

# Dubinske hidrauličke stapne crpke s primjerom proračuna sustava podizanja kapljevine

## Hydraulic pumps with example of artificial lift calculation

**Boris Vidoš**  
Student diplomskog studija naftnog rudarstva  
Rudarsko–geološko–naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu  
[bvidos@rgn.hr](mailto:bvidos@rgn.hr)



**Ključne riječi:** dubinska hidraulička stapna crpka, mehaničko podizanje kapljevine

**Key words:** hydraulic pump, artificial lift, fluid system

### Sažetak

Sustav podizanja kapljevine uz primjenu dubinskih hidrauličkih stapnih crpki spada u jednu od metoda mehaničkog podizanja kapljevine (engl. *artificial lift*). Sustav dubinskih hidrauličkih stapnih crpki karakterizira pouzdanost i kompaktnost izvedbe same crpke, te široka moguća primjena u težim ležišnim uvjetima. Sustav hidrauličkog podizanja kapljevine primjenjuje se najčešće: u dubokim, koso usmjerenim i horizontalnim bušotinama, zatim, za podizanje viskoznih (teških) nafte u bušotinama s niskim dinamičkim tlakom. U radu je opisana konstrukcija i izvedba same crpke, objašnjen je način rada hidrauličke stapne crpke i opisan je površinski utisni sustav. Navedene su glavne prednosti i nedostaci kod sustava hidrauličkog podizanja kapljevine. Provedena je analiza odabira i rada sustava, a na posljepku je izrađen proračun sustava hidrauličkih dubinskih stapnih crpki na primjeru ugradnje u bušotinu „X“ na hrvatskom proizvodnom naftnom polju.

### Abstract

Artificial lift system with hydraulic pumps is one of the using methods. The system is characterized by the reliability and compactness of the pumps themselves, as well as the wider application in the toughest conditions. Hydraulic lifting system is most commonly used in deep, directional and horizontal wells, then for lifting viscous (heavy) oil and for low bottom hole pressure reservoirs. This paper describes the construction and performance of the pump itself, explains how the hydraulic pump system works and the surface injection system is described as well. The main advantages and disadvantages of the hydraulic lifting system are listed. The analysis of the system selection and operation was carried out, and finally, a calculation of the system of hydraulic deep pumps was made on the example of the „X“ well in the Croatian production oil field.

### 1. Uvod

Kada prirodna energija ležišta nije dovoljna za eruptivni rad bušotine ili ako eruptivnim načinom rada ne dobivamo željenu, očekivanu količinu proizvodnog fluida, potrebno je primijeniti neku od

mehaničkih metoda podizanja (engl. *artificial lift*). Na više od 90% svih proizvodnih naftnih bušotina koristi se neka od mehaničkih metoda podizanja fluida (URL 1). Sam odabir metode mehaničkog podizanja temelji se prvenstveno na karakteristikama i uvjetima koji vladaju u ležištu, ali odabir u velikoj mjeri ovisi i o troškovima podizanja. Mehaničke metode se također koriste za optimizaciju rada te poboljšanje proizvodnje u ranoj fazi pridobivanja s ciljem ostvarivanja većeg prihoda. Metode mehaničkog podizanja koje su pronašle svoju najveću primjenu u praksi su: plinski lift (engl. *gas lift*), klipni lift (engl. *plunger lift*), dubinske sisaljke s klipnim šipkama (engl. *sucker-rod pump*), električne potopne pumpe (engl. *Electrical Submersible Pump - ESP*), vijčaste sisaljke (engl. *Progressive Cavity Pump - PCP*), mlazne crpke (engl. *jet pump*) te dubinske hidrauličke stapne crpke (engl. *hydraulic piston pump*). Mehaničko podizanje uz primjenu dubinskih hidrauličkih crpki predstavlja jednu od najprilagodljivijih i najpouzdanijih metoda podizanja fluida (URL 1). Sposobnost hidrauličkog sustava da proizvede veću količinu fluida čini ga učinkovitijim od mehaničkih metoda koje za rad koriste klipne šipke (Langston, 2003.), ali hidraulički lift ostvaruje brojne prednosti u odnosu na ostale metode mehaničkog podizanja.

Dubinske hidrauličke stapne crpke karakterizira ponajprije kompaktni i pouzdan dizajn koji omogućava jednostavnu ugradnju bez primjene remontnog postrojenja. Učinkovitost hidrauličke dubinske crpke posebno može biti izražena u primjeni kod bušotina male do srednje proizvodnosti, bušotina koje su pri kraju svojeg radnog vijeka (engl. *near-depletion wells*), koso usmjerenih bušotina te izrazito dubokih bušotina. Koriste se za proizvodnju iz bušotina čija dubina iznosi do 5180 m (17000 ft), a crpke su izrađene od visoko kvalitetnih metala, otpornih na koroziju, koji omogućavaju nesmetan rad u uvjetima visokih temperatura i tlakova (URL 1). Posebna primjena hidrauličkih dubinskih crpki odnosi se na proizvodnju viskozni (teških) nafti.

Sustav hidrauličkog upravljanja sa površine umnogome je učinkovitiji od mehaničkog upravljanja sustavom sa klipnim šipkama. Potpuno se eliminira trošenje tubinga uzrokovano trenjem klipnih šipki o unutarnje stjenke, posebno u kosim i horizontalnim bušotinama. Prilagodljivost automatizaciji pruža mogućnost za vrlo jednostavnu kontrolu i regulaciju proizvodnje, što u konačnici hidrauličkoj stapnoj crpki omogućava prilagodbu na promjenjive bušotinske uvjete kao što su dotok plina, zavodnjavanje

i pad proizvodnje (URL 2). U bušotinama s visokim plinskim faktorom (engl. *Gas to oil ratio - GOR*) i niskim tlakom na dnu mogu se javiti i određene poteškoće pri radu crpke. Iako je crpka konstrukcijski zaštićena od plinske blokade, prisustvo plina može znatno utjecati na smanjenje ukupne djelatnosti crpke.

## 2. Sustav dubinskih hidrauličkih stapnih crpki

Cjelovit sustav dubinskih hidrauličkih stapnih crpki shematski je prikazan na slici 2-1, a sastoji se od:

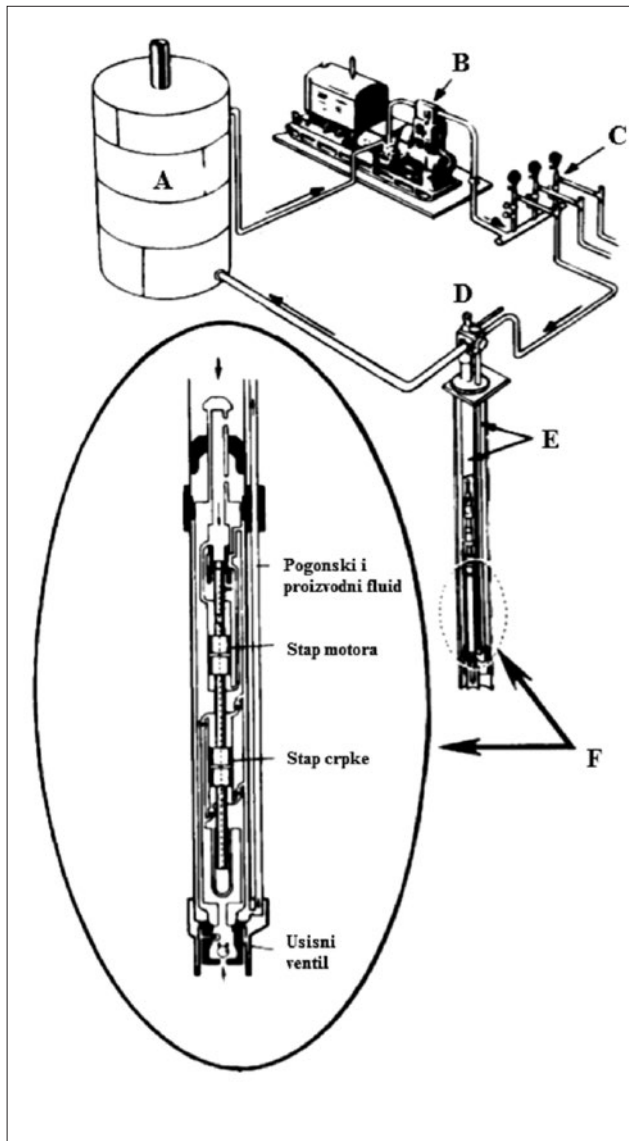
- A. Spremnik s pogonskim fluidom;
- B. Površinska (utisna) crpka;
- C. Kontrolni razdjelnik;
- D. Oprema ušća bušotine;
- E. Sustav tubinga;
- F. Hidraulička stapna crpka.

### 2.1. Hidraulička stapna crpka s pogonskim motorom

Dubinska hidraulička stapna crpka predstavlja čvrsto povezani sustav povratno translatornog pogonskog motora i povratno-translatorne crpke, smješten u bušotini ispod dinamičke razine proizvodnog fluida (Zelić i Čikeš, 2006.). Svaki model dubinske hidrauličke crpke jedinstven je po konstrukciji pogonskog motora i crpke. Stlačeni pogonski fluid (nafta ili voda) dovodi se na gornju stranu stapa motora i uzrokuje njegovo povratno-translatorno gibanje. Na taj način stap motora preko čvrste veze (šuplje šipke, ojnice) pokreće stap crpke, dok se iskorišteni pogonski fluid, zajedno s proizvodnim (bušotinskim) fluidom s donje strane stapa usmjerava prema rasteretnom području ventila motora, gdje se istiskuje iz sustava. Rad hidrauličke stapne crpke može se prikazati u četiri koraka:

Nakon završetka svakog radnog ciklusa, stap crpke se nalazi u gornjem radnom položaju. Donji dio cilindra crpke je ispunjen plinom i kapljevnom priteklom za vrijeme prethodnog hoda prema gore;

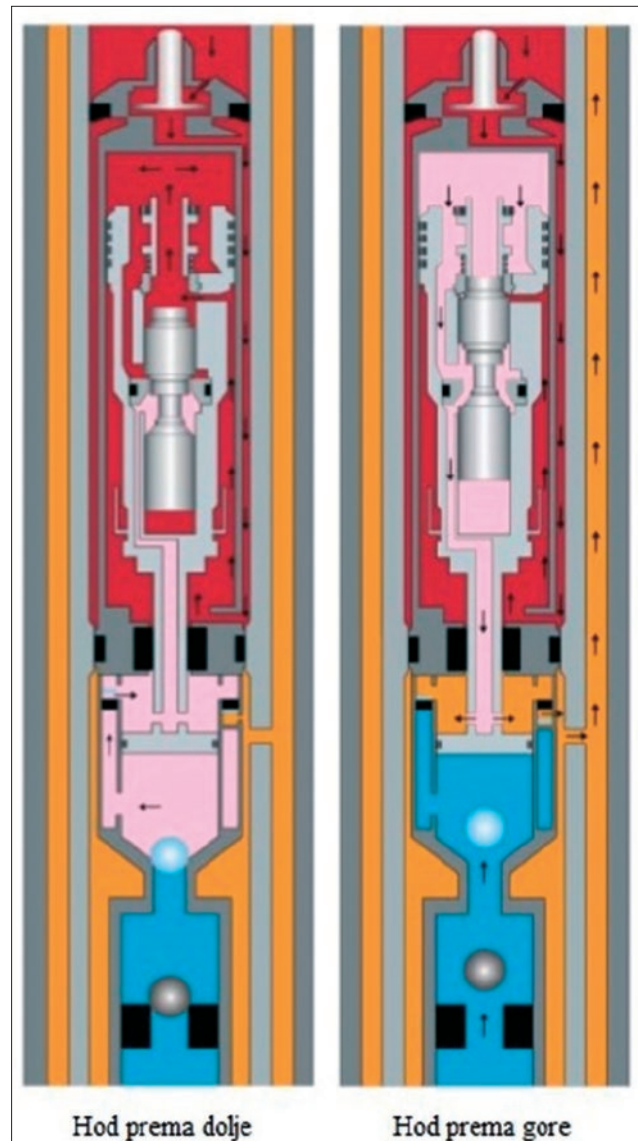
1. Radni fluid koji se dovodi s gornje strane stapa uzrokuje hod stapa crpke prema dolje, otvara se radni ventil i propušta plin i kapljevinu u gornji dio cilindra crpke;
2. Nakon završetka hoda prema dolje, stap crpke dolazi u donji radni položaj, a prostor iznad stapa crpke je u potpunosti ispunjen kapljevnom i plinom;



Slika 2-1. Sustav dubinskih hidrauličkih stapnih crpki (API, 1996.)

- Novi hod prema gore uzrokuje stap motora koji gura iskorišteni radni fluid iz cilindra motora u cilindar crpke. Volumen iskorištenog radnog fluida je veći od volumena crpke što uzrokuje potpuno pražnjenje cilindra crpke. Proizvodni fluid zajedno sa iskorištenim radnim fluidom odlazi na površinu, a radni ciklus hidrauličke stapne crpke se ponavlja.

Hidraulička stapna crpka je dvoradna (engl. *double-acting*), što znači da potiskuje fluid i pri hodu prema dolje i pri hodu prema gore. Cjelovita crpka, sa svojim pogonskim (motor) i crpnim krajem, prikazana je na slici 2-2. Pri hodu prema gore, bušotinski fluid ulazi u donji dio cilindra crpke dok se istodobno istiskuje iz gornjeg dijela cilindra. Svrha donje šuplje šipke (ojnice)



Slika 2-2. Hidraulička crpka pri hodu prema dolje i gore (URL 3)

jest da uravnoteži površine (sile) pri hodovima stapa prema dolje i gore.

## 2.2. Sustav pogonskog fluida

Kvaliteta pogonskog fluida važan je čimbenik koji utječe na radni vijek trajanja crpke i troškove popravka. Viskoznost proizvodnog fluida, posebno sadržaj krutih (abrazivnih) čestica, mogu uvelike doprinijeti neispravnom radu i oštećenju crpke. Gubitak pogonskog fluida kroz brtvene elemente crpke i zatore također je posljedica negativnog utjecaja viskoznosti i krutih čestica, stoga je potrebno kontrolirati sastav i karakteristike pogonskog fluida. Dopustiv sadržaj krutih čestica ovisi ponajprije o viskoznosti fluida, a 10-15 ppm (engl. *parts-per million*) se smatra

prihvatljivom vrijednošću za nafte gustoće 825-875 kg/m<sup>3</sup> s tim da maksimalna veličina čestica ne bi trebala prelaziti 15 µm (Zelić i Čikeš, 2006.). U pravilu se za teže nafte može tolerirati veće trošenje crpke i veći sadržaj krutih čestica, dok je za vodu prihvatljivo manje trošenje i manji sadržaj krutih čestica.

Postoje dva osnovna sustava pogonskog fluida:

1. Zatvoreni sustav - u kojemu ne dolazi do miješanja pogonskog i proizvodnog fluida;
2. Otvoreni sustav - u kojemu se pogonski fluid miješa s proizvodnim u bušotini i na površinu izlazi kao mješavina pogonskog i proizvodnog fluida.

Odabir pogonskog fluida može se temeljiti na brojnim čimbenicima, a neki najvažniji su:

- voda je najprihvatljivija s aspekta sigurnosti i zaštite okoliša,
- voda je prihvatljiva kao pogonski fluid za zatvoreni sustav, jer trošak za dodavanje aditiva za kontrolu podmazivanja i korozije nije velik,
- budući da se kod otvorenog sustava proizvodni fluid miješa s pogonskim, voda nije pogodna zbog velikog troška za aditive koji se bespovratno gube,
- nafta kao pogonski fluid najčešće ne zahtjeva obradu i kontrolu podmazivanja,
- dubinske hidrauličke crpke su vrlo osjetljive na viskoznost i podmazujuća svojstva pogonskog fluida. Voda, koja nema sposobnost podmazivanja pri bušotinskim uvjetima, može pridonijeti kraćem radnom vijeku trajanja crpke,
- pogreške pri proizvodnim mjerenjima kada se nafta koristi kao pogonski fluid u otvorenom sustavu,
- utisni tlak na površini biti će manji kada je pogonski fluid voda.

### 2.2.1. Zatvoreni sustav

Glavna karakteristika zatvorenog sustava pogonskog fluida je razdvojen tok pogonskog i proizvodnog fluida na površinu. Kako ne bi došlo do miješanja fluida u sustav je potrebno ugraditi dodatni vod (cijev, tubing) za povrat iskorištenog pogonskog fluida na površinu te njegovo recirkuliranje. Dio pogonskog fluida se prilikom rada sustava gubi, prvenstveno na podmazivanje hidrauličke dubinske crpke kao i površinske utisne crpke te se mora nadomjestiti novim fluidom. Zbog veće cijene, u odnosu na otvoreni sustav, primjena zatvorenog sustava cirkulacije proizvodnog

fluida nije velika. Najčešće se koristi u urbanim područjima i na odobalnim (engl. *offshore*) platformama, gdje se relativno mala veličina spremnika za pogonski fluid uklapa u manjak raspoloživog prostora (Zelić i Čikeš, 2006.). Kao pogonski fluid, zatvoreni sustav često rabi vodu, koja je prihvatljivija s aspekta sigurnosti i zaštite od onečišćenja. U vodu se moraju biti dodati aditivi za sprječavanje korozije i poboljšanje podmazujućih svojstava, a iz vode prethodno treba ukloniti kisik. Svi ti postupci obrade uvelike utječu na povećanje operativnih troškova i sam odabir proizvodnog fluida.

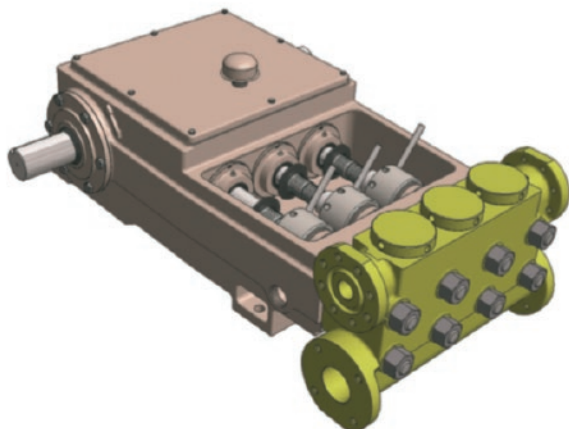
### 2.2.2. Otvoreni sustav

Otvoreni sustav cirkulacije pogonskog fluida karakterizira miješanje pogonskog i proizvodnog fluida. Sustav se sastoji od dva protočna kanala u bušotini: jedan za dovođenje pogonskog fluida u motor crpke te drugi za odvođenje smjese iskorištenog pogonskog fluida i proizvodnog fluida na površinu. U praksi, u zacjvljenim bušotinama kao jedan protočni kanal se obično koristi niz tubinga, dok ulogu drugog protočnog kanala preuzima prstenasti prostor bušotine. Otvoreni sustav može biti opremljen i sa dva niza tubinga, gdje drugi niz tubinga služi za odvođenje smjese fluida na površinu. Jednostavnost i ekonomičnost sustava su najviše izražene u primjeni nafte kao pogonskog fluida, dok gubljenje kemikalija i aditiva za obradu vode kao pogonskog fluida znatno utječe na smanjenje ukupne ekonomičnosti sustava.

### 2.3. Površinske utisne crpke

Površinska utisna crpka je obično konstruirana za određeni pogonski fluid i za određeni model dubinske hidrauličke crpke. Glavna razlika odnosi se na odabrani tip pogonskog fluida. Utisne crpke koje za rad koriste stlačenu čistu naftu rabe klipove s brtvljenjem „metal-na-metal“ i kuglaste ventile. Za rad s vodom kao pogonskim fluidom, crpka ima samo drukčiji sustav brtvljenja klipa, obično „paket“ labirintnih brtvi.

Za rad se najčešće koriste trocilindrične površinske utisne crpke, montirane na radno postolje i pogonjene elektromotorom ili plinskim strojem. Poželjna karakteristika svih komponenata površinskih utisnih crpki je da zahtijevaju što manje ili čak nikakvo održavanje. U novije vrijeme kvalitetnija izrada površinskih crpki doprinijela je smanjenoj potrebi za održavanjem. Dijelovi kućišta površinskih crpki oblažu se cinkom i teflonom kako bi se umanjio štetan utjecaj korozije te



Slika 2-3. Trocilindrična površinska utisna crpka (URL 4)

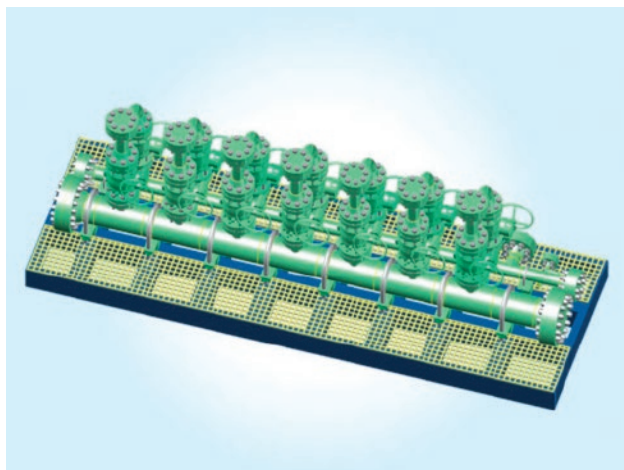
moguća oštećenja koja mogu nastati prilikom premještanja i transporta radne jedinice. Svi pokretni dijelovi crpke izrađuju se od duktilnih materijala kako bi se smanjila mogućnost od pucanja i lomova prilikom rada. Sustav ventila se dodatno štiti od korozije kako bi omogućio što duži radni vijek površinske utisne crpke (URL 4). Osim radnih dijelova površinske utisne crpke, dodatnu opremu čine manometri, rasteretni ventili i sigurnosna sklopka.

#### 2.4. Kontrolni razdjelnici

Kontrolni razdjelnici za distribuciju pogonskog fluida najčešće se isporučuju u sekcijama, zajedno s određenim modelom dubinske hidrauličke crpke. Glavna uloga kontrolnih razdjelnika je raspodjela i regulacija protoka pogonskog fluida prema pojedinim bušotinama, neovisno o promjenama tlaka u sustavu. Sustav razdjelnika sadrži i visokotlačne mjerачe protoka i manometre koji služe za mjerenje tlaka i protoka prema svakoj od bušotina, kao i regulaciju utisnog tlaka pogonskog fluida.

#### 2.5. Oprema ušća bušotine

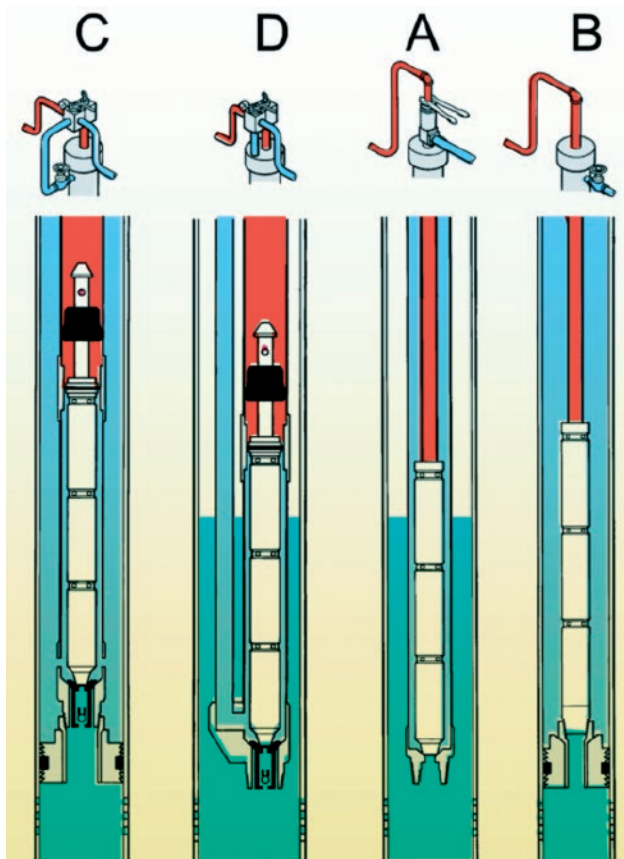
Ovisno o vrsti dubinske hidrauličke crpke, varira i oprema ušća bušotine. U većini slučajeva za kontrolu i optimalan rad hidrauličke crpke dostatna je standardna oprema ušća bušotine. Glavne funkcije, koje oprema ušća bušotine osigurava, su: usmjeravanje stlačenog pogonskog fluida za ugradnju i vađenje crpke, prihvaćanje i pridržavanje crpke prilikom ugradnje i vađenja, automatska regulacija zatvaranja protoka pogonskog fluida i rasterećenje tlaka u tubing-u te sprječavanje nekontroliranog porasta tlaka u zaštitnim cijevima.



Slika 2-4. Kontrolni razdjelnici (URL 5)

#### 2.6. Sustav ugradnje u tubing

Dva su osnovna tipa dubinskih hidrauličkih crpki: fiksirane i slobodne crpke. U slučaju kada se crpka navrće na pogonski tubing (tubing koji služi za dovoz pogonskog fluida) i spušta u bušotinu na tubing-u, radi se o tzv. fiksiranoj crpki (engl. *fixed pump*). Kada crpka tijesno pristaje u sustav pogonskog tubing-a, te se može cirkulacijom pogonskog fluida slobodno potisnuti do ležajeva za odsjedanje



Slika 2-5. Tipovi ugradnje dubinskih hidrauličkih crpki (Langston, 2003.)

pri dnu niza tubinga, govorimo o tkz. slobodnoj crpki (engl. *free parallel pump*). Postoje brojne varijante ugradnje dubinskih hidrauličkih crpki u bušotinu, a karakteristika svih varijanti je da mogu koristiti i otvoreni i zatvoreni sustav pogonskog fluida. Osim osnovnih tipova ugrađenih na niz tubinga (A i D), fiksirane i slobodne crpke mogu biti ugrađene i na nizu zaštitnih cijevi (B i C).

Kod ugradnje fiksiranih crpki, crpka se spaja na tubing malog promjera najčešće 19,05 mm (3/4 in) i spušta se u bušotinu unutar 60,325 mm (2 3/8 in) tubinga. Crpka nasjeda na prijelaz za odlaganje, a u radnom položaju je podržava težina niza tubinga malog promjera. U sustavu s fiksiranom hidrauličkom dubinskom crpkom paker se ne kreristi, pa se plin slobodno proizvodi kroz prstenasti prostor bušotine. Glavi nedostatak ovog sustava jest potreba za remontnim postrojenjem, koje vadi cijeli niz tubinga zajedno s crpkom u slučaju njenog kvara. Ako se ustanovi neki određen, manji kvar crpke kao što je smanjena učinkovitost crpke zbog djelovanja abrazivnih čestica ili gubitak pogonskog fluida u formaciju, u bušotinsku glavu može se ugraditi klip za podizanje (engl. *lift piston*). Klip za podizanje omogućava preusmjeravanje pogonskog fluida ispod samog klipa i podizanje te ponovno ispuštanje niza tubinga i crpke na prijelaz za odlaganje. Na taj način moguće je ukloniti kvar crpke i osigurati njen normalan rad (Langston, 2003.).

Sustav slobodne hidrauličke dubinske crpke također se sastoji od dva niza tubinga. Tubing malog promjera se spaja s vanjske strane većeg niza i istovremeno se zajedno spuštaju u bušotinu. Nakon spuštanja oba niza tubinga u bušotinu i ugradnje opreme ušća bušotine, ugrađuje se slobodna crpka koju se postavlja u niz tubinga. Pogonski fluid se pušta u cirkulaciju i nosi slobodnu crpku do dna, gdje crpka odsjeda na prijelaz za odlaganje. Osnovna prednost slobodne crpke u odnosu na fiksiranu je u tome što ju se istim postupkom cirkulacije pogonskog fluida, u slučaju kvara, može istisnuti na površinu. Za ovaj postupak nije potrebna primjena remontnog postrojenja te se štedi vrijeme i novac (Langston, 2003.).

### 3. Analiza rada sustava

Analiza rada sustava dubinskih hidrauličkih stapnih crpki provodi se prilikom projektiranja iste, a bitno je odlučiti o sljedećem:

- primijeniti otvoreni ili zatvoreni sustav proizvodnog fluida,

- slobodni plin crpiti zajedno s naftom ili ga odvoditi mimo crpke,
- odabrati sustav niza tubinga,
- odabrati crpku koja odgovara za odabrani tubing i udovoljava bušotinskim uvjetima,
- odabrati površinsku utisnu crpku,
- odabrati središnji ili pojedinačni sustav površinskog postrojenja.

#### 3.1. Izbor otvorenog ili zatvorenog sustava

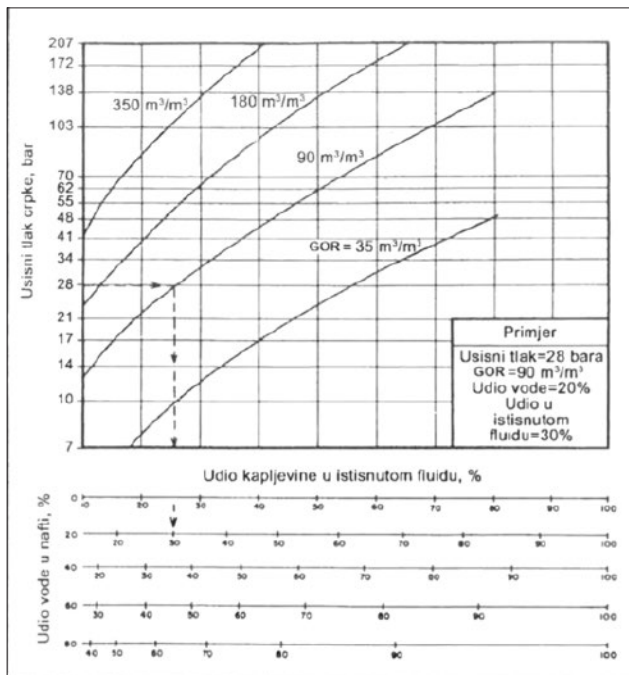
U slučaju ograničenog raspoloživog prostora, kao npr. na proizvodnim odobalnim platformama ili gusto naseljenim lokacijama, ili ako to nalažu ekološki zahtjevi, odabire se zatvoreni sustav pogonskog fluida. Izborom vode kao pogonskog fluida umanjuje se opasnost od požara i onečišćenja. Također, izbor vode kao pogonskog fluida zahtjeva skuplju i kvalitetniju izvedbu površinske utisne crpke, kao i veću količinu aditiva potrebnih za obradu vode.

Ukoliko ne postoje nikakva posebna ograničenja za odabir pogonskog sustava, najčešće se odabire otvoreni sustav s naftom kao pogonskim fluidom. Voda kao pogonski fluid se u otvorenom sustavu koristi vrlo rijetko, prvenstveno zbog velikog gubitka aditiva iz sustava koje je nužno kontinuirano dodavati.

#### 3.2. Odvajanje slobodnog plina

Općenito, izdvajanje plina poželjno je kako bi se smanjio utjecaj plina na djelotvornost hidrauličkih dubinskih crpki. Plin je nužno odvajati kada plinski faktor (engl. *Gas to Oil Ratio - GOR*) prelazi iznad 100 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> i kada je dinamički tlak niži od 30 bara (Zelić i Čikeš, 2006.). Osim osnovnog sustava tubinga, koji ne omogućuje odvajanje slobodnog plina, postoji i sustav tubinga i crpke koji slobodni plin usmjeravaju kroz prstenasti prostor na površinu. U novije vrijeme, na tržištu su dostupne i hidrauličke dubinske crpke koje su u potpunosti otporne na utjecaj slobodnog plina. Ove crpke koriste poseban sustav cirkulacije pogonskog fluida, koji u potpunosti osigurava pražnjenje cilindra pumpe u kojemu se nalazi proizvodni fluid, čak i ako je cilindar u potpunosti ispunjen proizvedenim plinom (URL 3). Na taj način ovaj sustav osigurava nesmetan i konstantan rad crpke i u uvjetima niske proizvodnje te sprječava plinsku blokadu crpke (engl. *gas lock*).

Dakle, iako je većina hidrauličkih crpki konstrukcijski zaštićena od plinske blokade, djelotvornost samih crpki je znatno veća ako se slobodni plin odvaja od nafte. Poželjno je da djelotvornost crpke ne bude niža od



Slika 3-1. Teoretska obujamska djelotvornost hidrauličke crpke (Zelić i Čikeš, 2006.)

50%, iako se za minimalnu dopustivu vrijednost uzima 30%. Na slici 3-1. prikazana je teoretska djelotvornost crpke, tj. udio kapljevine u ukupnom obujmu koji istisne crpka, u funkciji usisnog tlaka crpke i plinskog faktora nafte. U slučaju, kada vrijednosti na dijagramu pokazuju nisku ukupnu djelotvornost crpke (30-50%), nužno je slobodni plin odvajati prilikom proizvodnje.

### 3.3. Izbor modela crpke

Karakteristike hidrauličkih dubinskih stapnih crpki nalaze se u katalogu koji izdaje svaki proizvođač crpke. Specifikacije jednog modela hidrauličke dubinske crpke prikazane su u tablici 3-1.

OZNAKA CRPKE	OMJER P/E	OBUJAMSKI PROTOK [m <sup>3</sup> /d]			Maksimalni broj hodova [min <sup>-1</sup> ]
		Pri maks. broju hodova	Pri jednom hodu u min.		
			Motora	Crpke	
VFR201611	0,62	50,56	0,674	0,337	150
VFR201613	0,87	70,59	0,674	0,471	150
VFR201616	1,32	107,00	0,674	0,713	150
VFR252015	0,74	100,16	1,413	0,835	120
VFR252017	1,00	136,41	1,413	1,137	120
VFR252020	1,32	177,91	1,413	1,483	120
VFR302424	1,28	256,29	2,065	2,133	120

Tablica 3-1. Specifikacije modela hidrauličke crpke (Zelić i Čikeš, 2006.)

Sama oznaka crpke obično je sastavljena na način da, izravno ili neizravno, daje glavne dimenzije crpke. Na primjeru crpke „VFR252020“ u oznaci prve dvije brojke („25“) označavaju nominalni promjer crpke, koji je u ovom slučaju 63,5 mm (2,5 in). Promjer crpke ujedno nam određuje nominalni promjer tubinga u koji se crpka ugrađuje: 73 mm (2 7/8 in) s unutarnjim promjerom 63,5 mm (2,5 in). Sljedeće dvije brojke („20“) odnose se na promjer stapa motora 50,8 mm (2,0 in), a posljednje dvije („20“) promjer stapa crpke 50,8 mm (2,0 in).

Omjer  $P/E$  vezan je uz odabir tlaka površinskog sustava, potrebnog za postizanje određene visine podizanja fluida u bušotini. Površinski tlak obično je ograničen na općenito prihvatljivu maksimalnu vrijednost od 350 bar, a pri izboru crpke vrijedi opće pravilo dano jednadžom (Zelić i Čikeš, 2006.):

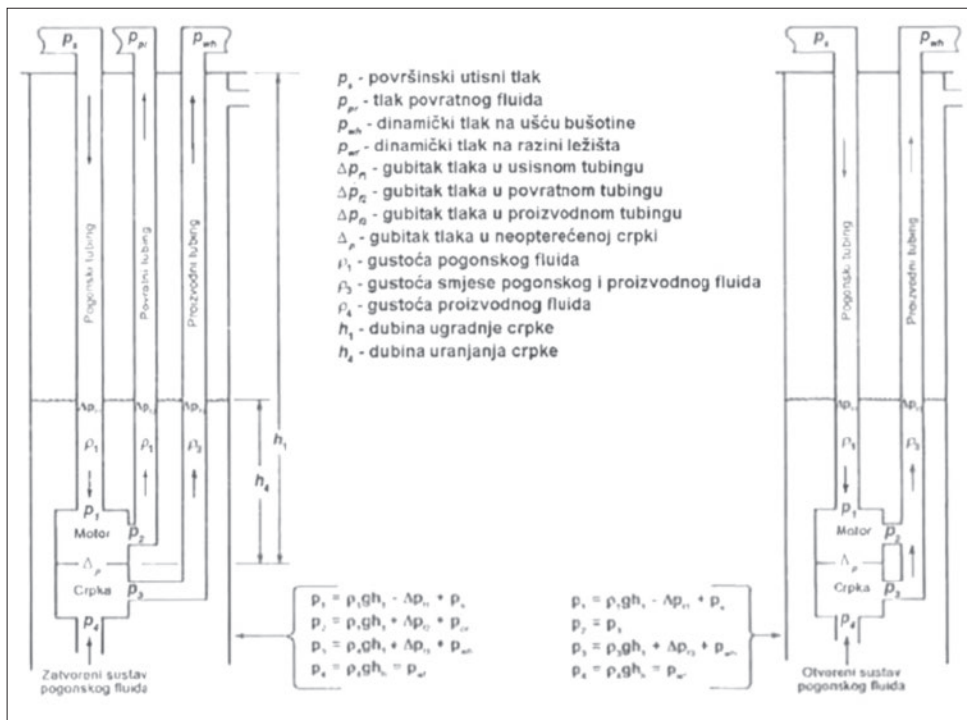
$$\text{Maksimalni } P/E = \frac{3000 \text{ m}}{\text{Neto visina podizanja, m}} \quad (3.1.)$$

gdje je:

$P/E$  - omjer obujamskih protoka crpke i motora

Treći stupac tablice 3-1. odnosi se na maksimalni obujamski protok crpke. U praksi se uobičajeno regulira rad crpke pri protoku koji ne prelazi 85% od maksimalnog. Ukoliko dvije ili više crpki odgovara zadanim radnim uvjetima, odabire se ona crpka koja ima najveću mogućnost podizanja fluida, tj. onu koja ima najniži omjer  $P/E$ . Takav odabir će znatno utjecati na smanjenje operativnih problema s visokotlačnom površinskom opremom.

Vrijednosti jediničnog protoka motora i crpke prvenstveno služi za određivanje protoka pogonskog fluida u sustavu.



Slika 3-2. Prikaz tlakova i hidrauličkih gubitaka u sustavu hidrauličkih crpki (Zelić i Čikeš, 2006.)

### 3.4. Protok pogonskog fluida

Protok pogonskog fluida je funkcija jediničnog protoka crpke i motora, te djelotvornosti crpke i motora. Ako se jedinični protok motora, očitani iz tablice 3-1., označi s  $q'_1/N$ , jednadžba za teoretski protok pogonskog fluida bit će:

$$q'_1 = \left(\frac{q'_1}{N}\right) N \quad (3.2.)$$

gdje je N broj hodova stapa motora.

Analogno, ako se za jedinični protok crpke očita vrijednost  $q'_4/N$ , teoretski protok proizvodnog fluida bit će:

$$q'_4 = \left(\frac{q'_4}{N}\right) N \quad (3.3.)$$

Stvarni protok pogonskog fluida bit će:

$$q_1 = \frac{q'_1}{\eta_1} = \left(\frac{q'_1}{N}\right) \frac{N}{\eta_1} \quad (3.4.)$$

odnosno

$$q_4 = q'_4 \eta_4 = \left(\frac{q'_4}{N}\right) N \eta_4 \quad (3.5.)$$

gdje su:

$\eta_1$  - djelotvornost motora, %

$\eta_4$  - djelotvornost crpke, %

Nova hidraulička crpka ima djelotvornost motora oko 0,95, a djelotvornost crpke oko 0,90. U praksi se te vrijednosti obično smanjuju na 0,90 za motor, odnosno 0,85 za crpku (Zelić i Čikeš, 2006.). Dodatno smanjenje

djelotvornosti crpke može biti uzrokovano djelovanjem slobodnog plina na crpku. Ako se slobodni plin crpi zajedno s naftom, djelotvornost crpke se smanjuje sukladno teoretskoj obujamskoj djelotvornosti,  $\eta_1$ , koju određujemo uz pomoć dijagrama na slici 3-1. U tom slučaju u jednadžbi (3.5.), djelotvornost crpke  $\eta_4$  treba zamjeniti umnoškom  $\eta_4 \times \eta_1$ .

Na temelju dobivenih vrijednosti, te očitanih jediničnih protoka za odabranu crpku, za zadanu dnevnu proizvodnju bušotine,  $q_4$ , iz jednadžbe (3.5.) može se izračunati potreban broj hodova crpke, N, a tada iz jednadžbe (3.4.) potreban protok pogonskog fluida,  $q_1$ .

### 3.5. Proračun tlaka

Slika 3-2. prikazuje tlakove, hidrauličke gubitake i gustoću fluida za zatvoreni i otvoreni sustav cirkulacije pogonskog fluida.

Gdje su:

$p_1$  - ukupan raspoloživi tlak za pogon motora, bar

$p_2$  - ukupan tlak na izlazu (ispuhu) motora, bar

$p_3$  - tlak na izlazu iz crpke, bar

$p_4$  - usisni tlak crpke, bar

Efektivna površina stapa motora, odnosno crpke, na koju djeluje pojedini tlak, jednaka je razlici površine stapa ( $A_E$ , odnosno  $A_P$ ) i površine poprečnog presjeka ojnice (šipke,  $A_R$ ). Slika 3-3. prikazuje površinu na koje djeluju pojedini tlakovi u sustavu dubinskih hidrauličkih crpki.



Ukoliko se sile koje djeluju prema gore označe pozitivnim znakom, iz slike 3-3. slijedi ravnoteža sila pri hodu crpke prema gore:

$$-p_1 A_R - p_2 (A_E - A_R) + p_1 (A_E - A_R) - p_3 (A_P - A_R) + p_4 (A_P - A_R) + p_1 A_R = 0 \quad (3.6.)$$

Nakon sređivanja izraza, jednadžba (3.6.) glasi:

$$p_1 - p_2 - (p_3 - p_4) \frac{A_P - A_R}{A_E - A_R} = 0 \quad (3.7.)$$

Budući da je i za rad neopterećene crpke potreban određeni tlak,  $\Delta p$ , koji je karakterističan za svaki model crpke, a funkcija je broja hodova i mehaničkog trenja u crpki, on se pridodaje, s negativnim predznakom, jednadžbi (3.7.), pa ona glasi:

$$p_1 - p_2 - (p_3 - p_4) \frac{A_P - A_R}{A_E - A_R} - \Delta p = 0 \quad (3.8.)$$

Izraz  $\frac{A_P - A_R}{A_E - A_R}$  predstavlja omjer efektivne površine crpke i efektivne površine motora, i za odabrani model crpke on je isti i pri hodu prema gore i pri hodu prema dolje. Budući da se razmatra dvoradna crpka, razmatrani omjer je ujedno i obujamski omjer, tj. omjer obujamskog protoka crpke i obujamskog protoka motora, pa se zato i naziva „omjer crpke i motora“ ili „omjer  $P/E$ “. Svaka tablica specifikacija, kao i svaki katalog, sadrži numeričke vrijednosti omjera  $P/E$  za svaki model i za svaku veličinu crpke. Matematički izraz odnosa površina crpke i omjera  $P/E$  je različit za različite crpke, pa je nužno supstituirati  $P/E$  u jednadžbu (3.8.) kako bi se dobila opća jednadžba za sve hidrauličke crpke sa zatvorenim sustavom pogonskog fluida:

$$p_1 - p_2 - (p_3 - p_4) \frac{P}{E} - \Delta p = 0 \quad (3.9.)$$

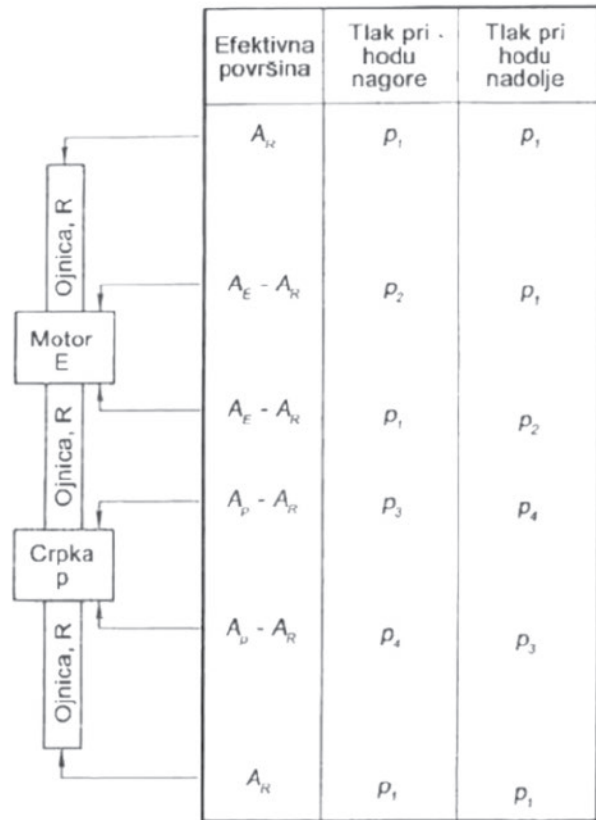
Supstituiramo li izraze za  $p_1, p_2, p_3$  i  $p_4$  iz slike 3-2. u jednadžbu (3.9.), ona tada glasi:

$$(\rho_1 g h_1 - \Delta p_{f1} + p_s) - (\rho_1 g h_1 + \Delta p_{f2} + p_{PR}) - (\rho_4 g h_1 + \Delta p_{f3} + p_{wh} - \rho_4 g h_4) \frac{P}{E} - \Delta p = 0 \quad (3.10.)$$

Iz jednadžbe (3.10.) slijedi rješenje za utisni tlak na površini,  $p_s$ , u zatvorenom sustavu pogonskog fluida:

$$p_s = \Delta p_{f1} + \Delta p_{f2} + p_{PR} + [(h_1 - h_4) \rho_4 g + \Delta p_{f3} + p_{wh}] \frac{P}{E} + \Delta p \quad (3.11.)$$

Za otvoreni sustav pogonskog fluida vrijedi da je,  $p_2 = p_3$ , pa iz jednadžbe (3.9.) slijedi opća jednadžba za



Slika 3-3. Prikaz površina na koje djeluju pojedini tlakovi u hidrauličkoj crpki (Zelić i Čikeš, 2006.)

sve hidrauličke crpke s otvorenim sustavom pogonskog fluida:

$$p_1 = p_3 (1 + \frac{P}{E}) - p_4 \frac{P}{E} + \Delta p \quad (3.12.)$$

Supstitucijom izraza za  $p_1, p_3$  i  $p_4$  iz slike 3-2. u jednadžbu (3.12.) se dobije:

$$\rho_1 g h_1 - \Delta p_{f1} + p_s = (\rho_3 g h_1 + \Delta p_{f3} + p_{wh}) (1 + \frac{P}{E}) - \rho_4 g h_4 \frac{P}{E} + \Delta p \quad (3.13.)$$

odakle slijedi rješenje za utisni tlak na površini,  $p_s$ , u otvorenom sustavu pogonskog fluida:

$$p_s = (\rho_3 g h_1 + \Delta p_{f3} + p_{wh}) (1 + \frac{P}{E}) - \rho_4 g h_4 \frac{P}{E} - \rho_1 g h_1 + \Delta p_{f1} + \Delta p \quad (3.14.)$$

Budući da je dubina ugradnje hidrauličke crpke uglavnom uvijek jednaka dubini ležišta, usisni tlak crpke može se smatrati jednakim dinamičkom tlaku na razini ležišta, tj.  $p_4 g h_4 = p_{wf}$ , pa se jednadžbu (3.14.) može pisati kao:

$$p_s = (\rho_3 g h_1 + \Delta p_{f3} + p_{wh}) (1 + \frac{P}{E}) - p_{wf} \frac{P}{E} - \rho_1 g h_1 + \Delta p_{f1} + \Delta p \quad (3.15.)$$

Za određivanje utisnog tlaka na površini,  $p_s$ , uz poznate gustoće pojedinih fluida, potrebno je odrediti hidrauličke gubitke zbog trenja pojedinog fluida u cijevima,  $\Delta p_f$ , kao i hidraulički gubitak neoptrećene crpke,  $\Delta p$ . Gubitak tlaka zbog trenja u cijevima moguće je odrediti temeljem Hagen-Poiseuilleovog zakona, danog jednadžbom:

$$\Delta p_f = \frac{128 \mu L_c q}{\pi D_c^4} \quad (3.16.)$$

Gdje su:

$L_c$  - duljina cijevi, m

$D_c$  - unutarnji promjer cijevi, m

Jednadžba (3.16.) podrazumijeva laminarno (strujno) protjecanje, karakterizirano bezdimenzijskim parametrom, tzv. Reynoldsovim brojem, manjim od 2320.

$$Re = \frac{v D_c \rho}{\mu} \quad (3.17.)$$

No, ako se radi o prijelaznom ( $2320 < Re < 3000$ ) ili turbulentnom (vrtložnom) protjecanju fluida ( $Re > 3000$ ), treba se služiti Darcy-Weissbachovom jednadžbom:

$$h_w = f \frac{L_c v^2}{D_c 2g} \quad (3.18.)$$

Budući da je  $\Delta p_f = \rho g h_w$ , prikladniji oblik te jednadžbe glasi:

$$\Delta p_f = f \frac{L_c v^2 \rho}{D_c 2} \quad (3.19.)$$

Koeficijent trenja  $f$  u funkciji je Reynoldsovog broja, a za laminarno protjecanje iznosi:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.20.)$$

Ukoliko se jednadžbu (3.20.) uvrsti u jednadžbu (3.19.) i Reynoldsov broj izrazi jednadžbom (3.17.) te srednja brzina iskaže kao:

$$v = \frac{q}{A} = \frac{4q}{D_c^2 \pi} \quad (3.21.)$$

jednadžba (3.19.) poprimat će isti oblik kao i jednadžba (3.16.). Za turbulentno (vrtložno) protjecanje koeficijent trenja je definiran različitim funkcijama Reynoldsova broja, pa je preporučljivo koristiti se grafičkim rješenjem, poznatim kao Moodyev dijagram (Slika 3-4.).

U praksi Reynoldsov broj rijetko prelazi vrijednost  $5 \times 10^4$ , pa se koeficijent treja može aproksimirati Blasiusovom jednadžbom:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (3.22.)$$

koja je primjenjiva u području  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^5$ , za hidraulički glatke cijevi ( $K/D=0$ ).

U slučaju kada je relativna hrapavost veća od nula, najtočnijom se smatra Colebrookova korelacija, koja glasi:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,8686 \ln \left( \frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.23.)$$

Budući da Colebrookova korelacija podrazumijeva iterativni postupak, što je nepraktično, korisno je znati eksplicitnu jednadžbu Swamee-Jaina, koja daje zadovoljavajuće rezultate, a primjenjiva je za  $Re \geq 5 \times 10^3$  i  $K/D \geq 0$ .

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{K}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.24.)$$

Hidraulički gubitak u neoptrećenoj crpki,  $\Delta p$ , specifičan je za svaki model crpke i obično je dan grafički u funkciji broja hodova crpke, te gustoće i viskoznosti pogonskog fluida, kao sastavni dio specifikacije (Zelić i Čikeš, 2006.).

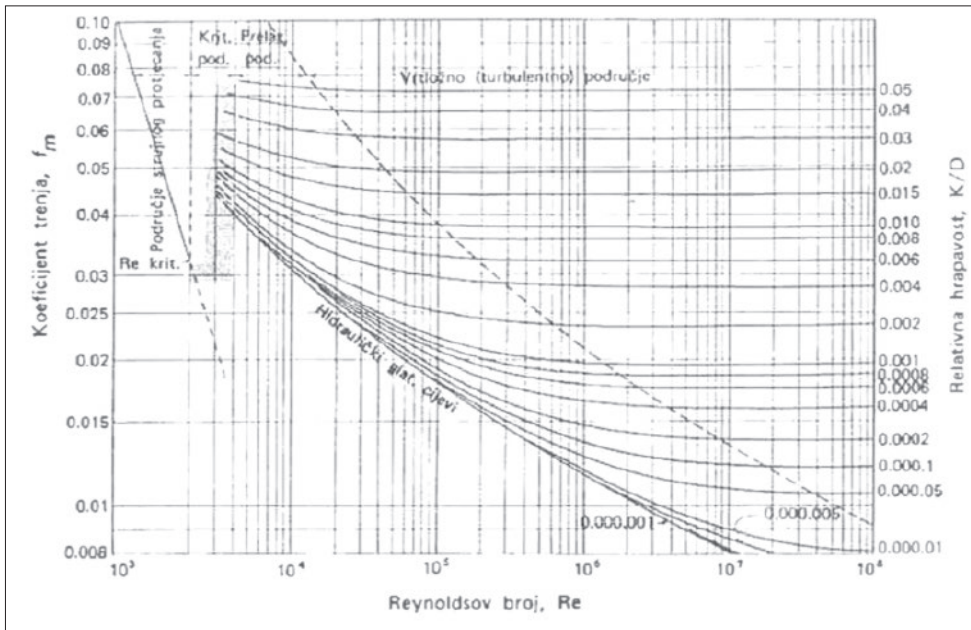
## 4. Proračun sustava

Analizom rada pojedinih dijelova sustava dubinskih hidrauličkih stapnih crpki moguće je definirati postupak proračuna cijelog sustava. Postupak proračuna služi za izbor hidrauličke crpke te određivanje potrebnog površinskog tlaka za jednu bušotinu. Pritom se može primjeniti pojedinačni ili središnji sustav površinskog postrojenja.

### 4.1. Postupak proračuna sustava

Postupak proračuna sustava dubinskih hidrauličkih stapnih crpki treba sadržavati:

- određivanje potrebnog dinamičkog tlaka na razini ležišta za zadanu dnevnu proizvodnju temeljem poznatog indeksa proizvodnosti, odnosno IPR-krivulje,
- odabir otvorenog ili zatvorenog sustava pogonskog fluida,



Slika 3-4. Moodyev dijagram (Zelić, 1977.)

- razmatranje utjecaja slobodnog plina na djelotvornost crpke,
- određivanje teoretskog obujamskog protoka crpke koji će ostvariti zadanu (stvarnu) dnevnu proizvodnju, odnosno protoka uvećanog radi smanjena djelotvornosti crpke,
- odabir odgovarajuće crpke s obzirom na promjer tubinga i zaštitnih cijevi, a koja može ostvariti izračunati teoretski protok,
- određivanje potrebnog broja hodova crpke, te potrebnog protoka pogonskog fluida,
- proračun tlaka u sustavu,
- odabir odgovarajuće površinske utisne crpke.

#### 4.2. Primjer proračuna

Postupak proračuna ilustriran je na primjeru bušotine „X“ s hrvatskih proizvodnih polja, a za koju su temeljni podatci dani u tablici 4-1.

Postupak proračuna:

##### 1. Određivanje dinamičkog tlaka na razini ležišta

Na temelju zadanih ulaznih podataka iz jednadžbe  $J = \frac{q_L}{p_{R,SR} + p_{wf}}$ , za zadanu proizvodnju slijedi jednadžba za proračun dinamičkog tlaka na razini ležišta:

$$p_{wf} = p_{R,SR} - \frac{q_L}{J} = 120 - \frac{100}{3,5} = 91,43 \text{ bar}$$

Budući da se ugradnja dubinske crpke vrši neposredno iznad perforacija vrijedi,  $h_1 = H_p$ . Izračunati dinamički tlak na razini ležišta ujedno je i dinamički tlak na razini usisa crpke, tj.  $p_4 = p_{wf}$ .

##### 2. Odabir sustava pogonskog fluida

Za početni odabir uzima se slobodna dubinska hidraulička crpka s otvorenim sustavom cirkulacije nafte kao pogonskog fluida. Prema dijagramu na slici 3-1., za usisni tlak od 91 bar, te  $GOR=80 \text{ m}^3/\text{m}^3$  i udio vode od 80%, teoretska obujamska djelotvornost

Dinamički tlak na ušću bušotine, $p_{wh}$	10 bar
Srednji ležišni tlak, $p_{R,SR}$	120 bar
Ležišna temperatura, T	90 °C
Potrebna proizvodnja, $q_L$	100 m <sup>3</sup> /d
Index proizvodnosti, J	3,5 m <sup>3</sup> /d/bar
Gustoća nafte, $\rho_o$	875 kg/m <sup>3</sup>
Proizvodni plinski faktor, GOR	80 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Udio vode u proizvodnom fluidu, $f_w$	0,80
Gustoća vode, $\rho_w$	1070 kg/m <sup>3</sup>
Dubina sredine perforacija, $H_p$	2165 m
Vanjski / unutarnji promjer tubinga, $D_t / d_t$	73,0 / 63,5 mm
Vanjski / unutarnji promjer zaštitnih cijevi, $D_{zc} / d_{zc}$	139,7 / 127,0 mm

Tablica 4-1. Podatci o bušotini "X" i ležištu

(učinkovitost) crpke,  $\eta_1$ , iznosi 0,92 (92%). Dakle, izbor slobodne crpke s otvorenim sustavom pogonskog fluida je prihvatljiv, jer prema načelu iz točke 3.2 djelotvornost crpke prelazi 50%, odnosno slobodan plin nije potrebno odvajati, već se može crpiti zajedno s naftom.

### 3. Određivanje potrebnog teoretskog protoka crpke

Sukladno načelima iz točke 3.4, iz jednadžbe (3.5.) dobiva se teoretski protok crpke:

$$q'_4 = \frac{q_L}{\eta_1 \eta_4} = \frac{100}{0,92 \times 0,85} = 127,88 \text{ m}^3/\text{d}$$

### 4. Odabir crpke

Iz specifikacije hidrauličke crpke dane u tablici 3-1., prema odgovarajućim zadanim dimenzijama tubinga odabire se crpka VFR252020. Odabrana crpka odgovara unutarnjem promjeru tubinga i može ostvariti izračunati teoretski protok, a njene karakteristike očitane iz tablice 3-1. su:

- omjer crpke i motora:  $P/E = 1,32$ ,
- teoretski protok crpke pri maksimalnom broju hodova:  $q'_4 = 127,88 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ ,
- jedinični protok motora:  $\frac{q'_4}{N} = 1,413 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{min}^{-1}}$ ,
- jedinični protok crpke:  $\frac{q'_4}{N} = 1,483 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{min}^{-1}}$ ,
- maksimalan broj hodova:  $N = 120 \text{ min}^{-1}$ .

### 5. Određivanje potrebnog broja hodova i potrebnog protoka pogonskog fluida

Preuređenjem jednadžbe (3.5.) slijedi potreban broj hodova crpke:

$$N = \frac{q'_4}{(q'_4/N)} = \frac{127,88}{1,483} = 86,23 \text{ min}^{-1}$$

Iz jednadžbe (3.4.) slijedi stvarni protok pogonskog fluida:

$$q_1 = \left(\frac{q'_4}{N}\right) \frac{N}{\eta_1} = 1,413 \frac{86,23}{0,9} = 135,38 \text{ m}^3/\text{d}$$

### 6. Proračun tlaka

Prije samog proračuna tlaka potrebno je definirati pojedine ulazne parametre. Budući je za pogonski fluid odabrana nafta, obujamska gustoća pogonskog fluida jednaka je obujamskoj gustoći nafte:

$$\rho_1 = \rho_o = 875 \text{ kg/m}^3$$

Povratni fluid smjesa je pogonskog i proizvodnog fluida, pa je njegov protok jednak:

$$\begin{aligned} q_3 &= q_1 + q_4 = q_1 + q_L = \\ &= 135,38 + 100 = 235,38 \text{ m}^3/\text{d} \end{aligned}$$

Zadani udio vode u proizvodnom fluidu iznosi 80%, a u smjesi će on iznositi:

$$f_{w3} = \frac{q_L f_w}{q_3} = \frac{100 \times 0,8}{235,38} = 0,34$$

pa će gustoća povratnog fluida, ako se zanemari prisustvo plina, biti:

$$\begin{aligned} \rho_3 &= \rho_o(1 - f_{w3}) + \rho_w f_{w3} = \\ &= 875(1 - 0,34) + 1070 \times 0,34 = 941,3 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Za određivanje hidrauličkih gubitaka u tubingu i prstenastom prostoru koriste se jednadžbe (3.16.) do (3.24.), s tim da se prethodno odredi viskoznost pojedinih fluida uz pomoć neke od objavljenih korelacija. Prema jednoj od korelacija otplinjena nafta gustoće 875  $\text{kg/m}^3$ , pri srednjoj temperaturi bušotine od 60°C, ima viskoznost 6 mPas (Sečen, 2002.). Dakle, viskoznost pogonskog fluida je:

$$\mu_1 = 6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Količina plina u povratnom fluidu iznosi:

$$GLR = \frac{q_L(1 - f_w)GOR}{q_3} = \frac{100(1 - 0,8) \times 80}{235,38} = 6,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

za slučaj kada je on sav otopljen u nafti, viskoznost nafte iznosi 4 mPas (Sečen, 2002.). Dakle, ukoliko se zanemari sadržaj vode, viskoznost povratnog fluida može se aproksimirati kao:

$$\mu_3 = 5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Na temelju poznatih ulaznih parametara, postupak proračuna gubitka tlaka u tubingu pri protjecanju pogonskog fluida je sljedeći:

brzina protjecanja, jednadžba (3.21.):

$$v_1 = \frac{4q_1}{d_t^2 \pi} = \frac{4 \times 135,38/86400}{(63,5 \times 10^{-3})^2 \times 3,14} = 0,4948 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj, jednadžba (3.17.):

$$Re_1 = \frac{v_1 d_t \rho_1}{\mu_1} = \frac{0,4948 \times 63,5 \times 10^{-3} \times 875}{6 \times 10^{-3}} = 4582,1$$

koeficijent trenja, jednadžba (3.22.):

$$f_1 = \frac{0,3164}{Re_1^{0,25}} = \frac{0,3164}{4582,1^{0,25}} = 0,038$$

gubitak tlaka računa se prema jednadžbi (3.19.):

$$\Delta p_{f1} = f_1 \frac{h_1 v_1^2 \rho_1}{d_t} = 0,038 \times \frac{2165}{63,5 \times 10^{-3}} \frac{0,4948^2 \times 875}{2} = 1,39 \text{ bar}$$

Analogno, postupak proračuna gubitka tlaka u prstenastom prostoru pri protjecanju smjese pogonskog i proizvodnog fluida je sljedeći:

brzina protjecanja, jednačba (3.21.):

$$v_1 = \frac{4q_3}{(d_{zc}^2 - D_t^2)\pi} = \frac{4 \times 235,38/86400}{[(127 \times 10^{-3})^2 - (73 \times 10^{-3})^2] \times 3,14} = 0,321 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj, jednačba (3.17.):

$$Re_3 = \frac{v_3(d_{zc} - D_t)\rho_3}{\mu_3} = \frac{0,321 \times (127 \times 10^{-3} - 73 \times 10^{-3}) \times 941,3}{5 \times 10^{-3}} = 3263,3$$

koeficijent trenja, jednačba (3.22.):

$$f_3 = \frac{0,3164}{Re_3^{0,25}} = \frac{0,3164}{3263,3^{0,25}} = 0,042$$

gubitak tlaka računa se prema jednačbi (3.19.):

$$\Delta p_{f_3} = f_3 \frac{h_1}{(d_{zc} - D_t)} \frac{v_3^2 \rho_3}{2} = 0,042 \times \frac{2165}{(127 - 73) \times 10^{-3}} \frac{0,321^2 \times 941,3}{2} = 0,82 \text{ bar}$$

Gubitak tlaka zbog trenja u crpki, očitano iz dijagrama proizvođača konkretne crpke (Zelić i Čikeš, 2006.), iznosi:

$$\Delta p = 35 \text{ bar}$$

Dakle, utisni tlak na površini računa se prema jednačbi (3.15.):

$$p_s = \left( \rho_3 g h_1 + \Delta p_{f_3} + p_{wh} \right) \left( 1 + \frac{P}{E} \right) - p_{wf} \frac{P}{E} - \rho_1 g h_1 + \Delta p_{f_1} + \Delta p$$

$$p_s = (941,3 \times 9,81 \times 2165 + 0,82 + 10) \times (1 + 1,32) - 91,43 \times 1,32 - 875 \times 9,81 \times 2165 + 1,39 + 35$$

$$p_s = 312,97 \text{ bar}$$

Prije konačnog odabira dubinske crpke, potrebno je provjeriti zadovoljava li odabrana crpka općem pravilu danom jednačbom (3.1.). Vrijedi da je, „neto visina podizanja“ ekvivalentna razlici tlaka što je ostvari crpka, tj  $L_{net} = p_3 - p_4$ . Supstitucijom izraza za  $p_3$  i  $p_4$  iz slike 3-2. slijedi:

$$L_{net} = \rho_3 g h_1 + \Delta p_{f_3} + p_{wh} - p_{wf}$$

odnosno, nakon sređivanja izraza:

$$L_{net} = h_1 - \frac{p_{wf} - p_{wh} - \Delta p_{f_3}}{\rho_3 g}$$

$$L_{net} = 2165 - \frac{91,43 - 10 - 0,82}{941,3 \times 9,81} \times 10^5 = 1292 \text{ m}$$

pa prema jednačbi (3.1.) maksimalni omjer  $P/E$  iznosi:

$$\left( \frac{P}{E} \right)_{max} = \frac{3000}{L_{net}} = \frac{3000}{1292} = 2,32$$

Dakle, omjer  $P/E$  odabrane crpke je manji od maksimalno prihvatljivog  $P/E$ , čime je potvrđen izbor crpke s oznakom **VFR252020**.

## 7. Odabir odgovarajuće površinske utisne crpke

Prema katalogu proizvođača, odabire se trorednu (trocilindričnu) površinsku utisnu crpku, koja može ostvariti protok pogonskog fluida:

$$q_1 = 135,38 \text{ m}^3/d$$

pri tlaku:

$$p_s = 312,97 \text{ bar}$$

Odabrana trocilindrična crpka je Dover A-130T-H (URL 4), čije su karakteristike:

- maksimalni radni tlak: 344 bar,
- protok pri 300 okretaja u minuti 150  $\text{m}^3/d$ .

Potrebna hidraulička snaga utisne crpke jednaka je:

$$P_h = q_1 p_s = \frac{135,38}{86400} \times 312,97 \times 10^5 = 49,04 \text{ kW}$$

Ako se pretpostavi mehanička djelotvornost od 90%, potrebna snaga elektromotora za pogon površinske utisne crpke iznosi:

$$P_e = \frac{P_h}{\eta_e} = \frac{49,04}{0,9} = 54,49 \text{ kW}$$

Za proračun ukupne djelotvornosti sustava, potrebno je odrediti koristan rad koji će obaviti dubinska hidraulička crpka, s time što će povisiti dinamički tlak proizvodnog fluida s  $p_{wf}$  na  $p_3$ , odnosno ostvariti „neto visinu podizanja“,  $L_{net}$ , pri protoku  $q_4 = q_L$ . Koristan rad  $P$  računa se prema jednačbi:

$$P = (p_3 - p_{wf}) q_4 = L_{net} \rho_3 g q_4$$

$$P = 1292 \times 941,3 \times 9,81 \times \frac{100}{86400} = 13,81 \text{ kW}$$

Dakle, ukupna djelotvornost sustava iznosi:

$$\eta = \frac{P}{P_e} = \frac{13,81}{54,49} = 0,25$$

## 5. Zaključak

Jedno od pitanja koje se nameće pri proizvodnji kapljevine iz iscrpljenih i starih proizvodnih polja je kako produžiti njihov životni vijek i sačuvati profitabilnost, naročito kod dubokih i koso usmjerenih bušotina, kao i kod bušotina s niskim dinamičkim tlakovima i niskim indeksom proizvodnosti? Upravo u takvim uvjetima rada, u kojima ekonomski pokazatelji, kao ni ležišni uvjeti, nisu zadovoljavajući, moguća je efikasna i rentabilna primjena dubinske hidrauličke stapne crpke. Zahvaljujući ponajprije svom kompaktnom i pouzdanom dizajnu, kao i vrlo jednostavnom postupku ugradnje, dubinske hidrauličke stapne crpke mogu značajno utjecati na povećanje proizvodnje i profitabilnosti. Dubinske hidrauličke stapne crpke omogućavaju široku primjenu u praksi te pouzdan i siguran rad u težim ležišnim uvjetima. Koriste se: pretežito u koso usmjerenim i horizontalnim bušotinama, za pridobivanje viskoznih (teških) nafte, za pridobivanje iz bušotina s velikim udjelom pijeska, u bušotinama s promjenjivim dotokom fluida te kod pridobivanja fluida s korozivnim djelovanjem. Posebna primjena dubinskih hidrauličkih stapnih crpki odnosi se na odobalna postrojenja te udaljena kopnena postrojenja, a u novije vrijeme primjenu su pronašle i u pridobivanju fluida iz nekonvencionalnih ležišta.

Prva dubinska hidraulička stapna crpka ugrađena je u bušotinu 1932. godine, razvojem tehnike i

tehnologije nastale su pouzdane, kompaktne crpke s nizom prednosti u odnosu na druge metode mehaničkog podizanja. Sposobnost hidrauličkog sustava da proizvede veću količinu fluida čini ga učinkovitijim od mehaničkih metoda koje za rad koriste klipne šipke. Jednostavan način ugradnje bez primjene remontnog postrojenja, niska cijena ugradnje i održavanja, široka primjena te velika obujamska djelotvornost (95%), samo su neke od prednosti dubinskih hidrauličkih stapnih crpki.

Glavni nedostatak sustava dubinskih hidrauličkih stapnih crpki očituje se u većem udjelu plina u proizvodnom fluidu, pa je plin potrebno odvojiti. Prisustvo plina može značajno utjecati na smanjenje djelotvornosti crpke, što se može vidjeti i u primjeru proračuna koji je izveden u ovom završnom radu. Ukupna djelotvornost sustava od 25%, uz proizvodni plinski faktor  $GOR=80 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , zasigurno nije zadovoljavajuća, te bi trebalo odabrati sustav u kojemu bi se slobodni plin odvajao mimo crpke. Također, za povećanje ukupne djelotvornosti sustava mogla bi se razmatrati ugradnja sustava s plinskim podizanjem kapljevine obzirom na visoki GOR. Međutim za taj sustav podizanja potrebna su veća početna ulaganja, prvenstveno u infrastrukturu (kompresorska stanica, utisni plinovodi itd.) te je potrebno osigurati izvor plina (iz plinskih ležišta ili kupnjom iz distributivnog sustava).

## Literatura

1. API, 1996. *Introduction to Oil and Gas Production*, Fifth edition. Washington DC: American Petroleum Institute.
2. BELLARBY, J., 2009. *Well Completion Design*, First edition. Aberdeen, UK: Elsevier.
3. BROWN, K. E., 1980. *The Technology of Artificial Lift Methods*, Volume 2b. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books.
4. LANGSTON, L. V., 2003. *The Lease Pumper's Handbook*, First edition. Oklahoma: Commission of Marginally Producing Oil and Gas Wells of Oklahoma.
5. PERIĆ, M., 2007. *Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina*. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.
6. SEČEN, J., 2002. *Razrada ležišta ugljikovodika*. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.
7. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. *Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama*. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.
8. ZELIĆ, M., 1977. *Tehnologija pridobivanja nafte i plina eruptiranjem i gasliftom*. Zagreb: INA-Naftaplin.

## Web izvori:

1. URL 1: WEATHERFORD. 2015. Hydraulic Piston-Pump Lifting Systems. <https://weatherford.com/en/documents/brochure/products-and-services/production-optimization/hydraulic-piston-pump-lifting-systems/> (14.4.2018.)
2. URL 2: DOVER. Hydraulic Lift. <https://www.apergyals.com/products/hydraulic-lift/> (14.4.2018.)
3. URL 3: WEATHERFORD. 2013. Low-Volume PL-III Pump. <https://www.weatherford.com/en/documents/real-result/production-en/artificial-lift-systems/low-volume-pl-iii-pump-doubles-liquid-production,-increases-gas-production/> (4.5.2018.)
4. URL 4: DOVER. Accelerated Multiplex Plunger Pumps. [https://www.doverals.com/assets/img/brochures/2017\\_Surface\\_Pump\\_Catalog.pdf](https://www.doverals.com/assets/img/brochures/2017_Surface_Pump_Catalog.pdf) (5.5.2018.)
5. URL 5: AL SHIRAWI EQUIPMENT COMPANY. 2018. Inlet manifold. <http://oilfield.alshirawiequipment.com/services/inlet-manifold/63> (5.5.2018.)
6. URL 7: WEATHERFORD. 2012. Weatherford's Hydraulic Lift System. <https://www.rotatingright.com/pdf/Weatherford%20Hydraulic%20Lift%20Systems.pdf> (5.6.2018.)
7. URL 6: OILFIELD GLOSSARY. <http://www.glossary.oilfield.slb.com/> (10.4.2018.)