepenim produžavanjem kolone zaštitnih cijevi koje neposredno prate dubljenje bušotine ili ugrađivanjem kolone zaštitnih cijevi u kanal bušotine pošto je ona postigla projektiranu dubinu. Prvonavedeni način primjenjuje se kad se bušotine izrađuju udaranjem dlijeta o suho dno. Postupa se tako da se kolona zaštitnih cijevi produžuje postepeno po jednom cijevi odmah nakon što je kanal bušotine produbljen za dužinu odnosno cijevi. Pri tom je nezaštićeni dio kanala bušotine tokom izrade veoma malen. Suprotno tome, operacija učvršćivanja kanala bušotine pri svim suvremenim metodama bušenja uz ispiranje ili ispuhivanje slijedi tek nakon što se probuše predviđene naslage i dno bušotine dostigne unaprijed određenu dubinu. Pri tom kanal bušotine ostaje otvoren i nezaštićen u dužini ponekad do 2000 i više metara. Zarušavanje kanala sprečava se najčešće djelovanjem isplačne tekućine. Proces učvršćivanja bušotina završava se kod suvremenih metoda bušenja cementiranjem kolone zaštitnih cijevi.

Osim navedenih glavnih operacija, suvremeni tehnološki proces izrade bušotina obuhvaća i niz *sporednih operacija* koje osiguravaju kvalitetnu izradu bušotina: mjerenje otklona kanala bušotine od predviđenog smjera, i azimuta tog otklona; mjerenje pružanja, pada i nagiba probušenih naslaga; mjerenje električnih i radioaktivnih svojstava probušenih stijena; vađenje jezgara iz bokova izrađenog kanala bušotine i pojedinačna iskušavanja probušenih naslaga koje su ispoljile obilježja naftonosnosti ili plinonosnosti, da bi se utvrdila njihova ekonomska vrijednost. Konačno, u sporedne operacije spada *instrumentiranje*. To je zajedničko ime za niz zahvata poduzimanih da se odlomljene alatke izvuku iz bušotine i da se uspostavi stanje koje omogućava nastavak rada, kao i za zahvate koji se poduzimaju radi ugušenja iznenadnih neželjenih slobodnih erupcija iz bušotine.

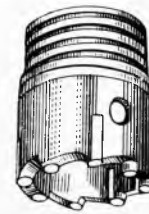
Razrušavanje stijene. Alatke za razrušavanje dijele se, prema namjeni, na tri glavne skupine: 1. dlijeta kojima se stijena razrušava u punom presjeku oblika kruga; 2. krune kojima se razrušava samo presjek prstenasta oblika, tako da se od probušene stijene dobiva valjkast uzorak, *jezgra*, koji se izvlači na površinu i 3. dlijeta posebnih namjena za različite pomoćne radove.

Za poravnavanje eventualno zaostalih neravnina u kanalu bušotine i za njegovo proširivanje stavljaju se iznad dlijeta, obično neposredno iznad njega, alatke različitih konstrukcija koje se nazivaju proširivačima.

Stijena se na dnu bušotine razrušava rezanjem, otkidanjem, drobljenjem ili istiranjem, već prema alatu koji se upotrebljava. Mekane stijene razrušavaju se rezanjem dlijetima tzv. režućeg



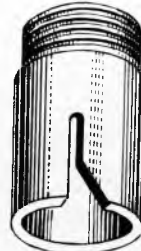
Nazubljena kruna



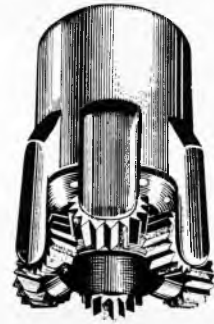
Kruna ojačana prizmatičkim štapićima volframova karbida



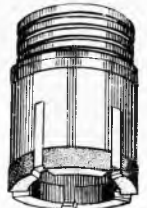
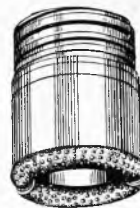
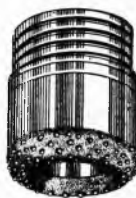
Kruna za bušenje rezanjem



Kruna za bušenje uz primjenu sačme



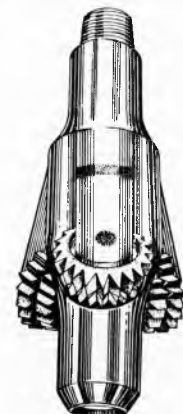
Kruna za bušenje cijepanjem i kidanjem



Krune s dijamentima

Sl. 4. Krune za bušenje vrtanjem

tipa ili lopatastim dlijetima. Najpoznatija takva dlijeta jesu: »riblji rep«, dvo-, tro- i više-lopatasta dlijeta i tzv. parabolično dlijeto. Karakteristično je za ova dlijeta da su njihove oštrice tokom bušenja u neprekidnom dodiru sa stijenama koje se buše. Čvršće i tvrde stijene razrušavaju se dlijetima i *krunama* koje otkidaju, drobe ili taru stijenu na dnu bušotine. Po svojoj konstrukciji, to su pretežno dlijeta sa žrnjevima i kolutima različitih oblika. Žrnjevi imaju oblik cilindra, konusa ili skraćenog konusa, a opremljeni su većim brojem vijenaca zubi ili bradavicama. Budući da su ova dlijeta određena za bušenje stijena svih vrsta, od slabih do čvrstih i najtvrdih, ona se po konstrukciji žrvanja i njihovih zubi razlikuju. Pri izboru dlijeta vrijedi pravilo: što čvršća i tvrda stijena to treba da je gušći raspored zubi na žrnjevima i manja njihova dužina. Za razrušavanje veoma čvrstih i naročito tvrdih



Sl. 5. Dlijeta za proširivanje kanala bušotine

stijena upotrebljavaju se žrvanjska dlijeta s bradavicama od volfram-karbida, koje imaju oblik polukugle, a određenim su rasporedom umetnute u žrvnjeve, ili se upotrebljavaju dlijeta obložena dijamantima. Na sl. 3 prikazane su različite konstrukcije dlijeta, a na sl. 4 različite konstrukcije kruna.

Kanali bušotina proširuju se dlijetima naročitih konstrukcija (sl. 5) i proširivačima (sl. 6), kojih su konstrukcije prilagođene namjeni, tj. bušenju stijena određenih fizičko-mehaničkih svojstava.

Za skretanje kanala bušotina u stranu i za koso usmjeravanje bušotina upotrebljavaju se posebno konstruirana dlijeta često uz primjenu naročito *klina za usmjeravanje* (whipstock) (sl. 7).

Otvoreni kanal bušotine pročišćava se šiljastim dlijetima (sl. 8) i strugačima konstrukcije prikazane na sl. 9.

Cementni čepovi u otvorenom kanalu bušotine ili u koloni zaštitnih cijevi buše se šiljastim dlijetima, a unutarnji zidovi kolona zaštitnih cijevi čiste se, nakon izvršenih cementiranja, strugačima oblika prikazanog na sl. 10.

Odstranjivanje čestica probušnih stijena. Isplake. Velike brzine bušenja mogu se postići samo ako dlijeto stalno radi na čistom dnu. Krotine probušnih stijena moraju se gotovo trenutno i neprekidno odstranjivati sa dna bušotine. S obzirom na to, svi suvremeni procesi bušenja obuhvaćaju odstranjivanje čestica probušnih stijena sa dna bušotine ispiranjem ili ispuhivanjem istovremeno s razrušavanjem stijene. Za ispiranje upotrebljavaju se različite tekućine (obična voda, morska voda, posebno pripremljene tekućine, nafta i dr.), a za ispuhivanje različiti plinovi (zrak, zemni plin). Upotrebljavane tekućine nazivaju se, općenito, *isplakama*.

Glavni su zadaci isplake: 1. hlađenje i podmazivanje dlijeta i kolone bušaćih alatki; 2. odstranjivanje krotina probušnih stijena sa dna bušotine i njihovo iznošenje na površinu; 3. održavanje čestica probušnih stijena u stanju lebđenja u slučajevima prekida kružnog toka isplake u bušotini; 4. savladavanje pritiska u podzemlju pri izradi kanala bušotine; 5. oblaganje zidova kanala bušotine nepropusnim, gustim i elastičnim oblogom.

Za izvršavanje tih zadataka kao isplake se upotrebljavaju tekućine kojima se u tu svrhu osiguravaju pogodna fizička svojstva. Većina isplaka su složeni disperzni sistemi, sastavljeni od koloidnih disperzija (čvrstih čestica veličine $< 0,1 \mu\text{m}$ raspršenih u tekućoj fazi), grubljih suspenzija (čvrstih čestica veličine $> 0,1 \mu\text{m}$ raspršenih u tekućoj fazi) i emulzija (sitnih kapljica jedne tekućine raspršenih u drugoj tekućini). Osim toga isplake sadrže inertne dispergirane čvrste tvari kao što su oteživači, pijesak i čestice probušnih stijena, i kemikalije potrebne za održavanje svojstava isplake u željenim granicama. Uslijed svoje koloidne prirode isplake imaju svojstvo tiksotropije, tj. kad su podvrgnute naponima smicanja, npr. kad struje dovoljnom brzinom, one se nalaze u stanju koloidnog »sola« razmjerno malog viskoziteta, a kad miruju, zgusnu se u viskoznan koloidni »gel«.

U toku bušenja isplaka se obogaćuje česticama probušnih stijena koje katkad ulaze u kemijsku reakciju s reagentima upotrijebljenim za postizanje određenih svojstava isplake. Posljedica je toga da se isplaka zagađuje, njezina svojstva se mijenjaju, te je treba ponovo obrađivati reagentima (regenerirati).

Da bi isplake mogle poslužiti svojoj svrsi, one moraju imati određenu specifičnu težinu, potrebni viskozitet, neophodnu »čvrstoću gela« (engl. gel strength), što je moguće manju sposobnost filtracije, izvjestan statički otpor pri pokretanju, određenu koncentraciju vodikovih iona i moraju biti stabilne. *Čvrstoća gela* je mjera za stepen tiksotropije isplake, tj. za brzinu kojom se pri prelazu iz stanja gibanja u stanje mirovanja malo viskozni sol pretvara u vrlo viskozni gel. Ona se određuje mjerenjem razlike viskoziteta isplake u razmaku od 10 minuta nakon što je prestalo djelovanje sile smicanja na nju, tj. nakon što je isplaka prestala strujati ili se prestala miješati. Ako je čvrstoća gela suviše mala, odlomljene krotine stijene mogu se za vrijeme neizbježnih zastoja u radu istaložiti i tako blokirati dlijeto; ako je čvrstoća gela prevelika, nastaju teškoće pri ponovnom puštanju isplake u cirkulaciju nakon zastoja. Pod *filtracijom* u tehnici dubinskog bušenja razumijeva se izdvajanje tekućine iz disperznog sistema.

Isplake se mogu svrstati u ove skupine: 1. isplake kojima je osnova slatka voda: a) proste mješavine gline i slatke vode: glinovite isplake, b) kemijskim reagentima obrađene mješavine gline i slatke vode: kemijski obrađene glinovite isplake, i c) vapnom obrađene glinovite isplake; vapnene ili kalcijumske isplake; 2. isplake kojima je osnova slana (morska) voda; 3. emulzijske isplake: a) emulzije »ulje u vodi« i b) tzv. obrnute emulzije: emulzije »voda u ulju«; 4. isplake s uljnom osnovom, i 5. isplake s površinski aktivnim tvarima.

Glavni sastojci *glinovitih isplaka sa slatkom vodom* jesu slatka voda i u njoj suspendirane sitne čestice gline. Navedenoj mješavini dodaju se različite tvari radi postizanja određenih svojstava.

Neki od minerala gline usitnjeni do koloidnih veličina lako se hidratiraju, vežu vodu i stvaraju s njom stabilne koloidne sisteme. Time se naročito ističe mineral montmorillonit, glavni sastojak bentonita. Bentonitske gline upotrebljavaju se pretežno kao dodatak glinama slabijeg kvaliteta pri izradi običnih glinovitih isplaka kako bi se isplaci povećali viskozitet i čvrstoća gela a smanjila filtracija vode iz nje. Proste glinovite isplake uglavnom zadovoljavaju pri izradi plitkih bušotina. Kad bušotina naide na naslage gipsa ili anhidrita, u takvoj isplaci glina se fiokulira i taloži iz nje, što ima za posljedicu povećanje filtracije vode iz isplake i povećanje viskoziteta i čvrstoće gela. Isplaka uslijed toga gubi potrebna svojstva. Dok isplaka nije znatnije zagađena, njezina se svojstva mogu razmjerno lako uspostaviti dodavanjem natrijum-bikarbonata ili barijum-karbonata, kojima se štetni topljivi kalcijum odstranjuje iz isplake u obliku kalcijum-karbonata. Smanjivanje viskoziteta ovih isplaka postiže se dodavanjem polisofata, kaustične sode, taninskog ekstrakta, ligninskih i huminskih sastojaka. Smanjivanje filtracije vode postiže se dodavanjem organskih koloida, najčešće karboksimetilceluloze, a ponekad i škroba. Isplake obrađene mješavinom kaustične sode i taninskog ekstrakta poprimaju crvenu boju te se u praksi često nazivaju »crvenim isplakama«.

Glinovite isplake upotrebljavane pri bušenju stijena koje ih zagađuju kalcijum-ionom prethodno se obrađuju gašenim vapnom. Takve isplake nazivaju se *vapnenim* ili *kalcijumskim isplakama*. Male količine vapna znatno povećavaju viskozitet takve isplake, a veće količine vapna smanjuju viskozitet. Prema tome se razlikuju dvije vrste vapnenih (kalcijumskih) isplaka: isplake obrađene velikom količinom vapna, ili visoko-vapnene isplake, i isplake obrađene malom količinom vapna ili nisko-vapnene isplake.

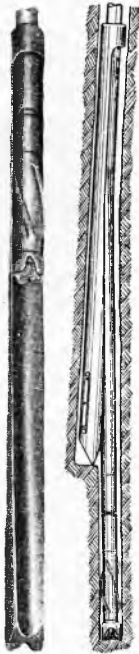
Isplake s visokim sadržajem vapna imaju mali viskozitet i



Sl. 6. Proširivači



Sl. 8. Šiljasto dlijeto



Sl. 7. Klin i dlijeta za skretanje kanala bušotine u stranu



Sl. 9. Strugač obloge isplake



Sl. 10. Strugač za čišćenje zaštitnih cijevi nakon cementiranja bušotine

malu čvrstoću gela, lako im se održava niska filtracija, veoma su otporne prema zagadivanju (znači, razmjerno su postojanih svojstava), mogu se otežavati do relativne gustoće 2,4, te pri malom viskozitetu mogu imati visoku koncentraciju čvrstih tvari, pH im je obično veći od 12. Dobivaju se dodavanjem 7,6·15,2 kg/m³ kaustične sode, 7,6·15,2 kg/m³ organskih reagenata-razrjeđivača i 7,6·76 kg/m³ gašenog vapna. Nedostatak im je što su na visokim temperaturama (u dubokim bušotinama) sklone skrućivanju. Isplake s niskim sadržajem vapna sadrže manje količine kaustične sode, gline i vapna. Karakterizirane su visokim pH (10,5·12,5). Po Watkinsu, u isplakama ove vrste ima 19 kg/m³ bentonitne gline, 3,8 kg/m³ NaOH, 7,6 kg/m³ taninskog ekstrakta drveta kebračo, 7,6 kg/m³ reagenta-stabilizatora (ligninske emulzije), 3,8 kg/m³ karboksimetilceluloze ili sličnog dodatka za smanjenje filtracije, barita koliko je potrebno da se dobije željena specifična težina, 10% (zapreminskih) plinskog ulja i toliko gašenog vapna da se pH održava između 10,5 i 12,5. Primjenom ovih isplaka sprečava se bujanje glinenih naslaga. Ova vrsta isplaka nije toliko otporna prema zagadivanju te zahtijeva stalno provjeravanje svojstava. Znatnog je viskoziteta, a za razređivanje upotrebljavaju se različiti lignosulfonati. Otporna je protiv visokih temperatura, a upotrebljava se pri bušenju naslaga gipsa i anhidrita.

Isplake pripremljene s morskom (slanom) vodom primjenjuju se pri bušenju debelih naslaga soli i ondje gdje nema slatke vode. Za pripremanje ovakvih isplaka nisu pogodine bentonitne gline jer njihove čestice u dodiru sa slanom vodom flokuliraju i stvaraju nestabilne suspenzije. Isplake odgovarajućih svojstava mogu se, međutim, pripremiti od slane vode i tzv. slanah gline, kojima osnovu čini mineral atapulgite, na jednak način kao što se to čini miješanjem bentonitne gline sa slatkom vodom. Slane gline ne osiguravaju, međutim, isplaci svojstvo odlaganja gustog, nepropusnog i elastičnog obloga na zidovima kanala bušotine. Naprotiv, one stvaraju debeli oblog koji dozvoljava veliku filtraciju vode iz isplaka. Za smanjenje filtracije takvih isplaka upotrebljavaju se organski koloidi, karboksimetilceluloza ili škrob. Filtracija ovih isplaka može se pravilnom obradom svesti na 1 cm³/30 min. Dodavanjem oteživača gustoća im se može povećati do 2,28 g/cm³. Sklonost pjenušanju ove isplake smanjuje se dodavanjem površinski aktivnih tvari.

Emulzijske isplake vrste »ulje u vodi« jesu glinene isplake (napravljene sa slatkom ili slanom vodom) kojima su dodatkom do 10% nafte ili plinskog ulja poboljšana svojstva. Kao emulgatori upotrebljavaju se sapuni, ligninski sastojci, organski koloidi kao što su škrob ili karboksimetilceluloza i druge čvrste koloidne tvari. Stabilnost ovih isplaka postiže se pažljivim miješanjem. Za pripremanje ove isplake upotrebljavaju se sve vrste sirovih nafti i ulja, no svrsi najbolje odgovara rafinirano plinsko ulje koje treba da udovoljava ovim uvjetima: da je nekrekovano, da ima visoko plamište kako bi se smanjila opasnost zapaljenja, da ima visoku anilinsku tačku (iznad 155) kako bi se smanjilo oštećenje gumenih dijelova u cirkulacijskom sistemu i da ima nisku tačku skrućivanja kako bi se moglo upotrebljavati i na niskim temperaturama. Prednosti rafiniranog plinskog ulja su miris i fluorescentnost, koje je lako zamijetiti, što je od naročite važnosti za geologe koji ispituju naftonosnost čestica probušenih stijena.

Glavne koristi primjene pravilno pripremljenih emulzijskih isplaka vrste »ulje u vodi« jesu: povećanje mehaničke brzine bušenja; bolje podmazivanje dlijeta i bušačih alatki, manji momenti vrtnje i duži vijek trajanja dlijeta; usporeno korodiranje bušačih alatki; bolja svojstva takvih isplaka; smanjen viskozitet, a s tim u vezi i radni pritisak pumpi, smanjena filtracija i tanki, elastični oblog na zidovima kanala bušotine; manje oštećenje naftonosnih naslaga, a s tim u vezi povoljniji uvjeti za buduće pritezanje nafte iz ležišta u kanal bušotine; manje poteškoća koje se inače ispoljavaju pri izvlačenju alatki iz bušotine kao posljedica bujanja glinovitih naslaga i proširenja kanala bušotine. Nedostaci su ovih isplaka nešto veći troškovi za njihovo pripremanje i izvjesne poteškoće pri analiziranju jezgara. Međutim, ti su nedostaci u poređenju s navedenim prednostima neznatni, te se emulzijske isplake naširoko primjenjuju. Emulzijskim se isplakama održavaju svojstva jednako kao običnim glinovitim isplakama. Povremenim provjeravanjem svojstava utvrđuje se eventualna potreba dodavanja emulgatora ili ulja. Rezultati ispitivanja filtracije služe kao mjerilo

za ocjenu postojanosti ovih isplaka. Sve dok se u filtratu ne pojavljuje slobodno ulje, njegove su kapljice posve raspršene i blokirane filtracijskim oblogom.

Obrnute emulzijske isplake (emulzijske isplake vrste »voda u ulju«) primjenjuju se: pri bušenju i jezgrovanju kroz naslage za koje se pretpostavlja da su naftonosne, kako bi se spriječilo njihovo zagadenje isfiltriranim vodom i tako izbjeglo smanjenje propusnosti i buduće proizvodnosti; kad se sadržaj vezane vode u ležištima utvrđuje analiziranjem jezgara; pri bušenju naslaga bentonitnih gline koje u dodiru sa slobodnom vodom iz isplaka stalno bubre i urušavaju se u kanal bušotine; pri bušenju na razmjerno visokim temperaturama koje pospešuju skrućivanje ostalih vrsta isplaka i uzrokuju druge neželjene probleme; kao »jastuk« koji se dobiva utiskivanjem nekoliko buradi ove isplake u naslage predviđene za raskrivanje propucavanjem otvora da bi se na taj način spriječilo njihovo oštećenje; za oslobađanje u bušotini zahvaćenih bušačih alatki; za zaštitu alatki i postrojenja od brzog korodiranja; u »liječenju« (popravljanju, »remontiranju«) proizvodnih bušotina i sl.

Svojstva ovih isplaka moraju se stalno provjeravati. Jedna od tipičnih isplaka ove vrste sadrži 30·60% vode (slatke ili slane) dispergirane u plinskom ulju ili u sirovj nafti. Prije dodavanja vode ulje se mora dobro promiješati s emulgatorom. Po potrebi, ove isplake mogu sadržavati još glinu i oteživače. Promjena svojstava ovih isplaka postiže se mijenjanjem odnosa »voda : ulje« u njoj; najpovoljniji odnos se prethodno utvrđuje laboratorijskim i poluindustrijskim ispitivanjima. Viskozitet ovih isplaka obično je velik, a čvrstoća gela mala. Filtracija im je posve mala i često je jednaka nuli. Ukoliko i dođe do filtracije, filtrira samo ulje. Do temperature 93 °C (oko 200 °F) ove su isplake razmjerno postojane, a njihova primjena na višim temperaturama zahtijeva posebnu pažnju i stalni nadzor. Prednosti su ove isplake u usporedbi s isplakama na uljnoj osnovi: lakše miješanje i rukovanje, niži troškovi pripremanja i okolnost da se za njihovo pripremanje mogu upotrijebiti sve vrste voda i većina sirovih nafti. Nedostatak im je, međutim, moguća nepostojanost na temperaturama višim od 93 °C i sklonost emulzije »voda u ulju« da se pretvori u emulziju »ulje u vodi« kad se u isplaci nakupi mnogo čvrstih čestica (krhotina stijena ili oteživača).

Isplake s uljnom osnovom sastoje se, uglavnom, od plinskog ulja visokog plamišta, oksidiranog asfalta, organskih kiselina, alkalija, različitih kemijskih reagenata, stabilizatora i 2·5% vode. Asfalt je u ovim isplakama koloidna frakcija koja im daje svojstvo oblaganja zidova kanala bušotine. Miješanjem organskih kiselina s alkalijama dobivaju se nestabilni sapuni od kojih zavise viskozitet i čvrstoća gela ove isplake. Prevelik viskozitet takvih isplaka smanjuje se dodavanjem organskih kiselina. Dodavanjem alkalija njihov viskozitet se povećava. Na taj se način viskozitet ovih isplaka može prilagodivati potrebama unutar širokih granica. Voda je u njima emulgirana te se bez razbijanja emulzije ne može iz isplake odvojiti. Ova vrsta isplake veoma je skupa, a primjenjuje se u iste svrhe kao i emulzijske isplake vrste »voda u ulju«. Posebna im je odlika gotovo potpuna neosjetljivost prema solima, gipsu i anhidritu, jer su oni u ulju netopljivi. Glavne prednosti svih isplaka u kojima je ulje kontinuirana faza jesu minimalno zagadivanje potencijalnih nosilaca nafte i relativna neosjetljivost prema onečišćenju solima.

Za ispiranje bušotina može se ponekad upotrijebiti i čista sirova nafta. Međutim, njezina je primjena zbog malog viskoziteta, male čvrstoće gela, velikih gubitaka filtriranja i lake isparljivosti (opasnost požara!) vrlo ograničena.

Površinski aktivnim isplakama nazivaju se varijante naprijed opisanih isplaka, pripremljene na vodenj osnovi i obradene različitim neionizirajućim površinski aktivnim reagentima. Izbor površinski aktivne tvari zavisi od vrste u isplaci prisutnih elektrolita (NaCl, CaSO₄ i dr.). Površinski aktivne tvari mijenjaju koloidno stanje glinene komponente isplake od stanja potpune disperzije do stanja kontroliranog flokuliranja glinenih čestica. Glavne su prednosti ovih isplaka: što imaju manji plastični viskozitet, manju sklonost skrućivanju, visoku kemijsku i termičku postojanost na temperaturama čak i višim od 200 °C (400 °F); što nije potrebna obrada običnim razrjeđivačima jer se vrijednost pH može održavati

u neutralnom području, tj. između 7 i 9; što smanjuju bubrenje probušenih glinovitih naslaga a time i oštećivanje naslaga potencijalnih naftonosnih stijena; što uz njih bolje djeluju dodaci za smanjenje filtracije. Iako je primjena ove vrste isplaka bila namijenjena dubokim, jako vrućim bušotinama, njezine bitne prednosti proširuju joj mogućnost primjene i na druga područja.

Da bi isplake izvršile zadatak održavanja potrebnog pritiska na dno i zidove kanala bušotine, u mnogim se slučajevima moraju otežavati dodavanjem *oteživača*. Najčešće se upotrebljava usitnjeni barit (dobiven prosijavanjem kroz standardno sito od 4900 otvora na 1 cm², što odgovara Tylerovom situ od 170 meša), s obzirom na njegovu veliku specifičnu težinu i malu abrazivnost. U drugim slučajevima, pri pojavi intenzivnijih gubljenja isplake u šupljikavim i sitnoraspucanim naslagama, isplake se moraju olakšavati, što se postiže njihovim razrjeđivanjem, tj. dodavanjem vode i odgovarajućih kemijskih reagenata za održavanje potrebnih svojstava, a u pojedinim slučajevima i aeriziranjem isplaka (dodavanjem zraka).

Da bi se spriječilo gubljenje isplaka u šupljinama i pukotinama stijena kroz koje je prošao kanal bušotine, pored reagenata za povećavanje viskoziteta isplakama se ponekad dodaju i *punila*: inertne tvari, različiti otpaci, prirodna i sintetična vlakna, sitne pločice (npr. liskuna), piljevina i sl., kojim se tvarima sitne šupljine i pukotine mogu zabrtviti.

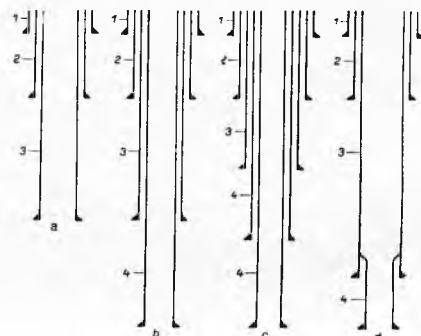
Isplake se pripremaju u miješalicama različitih konstrukcija, od hidrauličkih do mehaničkih, bilo pojedinačno, na svakoj pojedinoj bušotini, ili centralizirano, kad se istodobno radi s velikim brojem postrojenja za bušenje. Pretežni dio sirovina za pripremanje isplaka, počevši od glina, isporučuje se danas pod raznim trgovačkim nazivima u obliku prašaka, tako da je pripremanje znatno olakšano.

Učvršćivanje kanala bušotine. Izradom kanala bušotine narušava se u naslagama probušenih stijena dotada uravnoteženo stanje unutarnjih naprezanja. Osim toga, kanalom bušotine raskriva se, s jedne strane, niz slojeva koji su potencijalni nosioci nafte i plina, a s druge strane i niz nosilaca dubinskih voda i iznad i ispod nosilaca nafte i plina.

Kako kanalom eksploatacijske bušotine treba kroz dugo vrijeme da iz odgovarajućih naslaga u podzemlju pritječe na površinu nafta i plin, očito je da taj kanal treba prije svega učvrstiti i osigurati od urušavanja. Kanali bušotina se zato učvršćuju ugrađivanjem zaštitnih (obložnih) cijevi. Suvremeni način zaštićivanja bušotine sastoji se u ugrađivanju što manjeg broja kolona zaštitnih cijevi. Da se ušće bušotine i temelji postrojenja za bušenje u početku zaštite od podlokavanja i da se struja isplačne tekućine može odmah uputiti u žljebove a kanal bušotine usmjeriti u određenom pravcu, u bušotinu se ugrađuje obično jedna ili dvije kraće zaštitne cijevi, ukupne dužine 6·12 m. Ova se cijev naziva *usmjerivač*. Druga kolona zaštitnih cijevi nazvana je *uvodnom kolonom* ili *konduktorom*. Namijenjena je učvršćivanju nevezanih, nestabilnih površinskih naslaga i nepropusnom izoliranju mogućih pritoka vode, nafte i plina iz naslaga na malim dubinama. Zadatak joj je uz to da kanal bušotine konačno usmjeri (okomito ili koso) prema određenom mjestu u podzemlju. Dubina ugradnje uvodne kolone zavisi od geološkog profila područja u kojem se buši i od projektirane dubine bušotine. Dužina uvodnih kolona kreće se obično od 40 do 60 m u plićim bušotinama, a do 500·600 i više metara u dubokim bušotinama. Iza toga, kanal bušotine se produbljuje, obično do projektirane dubine. Ako se njime raskriju iskorištavanja vrijedne naslage nafte ili plina, ugrađuje se u nj kolona zaštitnih cijevi, nazvana *eksploatacijskom kolonom*, koja treba da osigura trajnost kanala bušotine za cijelo razdoblje njezinog budućeg iskorištavanja. Izlazak ove kolone ispod kraja prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi iznosi često do 2000 i više metara. Dogada se, međutim, da se za vrijeme produblivanja kanala bušotine ispolje izvanredno teški prirodni uvjeti i poteškoće koje se drugačije ne mogu savladati, posebice kad se radi o naročito dubokim bušotinama, pa se u razmaku između uvodne i eksploatacijske kolone mora ugraditi još jedna pa čak i dvije tzv. *tehničke kolone*. Zaštita kanala bušotine cijevima prikazana je shematski na sl. 11. Vrhovi svih navedenih kolona zaštitnih cijevi dosižu ušće bušotine. Ponekad se donji dio bušotine zaštićuje cijevima koje ne sežu do ušća bu-

šotine, te se ugrađuju tako da sežu od dna bušotine do na 20·50 m unutar prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi. Takva skraćena kolona naziva se *repom* (liner).

Zaštitne cijevi su čelične bešavne cijevi izrađene valjanjem. Standardna sirovina je čelik označen po API-standardu sa F-25, H-40, J-55, N-80, P-110 i V-150. Duljina pojedinačnih cijevi



Sl. 11. Shematski prikaz zaštite kanala bušotine obložnim cijevima. a jednokolonska konstrukcija: 1 usmjerivač, 2 uvodna kolona, 3 eksploatacijska kolona; b dvokolonska konstrukcija: 1 usmjerivač, 2 uvodna kolona, 3 tehnička kolona, 4 eksploatacijska kolona; c trokolonska konstrukcija: 1 usmjerivač, 2 uvodna kolona, 3 prva tehnička kolona, 4 druga tehnička kolona, 5 eksploatacijska kolona; d jednokolonska konstrukcija s »repom»: 1 usmjerivač, 2 uvodna kolona, 3 eksploatacijska kolona, 4 »rep» (liner)

kreće se u granicama od 4,88 m do 10,36 i više metara, a promjer im je od 4 $\frac{1}{2}$ '' do 20'' (po standardu API Američkog petrolejskog instituta). Cijevi promjera 11 $\frac{3}{8}$ '' do 20'' upotrebljavaju se obično za usmjerivače, cijevi promjera 8 $\frac{3}{8}$ ''·13 $\frac{3}{8}$ '' za uvodne kolone, cijevi promjera 7'' do 10 $\frac{3}{8}$ '' za tehničke kolone, a cijevi promjera 4 $\frac{1}{2}$ ''·8 $\frac{3}{8}$ '' za eksploatacijske kolone. Vrh uvodne kolone zaštitnih cijevi oprema se najčešće *preventerima* — uređajima za zatvaranje bušotine u slučajevima neočekivanih iznenadnih erupcija do kojih ponekad dolazi za vrijeme izrade bušotina. Kolone zaštitnih cijevi opremaju se na donjem kraju tzv. *petom* (*papučom*). Peta je čelični prsten dužine 0,30·0,40 m, debljine zidova 15·19 mm. Namjena joj je povećanje mehaničke čvrstoće donjeg kraja kolone zaštitnih cijevi. Ona može biti opremljena protupovratnim ventilom kojemu je zadatak da pri cementiranju spriječi vraćanje cementne kaše u zaštitne cijevi. Ukoliko se peta ne opremi protupovratnim ventilom, on se ugrađuje iznad nje, na sastavu prve donje i naredne druge cijevi. Osim toga, donji kraj kolone zaštitnih cijevi koja se namjerava cementirati oprema se tzv. *zaustavnim prstenom* (*udarom pločom*) koji se postavlja u spojnicu cijevi 15·20 m iznad pete. Zadatak je zaustavnog prstena da pri cementiranju kolone zaštitnih cijevi zaustavi cementacijske čepove.

Cementiranje bušotine. Ciljevi su cementiranja bušotine: odvajanje naftonosnih i plinonosnih naslaga, kako među sobom tako i od gornjih i donjih voda, tj. sprečavanje njihovog komuniciranja kroz prstenasti prostor između kanala bušotine i ugrađenih kolona zaštitnih cijevi; učvršćenje nevezane, nestabilne stijene čvrstom vezom kako sa zidovima kanala bušotine tako i sa zidovima čeličnih zaštitnih cijevi; sprečavanje erupcije plinova pod visokim pritiskom iz naslaga unutar cementirane zone bušotine; zaštita kolone zaštitnih cijevi od gnječanja pritiskom krovinskih naslaga i od brzog korodiranja, i učvršćenje kolone zaštitnih cijevi u slučaju potrebe na bilo kojoj udaljenosti iznad dna.

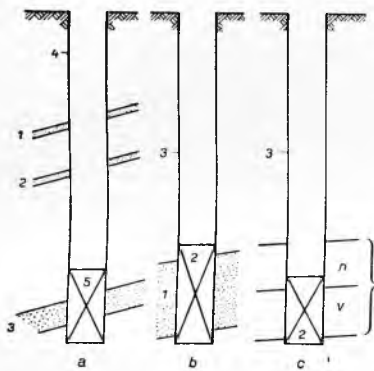
Prema svrsi razlikuje se: 1. cementiranje kolone zaštitnih cijevi protiskivanjem cementne kaše u prostor iza cijevi kroz njihovu petu, 2. cementiranje kolone zaštitnih cijevi snabdjevene prethodno izrađenim filtrom i tzv. manžetom kroz otvore (prozore) za cementiranje, 3. cementiranje repa (linera), 4. cementiranje s razdjelom (dvostepenasta i trostepenasta cementiranja dugačkih kolona zaštitnih cijevi), 5. cementiranje dna bušotine (postavljanje cementnih mostova — izrada cementnih čepova) i 6. cementiranje pod visokim pritiskom u složenim uvjetima.

Da bi se mogao postići cilj cementiranja, zidovi kanala bušotine moraju se očistiti od istaložene glinovite obloge na njima.

To se postiže tzv. *strugačima ili grebačima* (scratcher) koji se postavljaju na zaštitne cijevi. Uz to, da bi se oko zaštitnih cijevi izradio kamen jednake debljine, potrebno je ostvariti koaksijalnost zaštitnih cijevi i kanala bušotine, što se postiže opremanjem zaštitnih cijevi vodilicama (centralizerima) izrađenim od čvrstih čeličnih tračnih opruga. Pri ugrađivanju zaštitnih cijevi strugači i vodilice stružu i skidaju glineni oblog sa zidova kanala bušotine, stvarajući na taj način preduvjete za ostvarenje čvrste, nepropusne veze između cementnog kamena i zaštitnih cijevi s jedne strane a cementnog kamena i probušenih stijena s druge.

Cementi upotrebljavani za cementiranja u bušotinama pomiješani s vodom ili plinskim uljem daju lakotekuću masu, cementnu kašu. Mehanička svojstva tek pripremljenih cementnih kaša slična su svojstvima glinovitim isplaka. No uslijed kemijskih reakcija u cementnoj kaši, ona se ubrzo počinje zgušnjavati, gubi fluidnost te prelazi u plastičnu nepokretnu masu. Taj proces naziva se vezivanjem cementne kaše. Vezivanje traje obično nekoliko sati nakon miješanja cementa s vodom. Potom ta zgušnjuta plastična masa postepeno otvrdnjava, postaje čvrsta i pretvara se u cementni kamen. Taj proces naziva se stvrdnjavanjem cementa. On traje više dana, a ponekad treba da prođe i više mjeseci dok cementni kamen dokraja otvrdne.

Cementi za cementiranja (tamponiranja) u bušotinama, gdje često vladaju visoke temperature i pritisci, moraju udovoljavati i posebnim zahtjevima, a to su: da pomiješani s vodom ili s plinskim uljem i s drugim dodacima, kao pijeskom, pucolonom (prirodnim ili sintetskim), bentonitnim glinama, anhidritom, punilima (vlaknastim ili tankolističavim), budu toliko tekući da se mogu pumpati u prostor iza zaštitnih cijevi, a kad stignu onamo da odmah počnu vezivati i za razmjerno kratko vrijeme (najviše 1 sat) sasvim se zgusnu; da po završetku vezivanja brzo otvrdnu u čvrst, gust, nepropustan cementni kamen; da stvoreni cementni kamen bude otporan prema koroziji agresivnim dubinskim vodama; da se prigodom kasnijeg propucavanja otvora po kojima će u bušotinu pritijecati koja je prošla nafta ili plin cementni kamen ne krši i ne raspucava. Omler težina cementa i vode



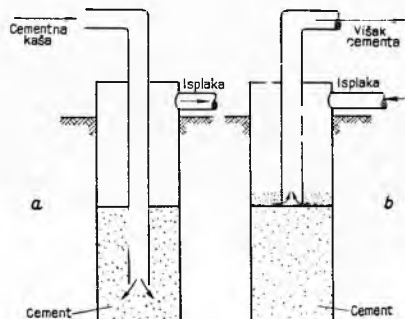
Sl. 12 Cementni čepovi (mostovi). a bušotina s više produktivnih slojeva: 1 ispitani sloj, 2 naredni sloj za ispitivanje, 3 najgornji sloj, 4 eksploatacijska kolona, 5 cementni čep; b bušotina kroz sloj s visokim pritiskom (I) koji će se nakon ispitivanja privremeno konzervirati cementnim čepom (2), 3 eksploatacijska kolona; c bušotina koja je prošla kroz produktivni sloj (I), v donji zavodnjeni dio, n gornji naftovodni dio, 2 cementni čep za zatvaranje zavodnjeno dijela, 3 eksploatacijska kolona

u cementnoj kaši, tzv. vodo-cementni faktor, kreće se od 0,4 do 0,6, a rjeđe postiže vrijednosti i do 0,7.

Kolone zaštitnih cijevi cementiraju se obično pomoću dva čepa za cementiranje: »prethodnog«, koji pod određenim uvjetima, nakon pucanja posebne membrane, omogućava prolaz cementne kaše kroza nj, i »nahodnog«, kojim se cementna kaša protiskuje u prostor iza zaštitnih cijevi. Postupak cementiranja pomoću tih čepova opisan je u nastavku.

Pošto su u bušotinu ugrađene cijevi, ona se najprije ispire uz istodobno »šetanje« kolonom zaštitnih cijevi (naizmjenično izvlačenje i spužtanje zaštitnih cijevi na kratkom razmaku, 8-10 m) da bi se strugačima i vodilicama sa zidova kanala bušotine glinovita obloga sastrugala i iznijela na površinu. Zatim se u bušotinu utisne 1-2 m³ vode i oslobodi prethodni cementacijski čep, koji potom prelazi iz cementacijske glave u zaštitne cijevi. Kad je proračunom utvrđena količina cementne kaše utisnuta u zaštitne cijevi, oslobodi se nahodni čep, koji zatim iz cementacijske glave prelazi u zaštitne cijevi. Iznad nahodnog čepa u bušotinu se utiskuje glinovita isplaka kojom se potiskuje stupac cementne kaše između navedenih čepova, i to sve dotle dok prethodni čep ne dosegne zaustavni prsten. Nakon zaustavljanja prethodnog čepa, pritisak pumpi koje ne prestaju raditi sve se više povećava, dok membrana

u čepu ne pukne. Time je otvoren prolaz cementnoj kaši u prostor ispod zaustavnog prstena te počinje protiskivanje cementne kaše u prostor iza kolone zaštitnih cijevi. Ono završava u trenutku nasjedanja nahodnog čepa na prethodni. Time je cementiranje zaštitnih cijevi završeno.



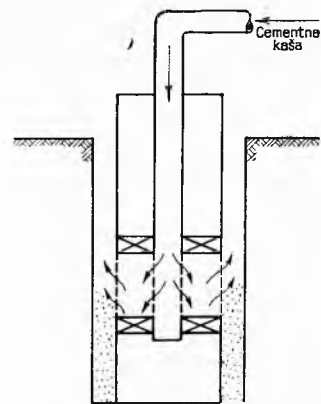
Sl. 13. Postavljanje cementnog čepa. a utiskivanje cementa u bušotinu, b ispiranje viška utisnutog cementa

Cementni mostovi postavljaju se u bušotinama: 1. da bi se u istražnoj bušotini koja je probušila više naftonosnih i plinonosnih ležišta stvorili pogodni uvjeti za ispitivanje narednog sloja po završetku ispitivanja sloja ispod njega, 2. da se neka ispitana bušotina koja je pokazala vrijedne rezultate za neko vrijeme, ako je to iz bilo kojih razloga potrebno, zadrži izvan iskorištavanja, odnosno da se na neko vrijeme »konzervira«, 3. da se donji dio nekog moćnog raskrivenog sloja, ako je on vodonosan, izolira kako bi se smanjio udio vode u dobivanoj tekućini (sl. 12).

Cementni se most postavlja utiskivanjem prethodno izračunate i pripremljene količine cementne kaše u bušotinu do određene visine, šipke se zadignu a višak kaše ispere se obrnutim cirkuliranjem isplake (sl. 13b).

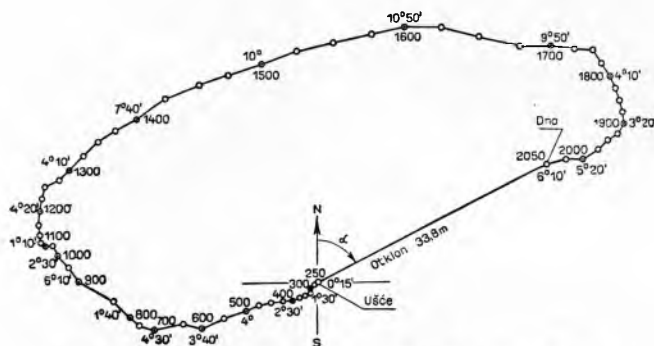
Cementiranje pod visokim pritiskom primjenjuje se obično kad osnovno cementiranje zaštitnih cijevi ne uspije, tj. kad se zbog bilo kakvih razloga ili smetnji cementna kaša ne može protisnuti u određeni prostor iza zaštitnih cijevi, te se oko njih ne može stvoriti čvrst nepropustan kamen. Cementiranja ove vrste izvode se obično kroz otvore propucane u koloni zaštitnih cijevi. U tu svrhu spuštaju se u bušotinu bušaće šipke s odgovarajućim brtvama (pakerima) koje se na određenom mjestu učvrste u zaštitnim cijevima, a zatim se cementna kaša pod visokim pritiskom utiskuje kroz bušaće šipke i kroz otvore u zaštitnim cijevima u prostor iza njih (sl. 14).

Budući da se pri vezivanju cementa razvija hidratacijska toplina, mjerenjem se temperature u kanalu bušotine, najbolje 6-16 sati nakon završenog cementiranja, može razmjerno tačno utvrditi visina do koje je doprla cementna kaša u prostoru iza cijevi. Tačniji podaci o tome dobivaju se ako se cementnoj kaši dodaju radioaktivni izotopi (traceri, markeri); najčešće se upotrebljavaju ¹³¹I, ⁹⁵Zr i ⁵⁹Fe. Mjerenjem intenziteta gama-zračenja nakon otvrdnjavanja cementne kaše može se utvrditi dokle se ona digla u prostoru iza zaštitnih cijevi, a mogu se donositi i odgovarajući zaključci o kvalitetu izvršenog cementiranja. U posljednje se vrijeme visina cementne kaše u prostoru iza cijevi sve više utvrđuje primjenom akustične metode. Registriranjem širenja zvučnih valova u prostoru iza cijevi dobiva se uz to osnova za donošenje zaključka o tome da li je ostvarena čvrsta veza između zaštitnih cijevi i cementnog kamena s jedne strane i cementnog kamena i zidova kanala bušotine s druge.



Sl. 14. Cementiranje pod visokim tlakom

Mjerenje otklona osi kanala bušotine od željenog smjera (mjerenje inklinacije). Tehnika izrade bušotina omogućava da se kanal bušotine usmjerava u željenom pravcu. Ne poduzimaju li se za vrijeme bušenja nikakve mjere da bi se bušotina usmjerila, tj. da bi se dno bušotine dovelo na željeno mjesto u podzemlju, i ne kontrolira li se položaj kanala bušotine, on će se prostorno iskriviti, te će i bušotina koja treba da bude okomita najčešće biti otklonjena od okomice. Drugim riječima, ušće i dno bušotine u tlocrtu se neće poklapati. Da se to ne bi dogodilo, bušotinu treba pogodnim mjerama okomito usmjeriti. S druge strane, mjesta na površini koja se nalaze okomito iznad određenog mjesta u podzemlju mogu u pojedinim slučajevima biti nepristupačna ili teško dostupna, tako da nije moguće izraditi okomit kanal bušotine kojim bi se najkraćim putem doseglo to mjesto u podzemlju. U takvim se slučajevima bira najpovoljniji položaj ušća bušotine, a njezin kanal se usmjerava, počevši bilo od samog ušća bilo od izabrane



Sl. 15. Tlocrt kanala bušotine s otklonom dna i azimutom otklona

dubine ispod ušća, u pravcu mjesta na kom treba da se nalazi dno kanala bušotine. Prema tome sve bušotine treba smatrati usmjerenima, te se s obzirom na smjer njihova kanala mogu podijeliti na okomite usmjerene ili okomite, i na koso usmjerene ili kose. Kako okomite tako i kose bušotine mogu biti ravne ili iskrivljene, tj. dno bušotine može se doseći polazeći od ušća bilo najkraćim putem, po pravcu, bilo po krivulji više ili manje zakrivljenoj u ravnini ili u prostoru. Posljedica iskrivljenja bušotine može biti otklon njezina dna u prostoru od mjesta na kojem se ono moralo nalaziti. U tlocrtu kanala okomite bušotine otklon je karakteriziran udaljenošću horizontalne projekcije dna bušotine od njezina ušća i azimutom odnosnog otklona (sl. 15).

I pored visoke razine suvremene tehnologije bušenja, kanali bušotina su često više ili manje prostorno iskrivljeni. Glavni uzročnici iskrivljavanja okomitih bušotina jesu: 1. veliki nagib naslaga, 2. učestalo izmjenjivanje naslaga stijena različitih po fizičko-mehaničkim svojstvima, 3. prirodna narušenja (pukotine, rasjedi, navlake, kaverne i sl.), 4. savijanje donjeg dijela kolone bušačih alatki uslijed prevelikog opterećivanja dlijeta za vrijeme bušenja, 5. mjestimična promjena promjera ili oblika presjeka kanala bušotine za vrijeme bušenja, 6. upotreba neodgovarajuće vrste dlijeta i neodgovarajuće brzine njegova okretanja, 7. neodgovarajuća kakvoća i količina isplake, 8. nepravilni međusobni odnos razmjera dlijeta i promjera bušačih i teških šipki, 9. nepoklapanje osi tornja sa središtem vrtačeg stola i s osi cijevi usmjerivača, 10. nehorizontalnost rotacionog stola, 11. slabo centriranje nepokretnog bloka koloturnika, 12. neravnost radne šipke, bušačih i teških šipki, 13. ekscentričnost narezanih spojeva između pojedinih elemenata kolone bušačih alatki, i 14. ekscentričnost dlijeta.

Iskrivljavanje kanala bušotine treba spriječiti, jer se u iskrivljenim kanalima bušotine pojavljuju mnoge teškoće: 1. bušaće alatke znatno se više troše, a i utrošak snage za izradu takve bušotine znatno je veći, 2. pri spuštanju i izvlačenju alatki u iskrivljenim, cijevima nezaštićenim kanalima pojavljuju se poteškoće koje mogu završiti različitim nezgodama, 3. u takvim kanalima bušaće alatke se jače savijaju, a time povećana naprezanja uzrokuju česte lomove, 4. intenzivno trenje bušačih šipki o zidove iskrivljenog kanala bušotine pridonosi odvajanju i urušavanju kanala bušotine, a trenje o unutarnje zidove ranije ugrađenih zaštitnih cijevi može uzrokovati oštećenja kolone zaštitnih cijevi, njezino

razaranje i slične nedaće, 5. veliko iskrivljenje kanala bušotine na kratkom razmaku može onemogućiti završetak bušotine na predviđenoj dubini, 7. u iskrivljenom kanalu bušotine zaštitne cijevi prijanjuju znatnim dužinama uz zidove kanala bušotine, pa je u takvim slučajevima veoma teško osigurati njihov koaksijalni položaj, a to dovodi u pitanje uspješnost međusobnog odvajanja naftonosnih, plinonosnih i vodonosnih naslaga, 8. na mjestima naglih iskrivljenja kanala bušotine otežano je ugrađivanje zaštitnih cijevi, osobito ako je uz to promijenjen i azimut otklona, tako da cijevi mogu pretrpjeti plastična deformiranja, što može dovesti u pitanje dovršavanje bušotine, 9. crpenje tekućih mineralnih sirovina dubinskim pumpama iz iskrivljenih bušotina znatno je otežano (čestim lomovima klipnih šipki i sl.), 10. može se dogoditi da se područja napajanja nekontrolirano iskrivljenih bušotina djelomice pokrivaju, da se krugovi njihovih napajanja s jedne strane sijeku, a da s druge strane ostanu slobodne, nedrenirane površine, što smanjuje ukupni iscrpak nafte iz ležišta.

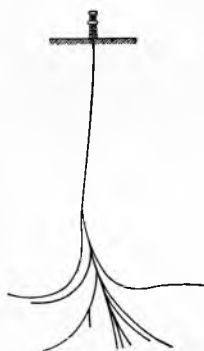
Budući da je izborom položaja ušća bušotine na površini i njezina dna u podzemlju prostorni položaj kanala bušotine posve određen, a brojni činioci pogoduju njegovu otklanjanju za vrijeme bušenja, to se stvarni položaj kanala izradivane bušotine mora provjeravati povremenim mjerenjem krivine i smjera otklona. Krivinom se smatra kut što ga u mjerenoj tački kanala bušotine zatvaraju okomica i os kanala bušotine. Smjer (azimut) otklona je kut što ga u tlocrtu zatvaraju razmatrani element osi bušotine i magnetni meridijan.

U suvremenoj praksi bušenja položaj kanala bušotine provjerava se posebnim aparatima. Jednima se može izmjeriti samo krivina, a drugi omogućavaju istodobno mjerenje krivine i smjera otklona. U prvu skupinu idu aparati s fluorovodičnom kiselinom, koja spušta se u staklenoj čašici na određeno mjesto u kanalu bušotine zauzima vodoravni položaj te nakon mirovanja od 15-20 minuta ostavlja na staklu čašice trag prema kojemu se lako utvrđuje krivina kanala bušotine na mjestu mjerenja. U drugu skupinu spadaju inklinometri. Po konstrukciji mogu se svrstati u tri skupine: mehanički inklinometri, elektromagnetski inklinometri, i foto-inklinometri. Prema broju mjerenja koje je moguće izvršiti pri jednom spuštanju i izvlačenju aparata razlikuju se aparati kojima se može izvršiti samo jedno mjerenje (single shot) i aparati kojima je moguće izvršiti niz mjerenja na proizvoljno izabranim mjestima u kanalu bušotine (multiple shot). Sistematskim mjerenjem veličine kuta otklona kanala bušotine od okomice i azimuta otklona od magnetnog meridijana dobivaju se podaci o prostornom položaju izradivanog kanala, te se na temelju njih mogu pravodobno donositi odluke o njegovom usmjeravanju.

Mjerenjem krivina 255 okomitih bušotina izrađenih u USA u vrijeme kad se tom problemu još nije posvećivala nikakva pažnja (većina ih je bila duboka ~1000 m a najdublja od njih je dosegla 1852 m), utvrđeno je da je najveći izmjereni otklon od okomice iznosio 52° (na dubini od 1524 m), a prosječni otklon kretao se je oko 1° na svakih 100 m dubine.

Koso-usmjereno bušenje primjenjuje se kad se želi: 1. iskrivljena bušotina ispraviti i vratiti u okomicu, 2. izradom novog kanala po strani mimooci u bušotini zaostale odlomljene alatke koje se instrumentiranjem nisu mogle uhvatiti i izvući, 3. kanal bušotine usmjeriti prema naprijed određenoj tački u prostoru koja se okomitim kanalom s bilo kojeg razloga ne može doseći.

Velika je prednost koso-usmjereno bušenja i u tome da se s jednog stajališta može bez naročitih poteškoća izraditi više bušotina, »grm bušotina«, usmjerenih u različitim smjerovima i do različitim prethodno izabranih tačaka ležišta u podzemlju (sl. 16).



Sl. 16. »Grm« bušotina

Jezgrovanje. Svrha bušenja jezgrovanjem jest izrada kanala bušotina uz vađenje uzoraka (jezgara) probušenih stijena, radi tačnog geološkog pregleda i utvrđivanja kako litoloških osobina probušenih stijena tako i njihovih kolektorskih svojstava. (Nazivom

»kolektorska svojstva« obuhvaćene su šupljikavost i propusnost stijena i njihova zasićenost korisnim tekućim i plinovitim mineralnim sirovinama).

Jezgrovanje se izvodi alatima koje smo nazvali krunama. Zajednička je karakteristika svih kruna da se njima razrušava samo prstenasti presjek stijena, dok jezgra stijene, cilindričnog oblika, ostaje čitava, prolazi kroz krunu i postepeno puni tzv. *jezgarsku (sržnu) cijev* postavljenu neposredno iznad krune. Nakon što se probuši razmak koji odgovara dužini jezgarske cijevi (obično od 3 do 9 m, a u iznimnim slučajevima do 27 m i više), alatke za vađenje jezgre izvlače se na površinu i rastavljaju da bi se iz jezgarske cijevi izvadila jezgra. Potom se alatke za uzimanje jezgre ponovo sastave i spuštaju na dno bušotine. Zbog razmjerno malih dužina jezgarskih cijevi i njihova razmjerno brzog punjenja jezgrom probušeni stijena mnogo se vremena troši za spuštanje i izvlačenje alatki pa je učinak pri bušenju krunama znatno manji nego pri bušenju dljetima.

Za jezgrovanje se, prema tvrdoći stijena, upotrebljavaju krune različitih konstrukcija. Meke stijene buše se rezanjem, krunama režućeg tipa s običnim zubima ili s lopaticama najčešće ojačanim volfram-karbidima. Tvrde stijene buše se drobljenjem i otkidanjem, i to krunama s većim brojem žrvanja različitih konstrukcija. Profil i broj zubi žrvanja zavisi od čvrstoće stijene: što je stijena čvršća i tvrda to je vršni kut zubi tuplji, zubi su kraći, a njihov broj veći. Naročito tvrde stijene buše se istiranjem; za to se upotrebljavaju krune za bušenje uz primjenu čelične sačme, ili krune snabdjevne dijamantima, tzv. dijamantske krune.

Jezgarske (sržne) cijevi opremljene su na donjem kraju uređajem za otkidanje jezgre i za njezino podržavanje kad se alatka za jezgrovanje izvlači na površinu. Alatke za jezgrovanje razlikuju se po konstrukciji, a mogu se svrstati u dvije glavne skupine: konvencionalne aparate za jezgrovanje i aparate koji se na dno bušotine spuštaju i iz nje izvlače kroz šupljinu bušačih alatki, tako da se iz bušotine ne mora izvlačiti i cijela kolona bušačih alatki.

U skupini konvencionalnih aparata za jezgrovanje razlikuju se, u principu, dvije osnovne konstrukcije. Jednostavni aparati s jednom cijevi određeni su za jezgrovanje vezanih, čvrstih stijena, a dvostruki s dvjema cijevima (vanjskom i unutarnjom) upotrebljavaju se pri jezgrovanju mekanih, nevezanih, sipkih stijena. Prednost je dvostrukih aparata u tome da se mlaz isplake usmjerava kroz prostor između dviju cijevi te ne dolazi u dodir s jezgrom. Na taj se način onemogućava ispiranje jezgre mekanih i sipkih stijena isplakom.

Budući da je bušenje uz vađenje jezgre sporije a prema tome i skuplje od bušenja bez vađenja jezgre, jezgrovanje treba svesti na najmanju, neophodnu mjeru. Treba ga ograničiti na zone gdje se očekuju prelazi iz naslaga jednih stijena u druge i na zone u kojima se javljaju stijene nosioci nafte.

Iskušavanje bušotine. Metode ispitivanja bušotina uključivši sve vrste geofizičkih metoda (različite vrste karotiranja), jezgrovanja, analiziranja uzoraka probušeni stijena i analiziranja isplaka ne daju dovoljno podataka o dinamičkim osobinama ležišta nafte i plina, ali daju podatke na temelju kojih se u izrađenom kanalu bušotine mogu izabrati razmaci (intervali) koje treba iskušati (testirati) u pogledu naftonosnosti.

U tragačkim (wildcat) i istraživačkim bušotinama pojedinačno se iskušavaju sve naslage koje ispoljavaju obilježja naftonosnosti ili plinonosnosti. Naslage namijenjene iskušavanju moraju se pretihodno izolirati od svih krovinskih i podinskih naslaga. Da bi se omogućilo pritjecanje tekućine ili plina iz njih u kanal bušotine, potrebno je pritisak nasuprot ispitivanom razmaku u bušotini smanjiti. Dobije li se pri tom prtok nafte ili plina, utvrđuje se njihov kemijski sastav, ležišni (slojni) pritisak, proizvodnost iskušanih naslaga i ostali pokazatelji potrebni za ocjenu industrijske vrijednosti istraživanog ležišta.

Iskušavanje bušotina izvodi se primjenom naročitog uređaja (tester) koji se u bušotinu spušta na koloni bušačih šipki. On je obično sastavljen od pet glavnih dijelova: jedne ili dvije gumene brtve (zaptivača, pakera), zaklopca za izjednačavanje pritisa, glavnog zaklopca (ventila), sapnice i gornjeg zaklopca, te elemenata neophodnih za spajanje navedenih dijelova kako među sobom tako i s bušačim šipkama.

Bušotine se mogu iskušavati bilo u razdoblju samog bušenja, dok im kanal još nije zaštićen cijevima, bilo nakon što su bušotine dosegle svoju konačnu dubinu te im je kanal zaštićen obložnim cijevima. Pri iskušavanju za vrijeme samog bušenja uređaj za testiranje spušta se u kanal bušotine na bušačim šipkama. Brtvom navedenog uređaja, učvršćenom iznad naslaga namijenjenih iskušavanju, te se naslage najprije odvajaju od naslaga iznad njih. Pri tom se dio kanala bušotine ispod gumene brtve oslobodi pritiska stupca isplake koja se nalazi u kanalu bušotine. U mekim se naslagama upotrebljavaju dvije brtve. Nakon učvršćenja brtve najprije se aktivira uređaj za iskušavanje pri čemu se otvaranjem ventila ostvaruje razlika između pritiska u ležištu i atmosferskog pritiska u praznim bušačim šipkama. Ako se u testiranim naslagama nalaze tekućine ili plin, oni će uslijed velike razlike u pritisacima pritjecati u šipke i dizati se do visine koja odgovara pritisku ležišta. Kad je pritisak ležišta veći od hidrostatskog, iskušane bušotine počinju izbacivati (eruptirati) naftu ili plin. Veza između bušačih šipki i iskušanih naslaga može se u svakom trenutku prekinuti vraćanjem uređaja za iskušavanje u početni položaj. Na taj se način obustavlja i dalje pritjecanje nafte ili plina iz iskušanih naslaga u bušače šipke. Oslobađanjem brtve i otvaranjem ventila za izjednačavanje pritisa, ovi se u gornjem i donjem dijelu kanala bušotine izravnavaju a na iskušane naslage ponovo djeluje pritisak stupca isplake u bušotini.

Velika i glavna prednost iskušavanja bušotina u razdoblju njihove izrade u tome je da se naslage iskušavaju odmah nakon što se raskrije, dok još nisu znatnije zagađene djelovanjem isplaka, pa se dobiva tačnija slika o njihovoj industrijskoj vrijednosti. Uz to, iskušavanje bušotina u navedenom razdoblju znatno smanjuje riziko ugradnje zaštitnih cijevi u bušotinu koja se kasnije pokaže jalovom.

Pri iskušavanju po završenom bušenju kanal bušotine izrađuje se do podine najdubljeg sloja koji se namjerava iskušavati. Potom se u kanal bušotine ugrađuju zaštitne cijevi i zacementiraju se do visine koja osigurava odvajanje svih naslaga među sobom i njihovo izoliranje od vodonosnih horizonata. Ispitivanje se u ovom slučaju obavlja odozdo naviše. Propucavanjem otvora kroz obložne cijevi i kroz cementni prsten oko njih najprije se raskrije najniži pretpostavljeni naftonosni ili plinonosni horizont, i to u razmaku utvrđenom na temelju rezultata dobivenih primjenom geofizičkih metoda, vađenjem i analiziranjem jezgara i drugim ispitivanjima za vrijeme bušenja. Iskušavanja u završenim bušotinama provode se jednako kao i u razdoblju bušenja, s tim da se uređaj za iskušavanje opremi još i mehanizmom za sidrenje koji omogućava učvršćenje uređaja u koloni zaštitnih cijevi na bilo kojoj željenoj dubini. Ako se iskušavanje utvrdi da naslage nemaju ekonomsku vrijednost, one se zatvaraju cementiranjem pod visokim pritiskom, ili se u kanalu bušotine između tih naslaga i onih koje su prve na redu za iskušavanje izrađuje cementni most (cementni čep). Potom se propucavanjem otvora u razmaku do narednih naslaga postupak ponavlja. Tako se redom iskušavaju sve naslage koje su za to predviđene.

Prednosti su iskušavanja završenih bušotina što proces bušenja njime nije usporen i izvođenje zahvata nije komplicirano. Postrojenje za bušenje nije više vezano za bušotinu, pa se odmah nakon cementiranja eksploatacijske kolone može rastaviti i prevesti na novo radilište, a na iskušavanju bušotine može biti zaposlen manji broj stručnog osoblja. Izvođenje ovih radova je tako znatno sigurnije i lakše. Nedostaci su ovog postupka što rezultati iskušavanja mogu biti netačni, jer su naslage od trenutka njihova raskrivanja do iskušavanja često kroz dugo vrijeme izložene djelovanju isplake i cementne kaše. Čestice gline i cementa prodiru pri tom u krupnije pukotine i šupljine stijena nosilaca te ih začepljuju, a filtrirana voda prodiru u sitnije šupljine i pukotine uzrokujući smanjivanje stvarne propusnosti odnosnih naslaga za naftu i plin. Moguća je posljedica toga da naslage od ekonomskog značenja sa manjim slojnim pritisacima ostanu neprimijećene. Negativni rezultati iskušavanja mogu biti posljedica toga što su u iskušane naslage prodrle strane vode uslijed neuspjelih cementiranja zaštitnih cijevi. Osim toga, rezultati iskušavanja izvršenih pošto je kolona zaštitnih cijevi već ugrađena mogu pokazati da je ugrađivanje cijevi bilo ekonomski neopravdano. Konačno, česta je pojava da se iskušane naslage, pokažu li se ekonomski vrijedne, odmah predaju

iskorištavanju, ostavljajući sve ostale iznad njih neiskušanim a sve dok se one prvotno iskušane ne iscrpu. Ostavši tako niz godina neraskrivene, naslage iznad iskorištavanih nakon duljeg stajanja najčešće izgube ekonomsku vrijednost, ako su je i imale.

Novije konstrukcije uređaja za iskušavanje bušotina imaju obično dvije brtve. Time je omogućeno da se naslage namijenjene iskušavanju odvoje kako od gornjeg tako i od donjeg dijela bušotine a da se pri tom ne moraju izradivati cementni mostovi, što znači da se uređaj može usidriti na potrebnom mjestu u cijevima nezaštićenom kanalu bušotine. Između objiju brtvi nalazi se cjevčica s otvorima koja za vrijeme iskušavanja omogućava pritjecanje nafte i plina iz ležišta u bušaće šipke.

OSVAJANJE BUŠOTINE

Da bi se završena bušotina mogla predati na iskorištavanje, ona se mora prethodno *osvojiti*. Pojam »osvajanje bušotine« obuhvaća izazivanje pritoka nafte ili plina iz ležišta u kanal bušotine. Prije poduzimanja potrebnih zahvata, ušće bušotine treba *hermetizirati*, tj. sve kolone zaštitnih cijevi ugrađene u bušotinu treba nepropusno spojiti a na posljednju, eksploatacijsku, postaviti odgovarajuću površinsku opremu. Ugrađene kolone zaštitnih cijevi povezuju se na različite načine, prirubicama ili narezanim spojnica, što zavisi od očekivanog pritiska ležišta i od načina iskorištavanja bušotine (eruptiranje, »liftiranje«, crpenje dubinskim pumpama). Naročita pažnja posvećuje se povezivanju ugrađenih kolona zaštitnih cijevi kad se očekuju erupcije iz ležišta s visokim pritiscima. Nakon što se tzv. postoljima (dvostrukim prirubicama) povežu ugrađene kolone zaštitnih cijevi, u bušotinu se ugrađuju *uzlazne cijevi* (tubing), a potom se na posljednjem postolju učvršćuje *glava uzlaznih cijevi*, glavni središnji zasun, a na njemu erupcijski uređaj (erupcijsko stablo) s odvodima, zasunima i sapnicama.

Budući da se prtok nafte ili plina iz ležišta u kanal bušotine može izazvati samo smanjenjem pritiska u kanalu bušotine u visini raskrivenih naftonosnih ili plinonosnih naslaga, to se sve mjere u tom smislu sastoje prije svega u smanjenju pritiska što ga na ležište vrši stupac tekućine u bušotini kao i u čišćenju dna bušotine od mulja, glinovite isplake i pijeska, kako bi se do krajnjih granica smanjio otpor pritjecanju tekućine ili plina iz ležišta u bušotinu.

Pritisak stupca tekućine na ležište može se smanjiti na tri načina: zamjenom tekućine u bušotini drugom, specifički lakšom tekućinom; utiskivanjem zraka ili plina u bušotinu, i snižavanjem razine tekućine u bušotini time što se uz pomoć klipa koji se naizmjenično spušta i izvlači iz uzlaznih cijevi tekućina iscrpe. Prvi način smanjivanja pritiska na ležište sastoji se u tome da se isplaka iz bušotine kroz uzlazne cijevi istiskuje na površinu vodom ili naftom koja se pumpama utiskuje u prstenasti prostor između eksploatacijske kolone zaštitnih cijevi i uzlaznih cijevi. Pri drugom načinu smanjenja pritiska na ležište u spomenuti se prstenasti prostor utiskuje zrak ili plin koji najprije potiskuje ispred sebe tekućinu u uzlazne cijevi, onda tekućinu u uzlaznim cijevima aerizira ili gazira te joj time smanjuje specifičnu težinu, i konačno je izbacuje kroz ušće bušotine na površinu. Treći način smanjenja pritiska na dno bušotine opisan je u narednom odsjeku ovog članka. Rezultat smanjenja pritiska na ležište je u svim slučajevima pritjecanje tekućine ili plina iz ležišta u kanal bušotine. Time je bušotina na ovaj način osvojena i ona se predaje na korišćenje.

Klipovanje bušotine je jedna od veoma često primjenjivanih metoda osvajanja bušotine. Nakon završnih radova na bušotini, do filtra eksploatacijskih cijevi ugrade se uzlazne cijevi i postave se površinski uređaji i priključni cjevovodi. Potom se u uzlazne cijevi spušta na čeličnom užetu šuplji klip s ventilom koji je pri tom otvoren. Tijelo klipa ima gumene manžete kojima je zadatak brtvljenje prostora između klipa i uzlaznih cijevi. Pri spuštanju klip slobodno tone u tekućinu u bušotini. Obično se spušta do 75·150 m ispod razine tekućine u bušotini. Pri izvlačenju ventil klipa se zatvara. Pri tom se na površinu iznosi stupac tekućine koja je pri

uranjanju klipa prošla kroz njegov kanal i otvore na njegovu gornjem dijelu. U bušotini se uslijed toga snižava razina tekućine a time se smanjuje i pritisak na njezino dno. Ponavljanjem spuštanja i izvlačenja klipa razina tekućine u bušotini spušta se sve niže, tako da ležišni pritisak postaje u određenom trenutku veći od pritiska što ga na dno vrši stupac tekućine u bušotini. U tom trenutku ostvareni su uvjeti za pritjecanje nafte ili plina iz ležišta u kanal bušotine i nafta ili plin počinje pritjecati. Očekuje li se da će bušotina eruptirati, klipovanje se smije vršiti samo ako je ušće prethodno opremljeno uređajem za iskorištavanje eruptivnim načinom.

Količina tekućine koja se dobija tokom jednog ciklusa zavisi od dubine ronjenja klipa ispod razine tekućine. Vrijeme trajanja klipovanja zavisi od početnog položaja razine tekućine u bušotini, od razmjera bušotine i od njezine opreme, od ležišnog (slojnog) pritiska, od stupnja zagađenosti zone oko dna i od pažnje pri izvođenju odnosnih radova. Na sl. 17 prikazana je jedna od dosada najsavršenijih konstrukcija klipa. Ona se sastoji od poluge s uzdužnim unutrašnjim središnjim kanalom na koju su navučene tri manžete naročite konstrukcije. Svaka od tih manžeta ima žičanu košaricu i lijevak u kojima je smještena guma. Pri spuštanju klipa u uzlaznim cijevima žice košarice i guma lagano se stižu te se on spušta i bez naročitih poteškoća roni u tekućinu uslijed vlastite težine i težine eventualno iznad njega postavljene šipke za otežavanje. Pri dizanju, ventil na vrhu klipa, ispod otvora za izlivanje, zatvori se, a manžete se pod pritiskom stupca tekućine iznad njih šire. Guma pri tom tijesno prijanja uz zidove uzlaznih cijevi te nepropusno brtvi prostor između njih i klipa. Tako su prostor iznad i ispod klipa hermetički odvojeni.

NAPUCAVANJE BUŠOTINE

Napucavanje bušotina je ime za skup radova koji služe za povezivanje ležišta tekućih ili plinovitih mineralnih sirovina s izrađenim bušotinama. zaštićenim jednom ili više kolona obloženih cijevi učvršćenih cementiranjem. Posebni zadatak predstavlja napucavanje otvora u zaštitnim cijevima predviđenih za cementiranje pod visokim pritiskom. Propucavanjem otvora u eksploatacijskoj koloni stvaraju se putovi koji omogućavaju nafti i plinu pritjecanje iz ležišta u kanal bušotine. Napucavanje bušotina vrši se uređajima za napucavanje (*perforatorima*) koje možemo svrstati u tri skupine: puško-perforatore, mlazne perforatore i torpeda.

Perforatorima prvih dviju skupina glavni je zadatak raskriti ležište propucavanjem zaštitnih cijevi i cementnih prstenova oko njih.

Puško-perforatori sastavljeni su obično od većeg broja sekcija različitih dužina koje su izrađene od legiranog, termički obrađenog čelika. Svaka sekcija ima 9·12 otvora kojih su osi radialno usmjerene i okomite na os sekcije. U svaki od navedenih otvora učvršćuje se elementarna puška-čahura, snabdjevena razornim nabojem unutar kojeg se nalazi žica za električno paljenje. Cijev puške oprema se znom i brtvilom oblika kapice, te se uvrće u čahuru. Da se spriječi pretjerano slabljenje zaštitnih cijevi, elementarne puške rasporedene su u tijelu sekcije po vijčanoj liniji. Suvremeni puško-perforatori imaju veliku probojnu moć jer se koriste stlačenim nabojevima sitnozrnatih nitroglicerinskih eksploziva. Nakon izgaranja naboja razvija se u čelijama perforatora pritisak plinova do 20 000 kp/cm², koji zrnu podjeljuje veliku brzinu.

Po načinu pucanja, puško-perforatori omogućavaju ili pojedinačno otpucavanje metaka ili plotunsko otpucavanje svih metaka odjednom. Po načinu djelovanja zrna razlikuju se obična probojna zrna i zrna šrapnelskog tipa. Šrapnelska zrna imaju ugrađen detonator s napravom za distancijsko paljenje i punjena su brzantnim eksplozivom. Nakon proboja zaštitnih cijevi i cementnog prstena i nakon ulaska u ležište, šrapnelska se zrna rasprsnu, stvarajući na taj način široku mrežu sitnih pukotina koje omogućavaju lakše pritjecanje nafte i plina iz ležišta u kanal bušotine. Oblici i promjeri zrna su različiti. Promjeri obično upotrebljivanih zrna kreću se od $\frac{1}{16}$ " (1,6 mm) do $\frac{9}{16}$ " (14,3 mm). Izbor oblika zrna zavisi od razmjera cijevi i cementnih prstenova što ih zrno treba probiti kao i o svrsi propucavanja (perforiranja) otvora.

Mlazni perforatori razlikuju se od običnih puško-perforatora i šrapnelskih perforatora po tome što se otvori ne probijaju zrnima ili šrapnelama, već plinsko-metalnim mlazom velike gustoće koji se kreće golemom brzinom. Probojna moć mlaznih perforatora veća je od probojne moći puško-perforatora i šrapnelskih perfo-



Sl. 17.
Klip za osvajanje bušotine

ratora. Ovakvo perforiranje naročito je djelotvorno pri propucavanju otvora kroz dvije ili tri kolone zaštitnih cijevi međusobno vezane cementom, kao i pri perforiranju čvrstih stijena. Metak mlaznog perforatora sastoji se od osnovnog punjenja — snažnog razornog sredstva izrađenog u obliku skraćenog stošca s ljevkastim udubljenjem. U udubljenje stavljen je bakreni lijevak koji svojim zidom tijesno prianja uz razorno sredstvo. Osnovno punjenje stavlja se zajedno s lijevkom i s detonatorom u kućište izrađeno od plastične mase, gume ili krutog papira. Eksploziju osnovnog razornog sredstva izaziva detonator koji se aktivira detonirajućim štapinom. Pri eksploziji nastaju udarni valovi koji se kreću u smjeru lijevka. Na mjestima udara valova o lijevak stvara se pritisak od 300 000 kp/cm². Uslijed djelovanja pritiska odvajaju se s unutarnje strane bakrenog lijevka čestice metala koje zajedno s plinovima stvaraju mlaz velike gustoće. Mlaz se kreće brzinom od 8000...10 000 m/s u pravcu od vrška bakrenog stošca prema njegovoj osnovici. Taj mlaz probija metale i stijene svake tvrdoće, jer se u tački dodira s preprekom razvija pritisak od 250 000 kp/cm². Konstrukcija ovog perforatora koristila se principom protuoklopne puške bazuke. Mlazni perforator sastavljen je od sekcija koje mogu imati do 13 elemenata. Broj sekcija upotrijebljenih pri jednom spuštanju mlaznog perforatora gotovo je neograničen. Poznati su slučajevi kombiniranja do 10 sekcija i više, što znači da se prigodom jednog spuštanja takvog perforatora može propucati 130 i više otvora.

Torpeda su čelične cijevi različitih dimenzija, npr. $\varnothing 100 \times 3000$ mm. Na jednom kraju su skošene a na drugom imaju ručku za spuštanje i pridržavanje. Napunjene su eksplozivom koji se pali električkim upaljačima. Ovi se upaljači iniciraju ili provodnicima s površine ili u torpedu ugrađenim satnim mehanizmom sa suhom baterijom koji inicira upaljač nakon određenog vremenskog razmaka. Torpedima je zadatak da eksplozijama razornih sredstava potresaju stijene i obrazuju u njima pukotine većih razmjera i većeg dohvata, kojima će se olakšati pritjecanje nafte iz ležišta u kanal bušotine.

Broj otvora što se propucavaju različitim vrstama perforatora zavisi od promjera ugrađenih zaštitnih cijevi. Prevelik broj propucanih otvora ima za posljedicu znatno smanjenje čvrstoće zaštitnih cijevi, što može dovesti do njihova deformiranja, do teških

poremećaja u bušotinama i, konačno, do njihova uništenja. Orijentacijski, dozvoljena gustoća propucavanja otvora različitim vrstama perforatora prikazana je u sljedećoj tablici.

Promjer cijevi	Broj propucanih otvora na 1 m zaštitnih cijevi		
	obična zrna	šrapnelska zrna	mlazno
8"	25	4...8	40
6"	20	3...6	30
5"	15	—	20

Umjesto propucavanja otvora u zaštitnim cijevima pošto su ugrađene i cementirane, ponekad se u kanal bušotine ugrađuju kolone zaštitnih cijevi s tzv. *filtrum* izrađenim na površini i uvrštenim u kolonu zaštitnih cijevi tako da bi došao u visinu produktivnih naslaga. Takvi filtri su u stvari zaštitne cijevi koje na površini imaju otvore izrađene rezanjem ili bušenjem. Broj otvora kreće se od 25 do 1200 na tekući metar, promjer im je od 1,6 do 19 mm. Takvi filtri se često omotavaju čeličnom, niklenom ili brončanom žicom profiliranog presjeka, što omogućava veoma precizni izbor širine otvora između žica i onemogućava pritjecanje nevezanog pijeska u bušotinu.

Kad su stijene nosioci nafte i plina čvrste te se ne zarušavaju u kanal bušotine, ovaj se ne zaštićuje cijevima. U takvim slučajevima kolona zaštitnih cijevi ugrađuje se samo do krovine produktivnih naslaga u kojima se cementiranjem učvršćuje, a kanal bušotine u produktivnim naslagama ostavlja se otvoren (bušotine s otvorenim dnom, »open hole«). Ako se može ostvariti, takvo je raskrivanje produktivnih naslaga za pritjecanje nafte i plina iz ležišta u kanal bušotine najpovoljnije.

LIT.: H. И. Шацов, Бурение нефтяных скважин, Москва-Ленинград 1944. — L. C. Uren, Petroleum production engineering — Oil field development, New York-London 1946. — G. Prikel, Tiefbohrgeräte, Wien 1957. — С. М. Кулиев, Б. С. Филатов, Бурение нефтяных и газовых скважин, Москва 1958. — И. М. Муравьев, Справочник по добыче нефти, т. II, Москва 1959. — A. W. McCray, F. W. Cole, Oil well drilling technology, Norman 1959. — C. Gatlin, Petroleum engineering, Drilling and well completion, Englewood Cliffs, N. J. 1960. — H. И. Шацов, В. С. Федоров, С. М. Кулиев, П. А. Иоаннисян, П. И. Шищенко, Л. С. Гликман, П. В. Балицкий, Бурение нефтяных и газовых скважин, Москва, 1961. — А. Т. Лактионов, Основы теории и техники бурения скважин с очисткой забоя воздухом или газом, Москва 1961. — А. И. Булатов, Цементирование глубоких скважин, Москва 1964.

S. Lazić