

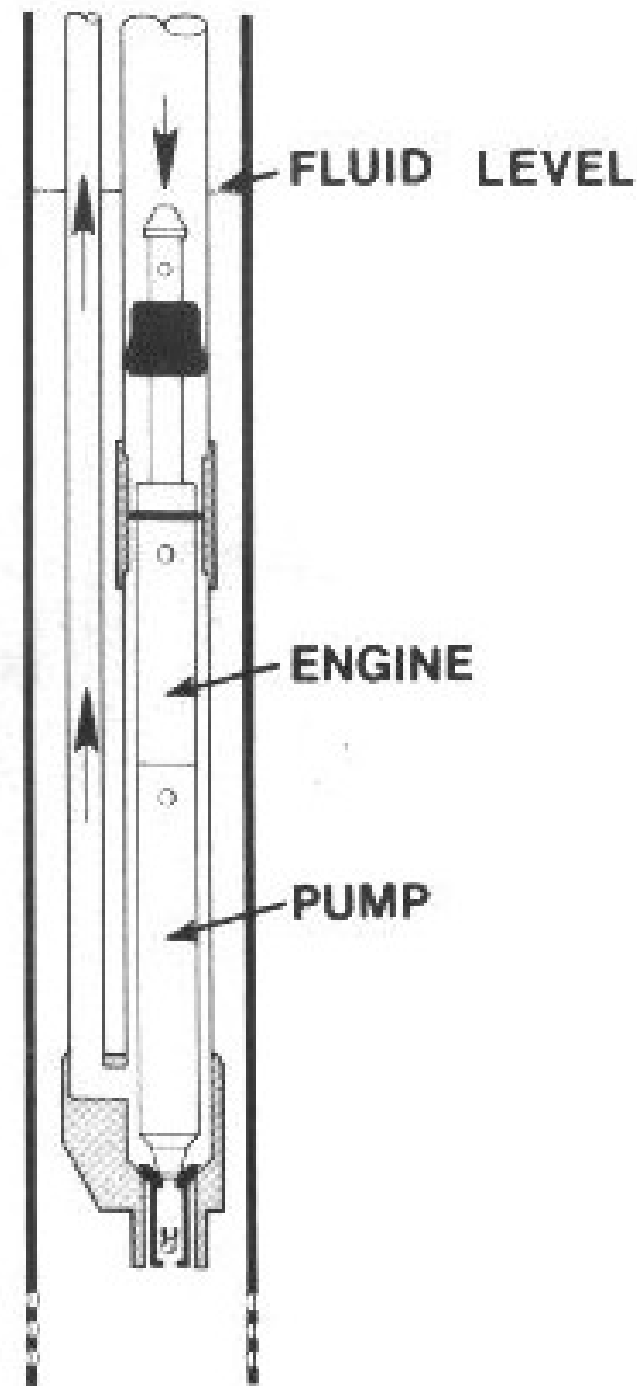
# PROIZVODNJA NAFTE I PLINA II.

## Hidrauličke crpke

Prof. dr. sc. Marin Čikeš

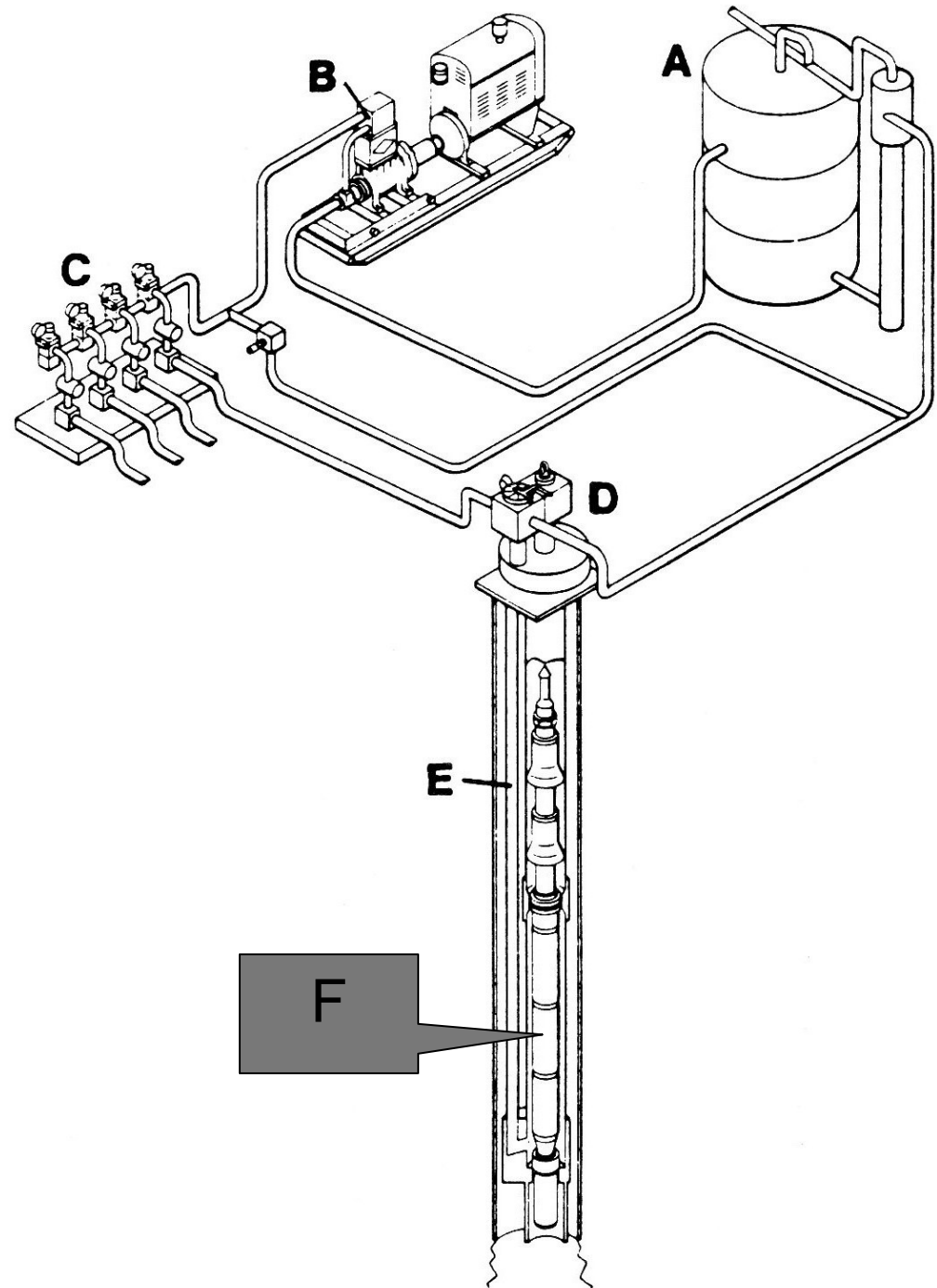
# Hidraulička uronjiva crpka

- Sustav čvrsto vezanog dvoradnog motora (stroja) i dvoradne crpke;
- Pogonski fluid dovodi se u motor, pod visokim tlakom, jednim vodom, a potrošeni pogonski fluid i bušotinski fluid odvođe se na površinu drugim vodom;
- Pogonski fluid pokreće obostrano stap motora (slično parnom stroju), a ovaj pak pokreće stap crpke;
- Od svih dubinskih crpki, hidrauličke crpke su primjenjive za najveće dubine (preko 5500 m)



# Cjelovit sustav dubinskih hidrauličkih crpki

- A - spremnici,
- B - površinska (utisna) crpka,
- C - kontrolni razvodnik,
- D - oprema ušća bušotine,
- E - sustav tubinga,
- F – hidraulička crpka



# Motor hidrauličke crpke u hodu dolje

- Svaki model crpke jedinstven je po dizajnu motora (engine end) i crpke (pump end);
- Načelo rada motora (stroja) prikazano je na jednom od takvih modela ("Kobe A");
- Trenutno djelujući pogonski fluid označen je crno, a potrošeni pogonski fluid točkasto.
- U donjem položaju stapa, stanjeni dio na vrhu osovine (valve rod) omogućuje ulaz pogonskog fluida pod ventil motora te ga pomiče prema gore.

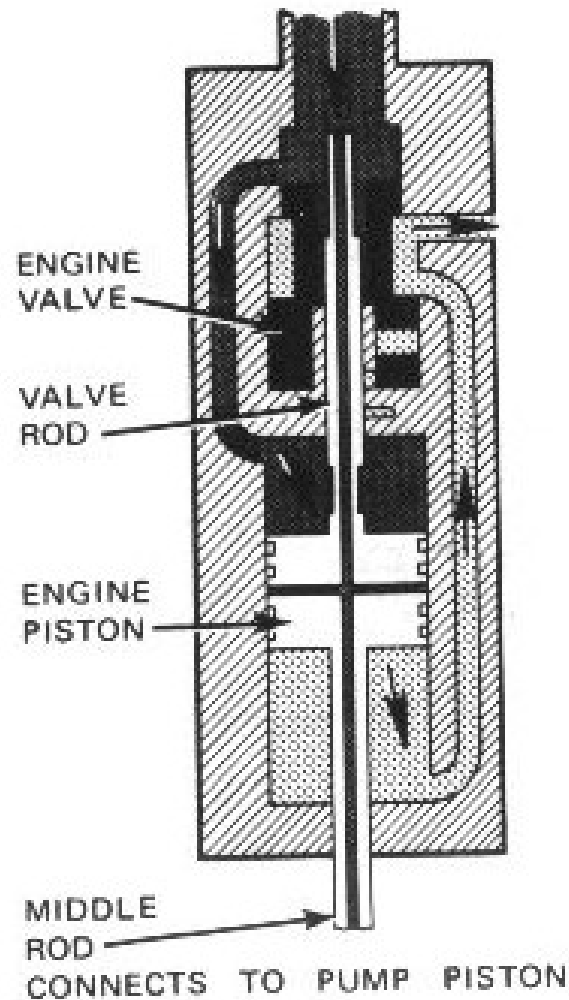


Fig. 5.2 Engine end

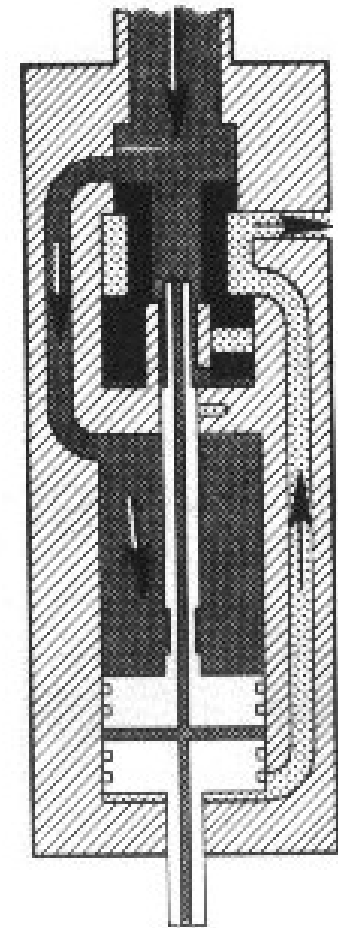


Fig. 5.3 Engine end of downstroke

# Motor hidrauličke crpke u hodu gore

- Nakon promjene položaja ventila, promijenjen je tok pogonskog fluida prema donjoj strani stapa;
- Potrošeni pogonski fluid stap potiskuje prema gore i dalje prema bočnom izlazu.
- U gornjem položaju stapa stanjeni dio osovine spaja prostor ispod ventila s ispušnim otvorom, ventil ponovno mijenja položaj i postupak se ponavlja.

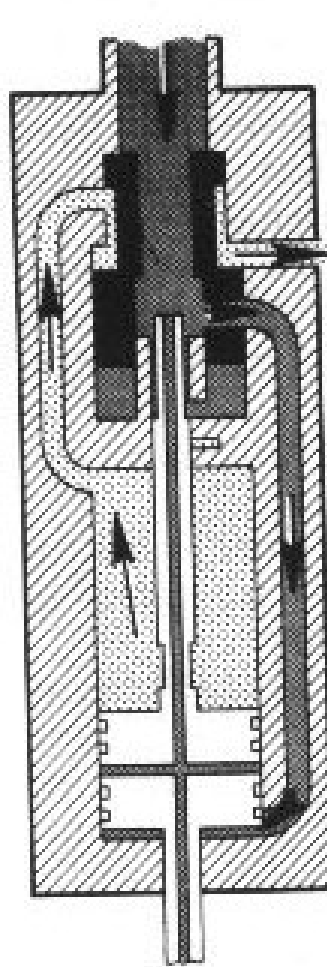


Fig. 5.4 Engine - upstroke

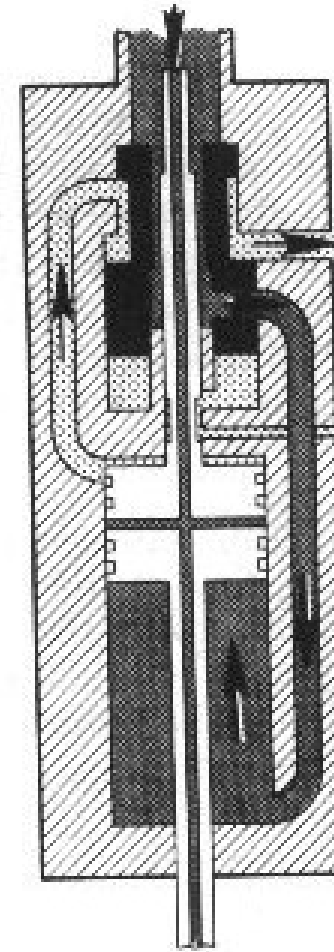


Fig. 5.5 Engine - end of upstroke

# Hidraulička crpka u hodu dolje

- Kao i motor, hidraulička crpka je dvoradna;
- Pri hodu stapa prema dolje, gornji usisni ventil je otvoren i bušotinski fluid puni gornji dio cilindra, dok se bušotinski fluid ispod stapa istiskuje kroz donji ispušni ventil.

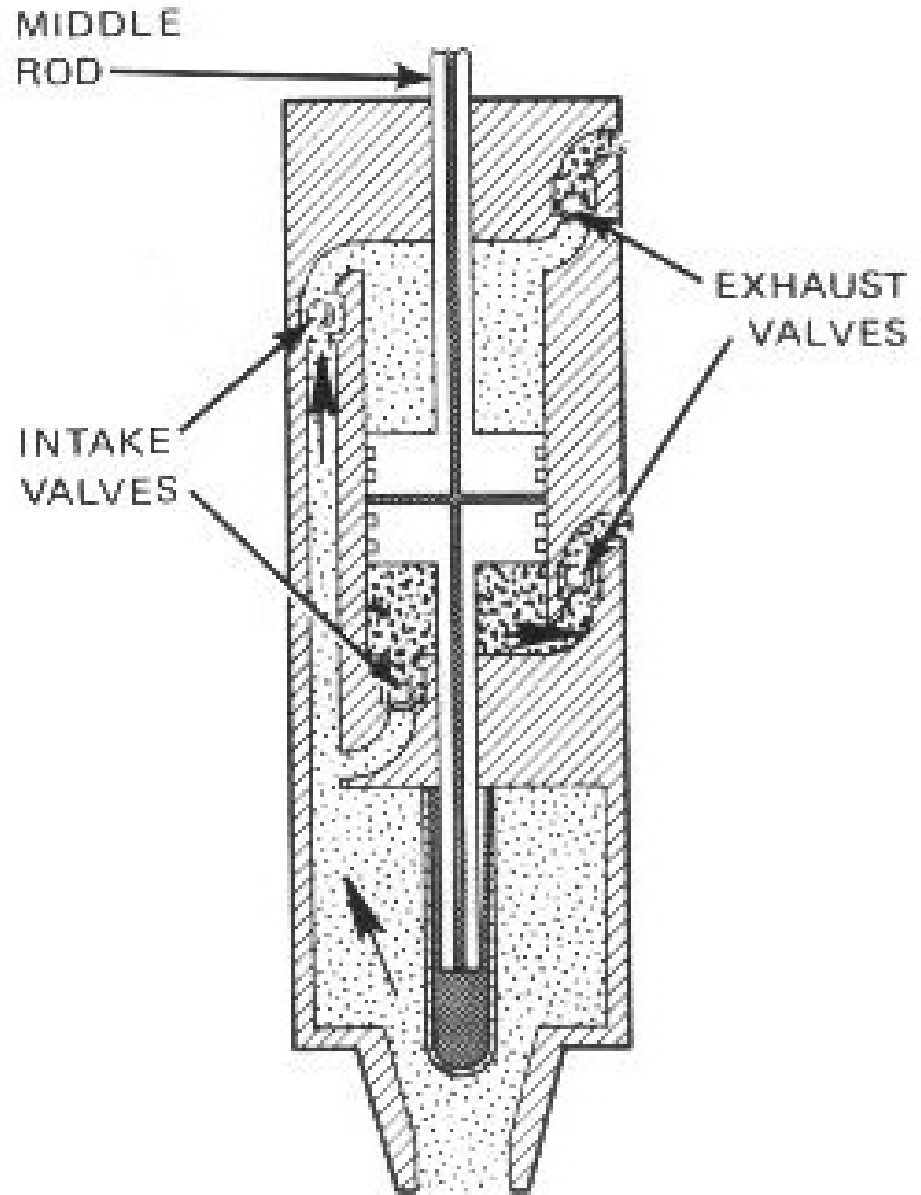


Fig. 5.6 Pump end in downstroke

# Kompletna hidraulička crpka

- Rad sustava hidrauličke crpke, tj. motora i same crpke, u hodu prema dolje i u hodu prema gore, prikazan je na sljedećoj slici.

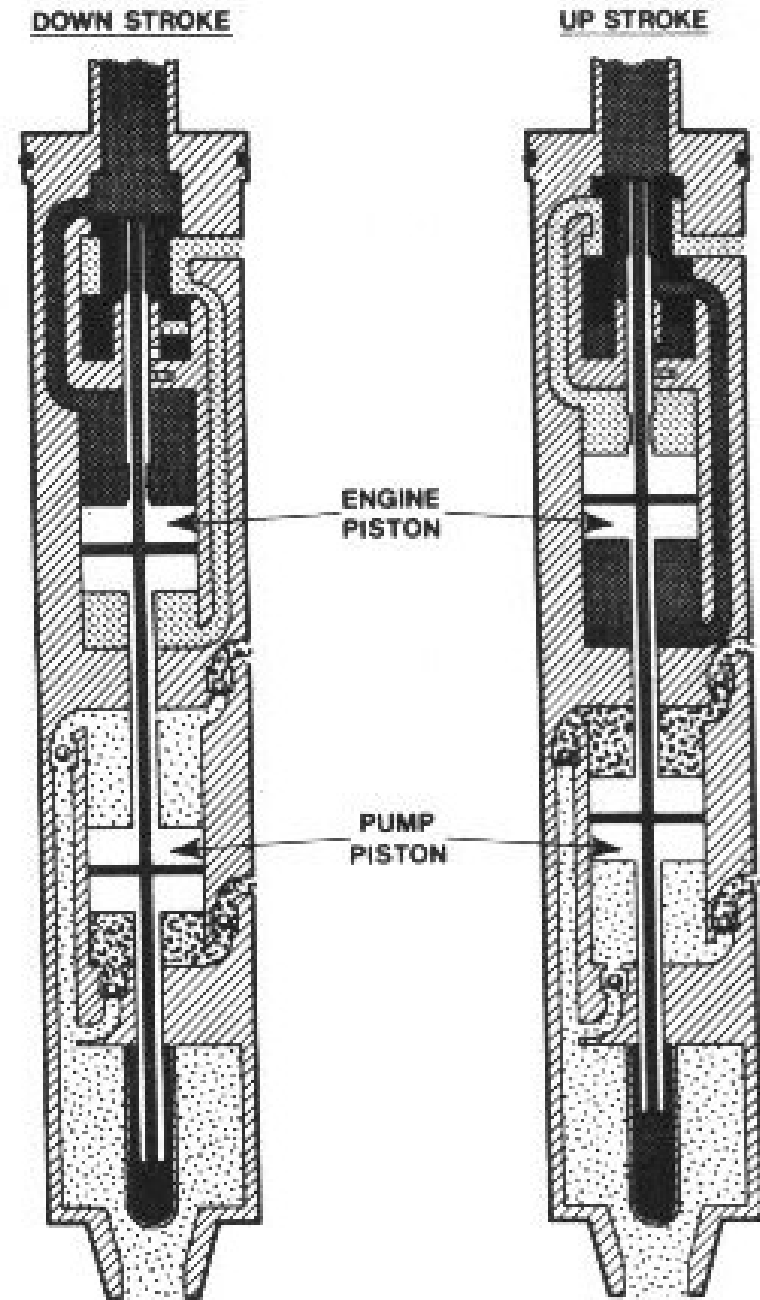


Fig. 5.7 Complete pump

# Ciklus ugradnje, rada i vađenja crpke

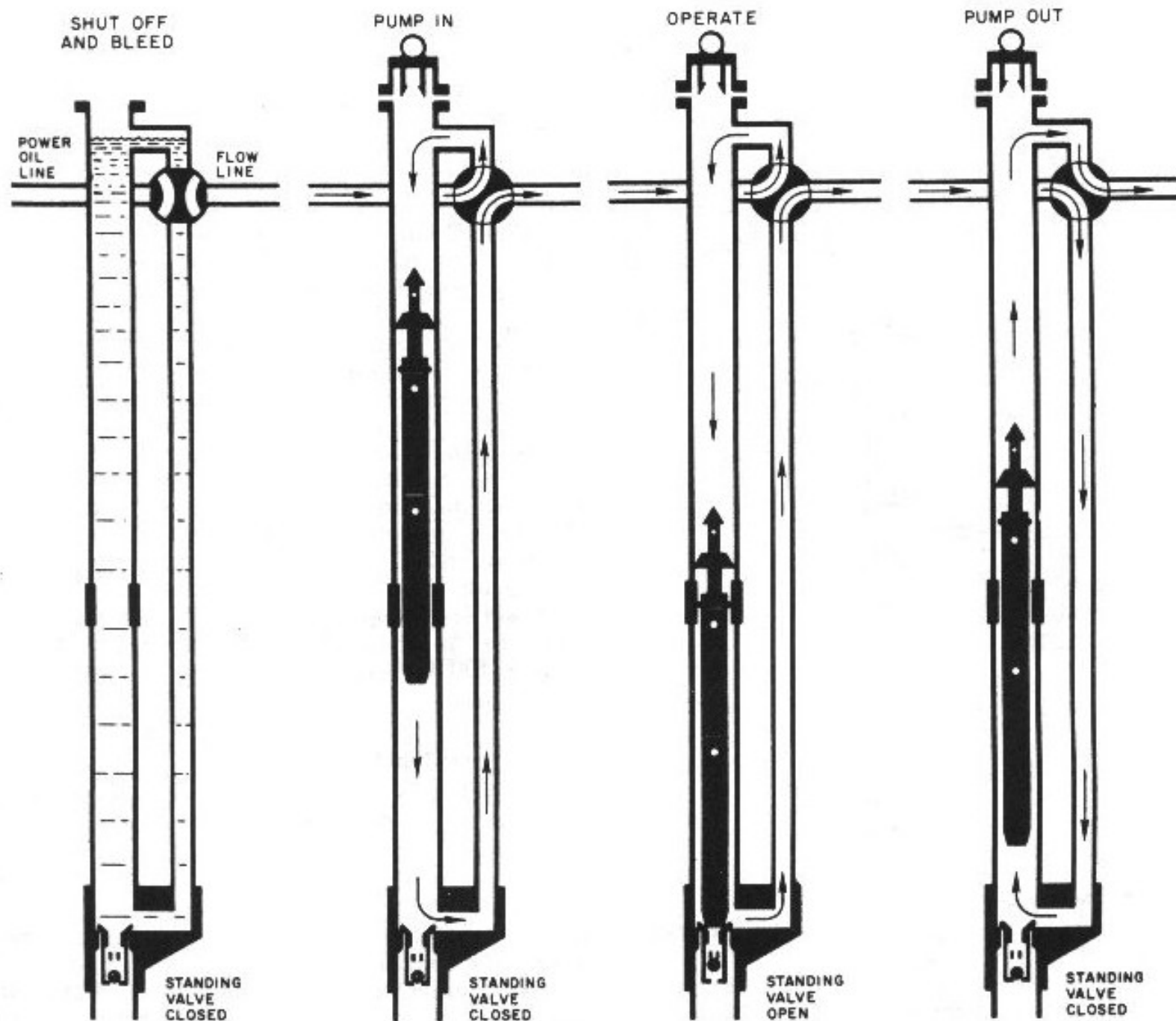
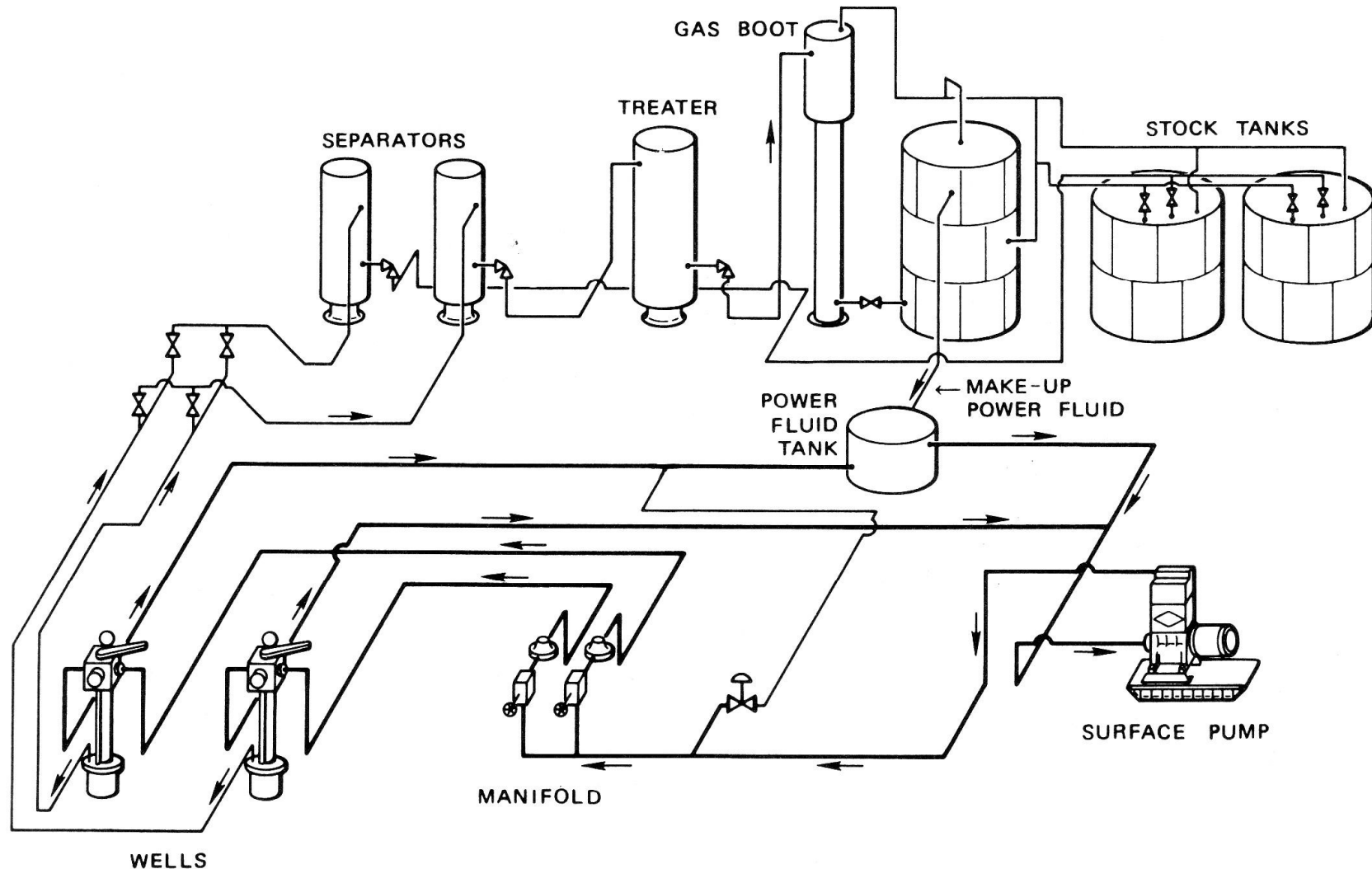


Fig. 5.8 Free pump illustration



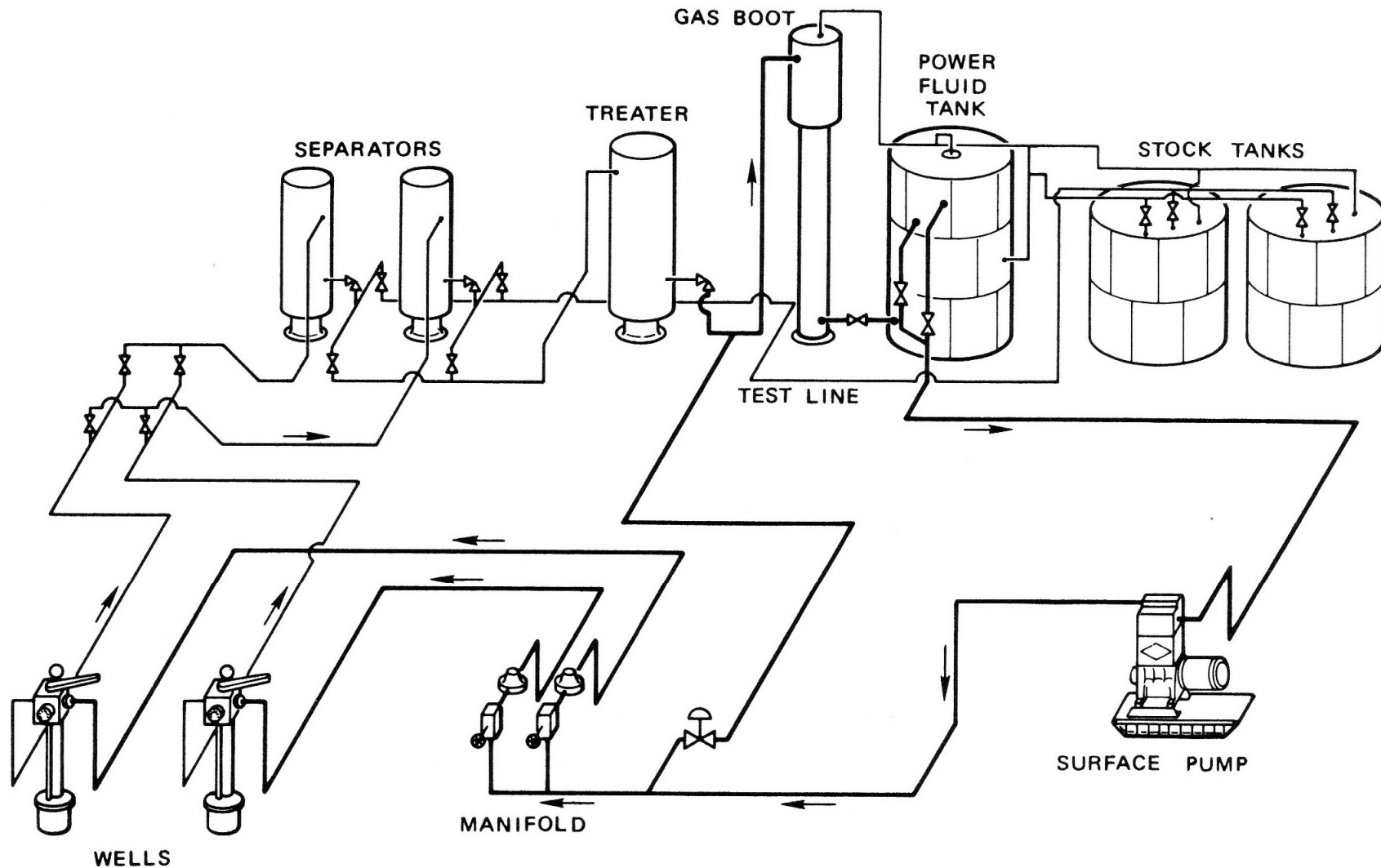
# Zatvoreni sustav pogonskog fluida

- Površinski i dubinski pogonski fluid stoji u zatvorenom krugu i ne miješa se s proizvodnim fluidom



# Otvoreni sustav pogonskog fluida

- Pogonski fluid se miješa s proizvodnim fluidom u bušotini i na površinu se vraća kao smjesa pogonskog i proizvodnog fluida



# Sustav tubinga

- Kad se crpku navrne na pogonski tubing (tj. tubing za dovod pogonskog fluida) i spusti u bušotinu na tom tubinguu, govorimo o tzv. **fiksiranoj crpki**.
- A kad crpka tijesno pristaje u pogonski tubing, te ju se optokom (cirkulacijom) pogonskog fluida može **slobodno** protisnuti do dna bušotine i natrag na površinu, govorimo o tzv. **slobodnoj crpki**.
- I u jednom i u drugom slučaju može se primijeniti i otvoreni i zatvoreni sustav pogonskog fluida.
- Stoga postoje brojne kombinacije i varijante ugradnje crpki u bušotinu, od kojih su neke prikazane na sljedećim slikama.

# Načini ugradnje crpke

- OPF – open power fluid: potrošeni pogonski fluid i bušotinski fluid se miješa
- CPF – closed power fluid: pogonski fluid u zatvorenom sustavu.

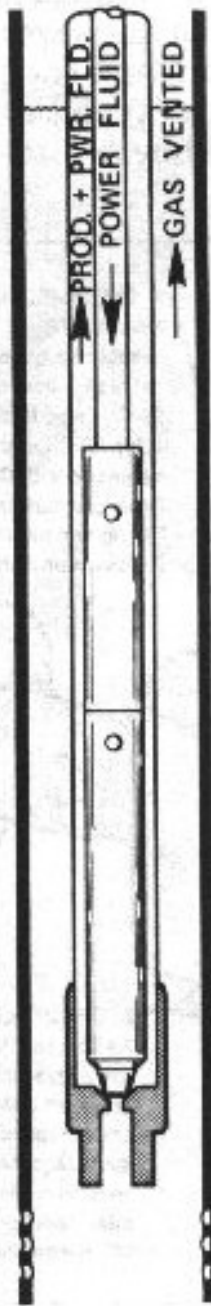


Fig. 5.29 Fixed insert tubing arrangement (OPF)

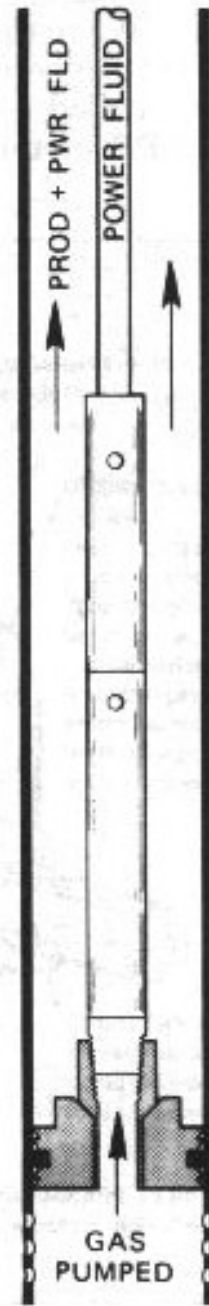


Fig. 5.30 Fixed casing tubing arrangement

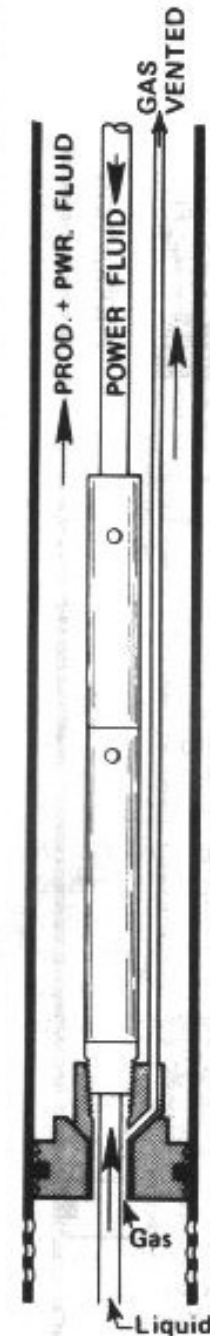


Fig. 5.31 Fixed casing with gas vent (OPF)

# Načini ugradnje crpke

- Parallel = hidraulički paralelno, tj. dvije crpke spojene u tandem da bi se udvostručilo protok.

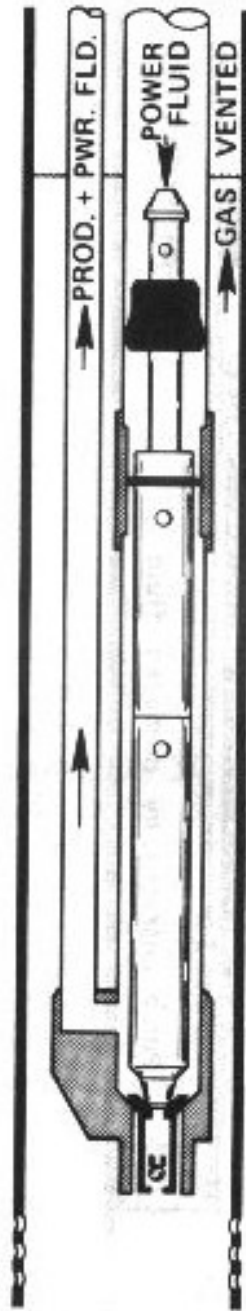


Fig. 5.32 Parallel free tubing arrangements

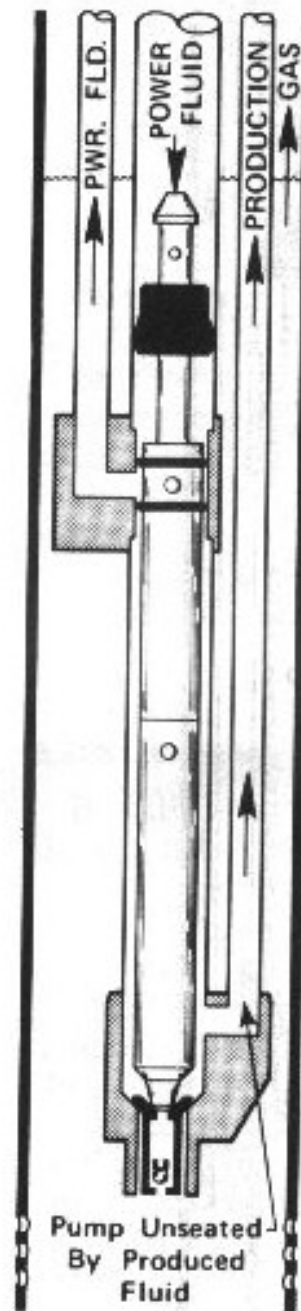


Fig. 5.33 Parallel free tubing arrangements

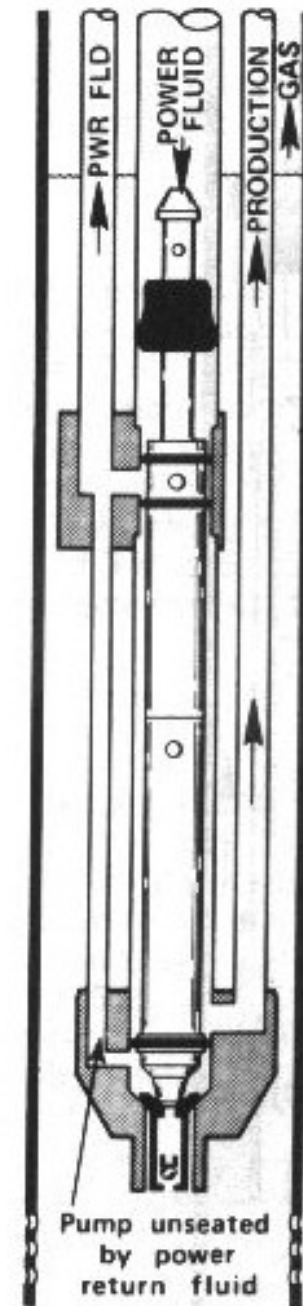


Fig. 5.34 Parallel free tubing arrangements



# Analiza rada sustava dubinskih hidrauličkih crpki

Pri projektiranju postrojenja dubinskih hidrauličkih crpki, potrebno je odlučiti o sljedećem:

- Primijeniti otvoreni ili zatvoreni sustav pogonskog fluida;
- Slobodni plin odvoditi mimo crpke ili ga crpiti zajedno s naftom;
- Odabrati sustav tubinga: fiksirana ili slobodna crpka;
- Odabrati crpku koja pristaje tubingu i udovoljava bušotinskim uvjetima;
- Odabrati površinsku utisnu crpku;
- Odabrati središnji ili pojedinačni sustav površinskog postrojenja;

U tu svrhu nužno je analizirati rad pojedinih dijelova sustava, kako je to ukratko učinjeno u nastavku.

# Izbor otvorenog ili zatvorenog sustava

- Ako je raspoloživi prostor ograničen, kao što je u slučaju gusto naseljenih lokacija ili na morskim platformama, ili ako to nalažu ekološki razlozi, treba odabrati zatvoreni sustav pogonskog fluida.
- Izborom vode kao pogonskog fluida smanjit će se opasnost od požara i onečišćenja okoline, no to će zahtijevati skuplje površinske crpke, te će znatno povisiti operativne troškove za kemijske dodatke koje je nužno dodavati vodi (podmazivači, inhibitori korozije, odstranjivači kisika).
- Ako ni jedan od nabrojanih čimbenika nije presudan, tada se može odabrati otvoreni sustav pogonskog fluida. Pritom je nafta, kao pogonski fluid, najprikladnija, budući se kemijski aditivi za vodu gube u otvorenom sustavu i nužno ih je kontinuirano dodavati.



# Odvajanje slobodnog plina

- Najjeftiniji sustav tubinga je onaj koji ne omogućuje odvajanje slobodnog plina, no on je nepoželjan u slučaju niskog dinamičkog tlaka i visokog plinskog faktora.
- Općenito, plin je nužno odvajati kad je plinski faktor iznad 100 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> i kad je dinamički tlak niži od 30 bara.
- Glede djelotvornosti crpke, poželjno je da ona ne bude niža od 50%, iako se minimalnom dopustivom vrijednošću smatra 30%. Stoga plin treba odvajati kad je to uvjet za postizanje djelotvornosti veće od spomenutih vrijednosti.
- Iako su hidrauličke crpke konstrukcijski zaštićene od plinske blokade, njihova djelotvornost je znatno veća ako se slobodni plin odvaja od nafte. Sljedećim dijagramom je dana teoretska obujamska djelotvornost crpke,  $\eta_t$ , tj. udio kapljevine u ukupnom obujmu kojeg istisne crpka, u funkciji usisnog tlaka crpke i plinskog faktora nafte.
- Ako, dakle, dijagram indicira nisku djelotvornost crpke (30-50%), nužno je plin odvajati.

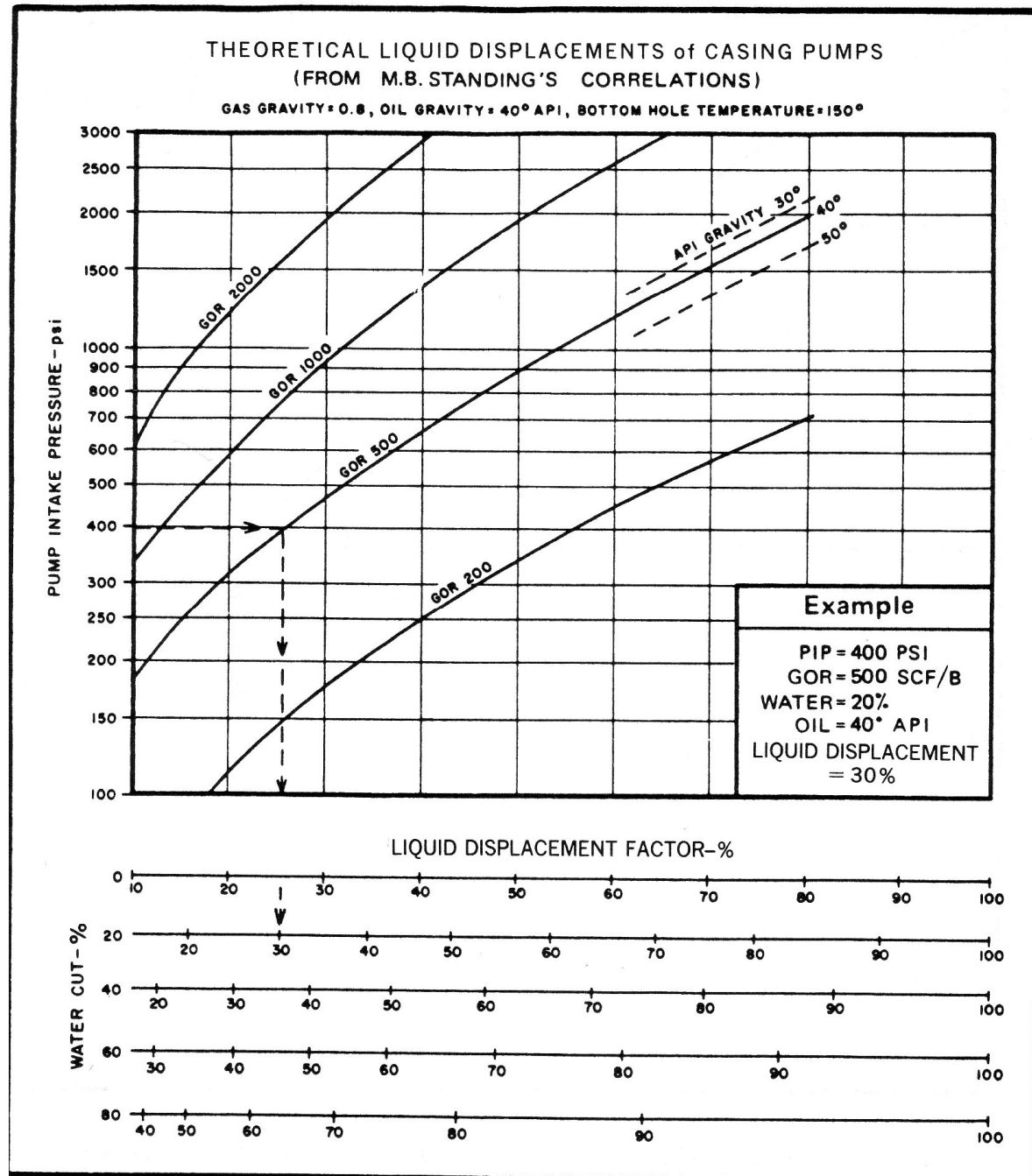


Fig. 5.43 Theoretical volumetric efficiencies of casing pumps

# Izbor modela hidrauličke crpke



## Specifikacija jednog modela crpke\*

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

# Protok pogonskog fluida

- Teoretski protok pogonskog fluida i teoretski protok proizvodnog fluida (proizvodnja) dani su kao

$$q'_1 = \left( \frac{q'_1}{N} \right) N \qquad q'_4 = \left( \frac{q'_4}{N} \right) N$$

gdje su:

$q'_1/N$  - jedinični protok motora očitani iz tablice specifikacije;

$q'_4/N$  - jedinični protok crpke očitani iz tablice specifikacije;

$N$  - broj hodova stapa motora, odnosno crpke.

- Stvarni protok pogonskog, odnosno proizvodnog fluida bit će

$$q_1 = \frac{q'_1}{\eta_1} = \left( \frac{q'_1}{N} \right) \frac{N}{\eta_1} \qquad q_4 = q'_4 \eta_4 = \left( \frac{q'_4}{N} \right) N \eta_4$$

gdje je  $\eta$  djelotvornost motora, odnosno crpke.

- Nova hidraulička crpka ima djelotvornost motora oko 0,95 (0,90), a djelotvornost crpke oko 0,90 (0,85). Ako se slobodni plin crpi zajedno s naftom, djelotvornost crpke  $\eta_4$ , treba supstituirati umnoškom  $\eta_4 \times \eta_t$
- Temeljem ovih vrijednosti, te očitanih jediničnih protoka za odabranu crpku, za zadanu dnevnu proizvodnju bušotine,  $q_4$ , iz gornjih jednažbi slijedi potrebni broj hodova crpke,  $N$ , odnosno potrebni protok pogonskog fluida,  $q_1$ .

# Shematski prikaz tlakova i hidrauličkih gubitaka u sustavu hidrauličkih crpki\*

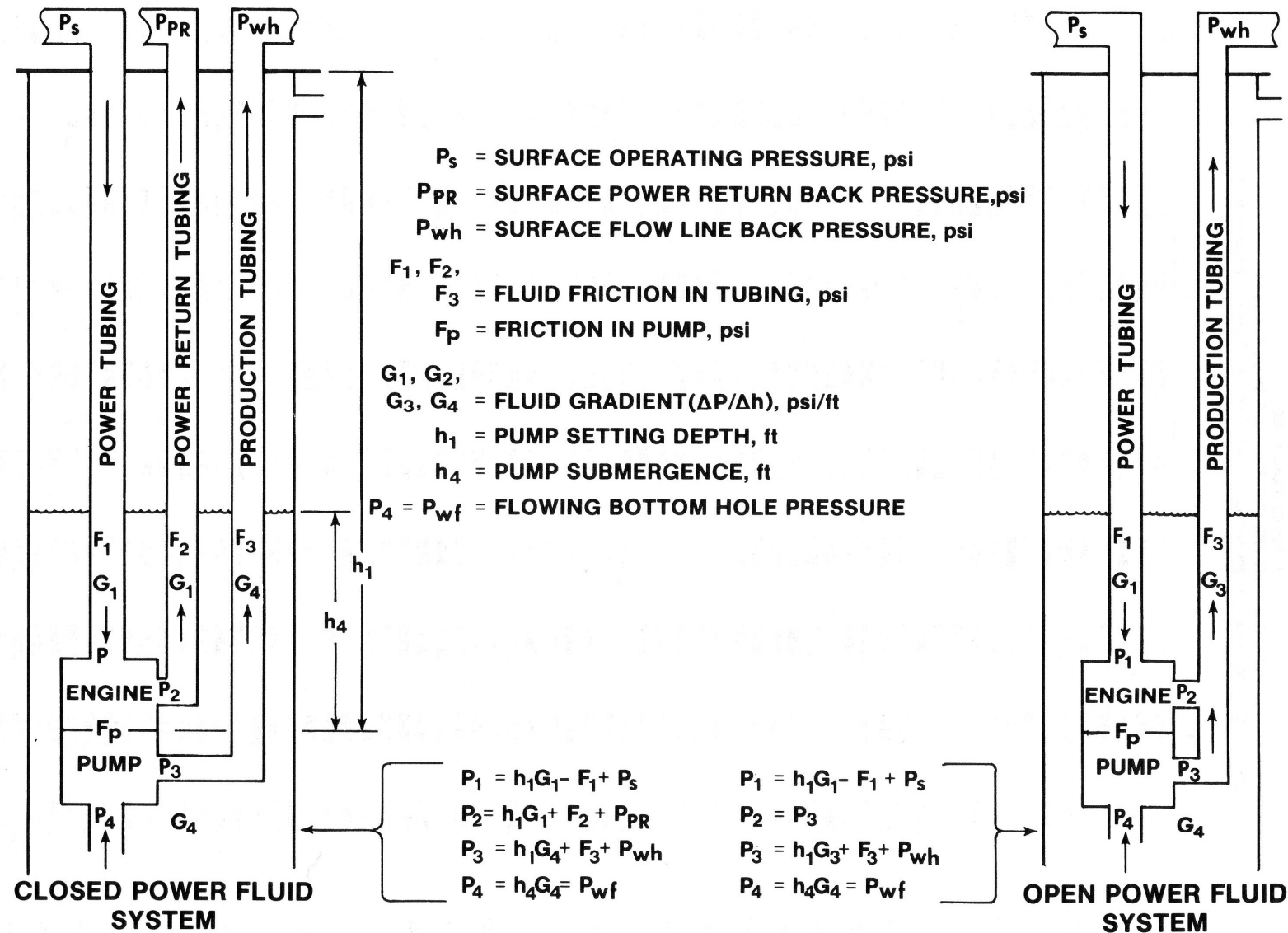


Fig. 5.48 Pressure & Friction losses affecting hydraulic pumps



# Površine na koje djeluju pojedini tlakovi u hidrauličkoj crpki

- Efektivna površina stapa motora, odnosno crpke, na koju djeluje pojedini tlak, jednaka je razlici površine stapa ( $A_E$ , odnosno  $A_P$ ) i površine poprječnog presjeka ojnice ( $A_R$ ).
- Slika ilustrira površine na koje djeluju pojedini tlakovi u slučaju prethodno opisane crpke.
- Iz slike slijedi ravnoteža sila pri hodu crpke prema gore:

$$-p_1 A_R - p_2 (A_E - A_R) + p_1 (A_E - A_R) - p_3 (A_P - A_R) + p_4 (A_P - A_R) + p_1 A_R = 0$$

odakle:

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

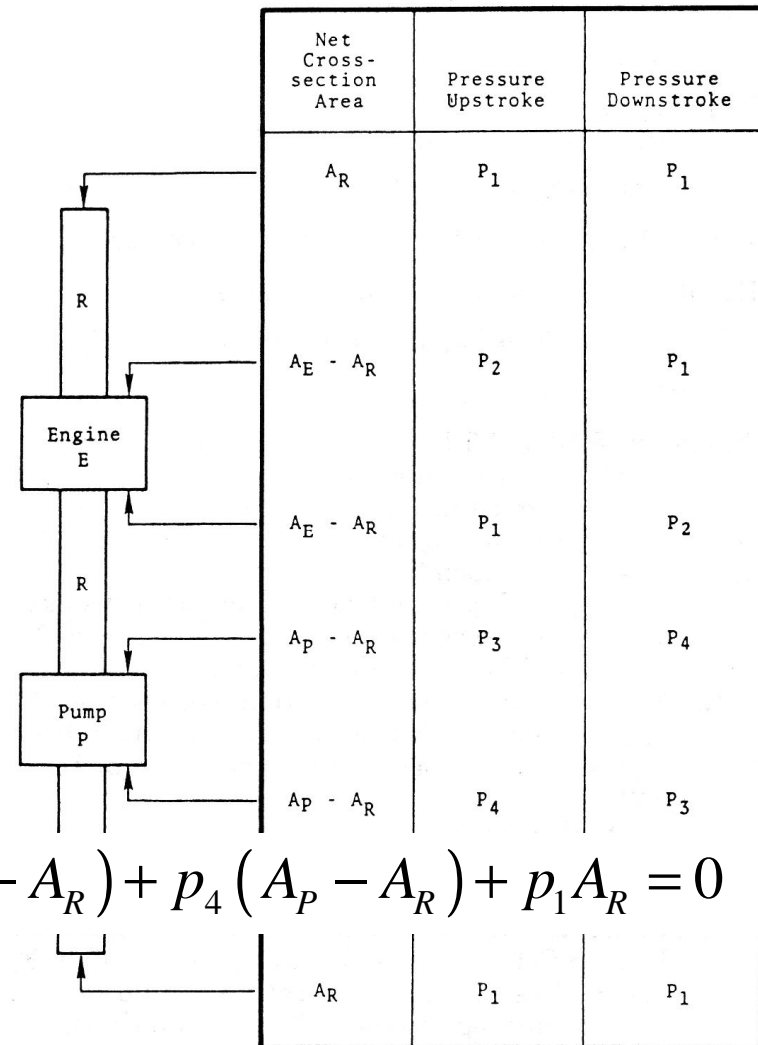


Fig. 5.49 Pressures acting on a Kobe type A pump

# “Omjer crpke i motora” ili “omjer P/E”.

- Izraz  $(A_P - A_R)/(A_E - A_R)$  je omjer efektivne površine crpke i efektivne površine motora, i za ovaj model crpke, on je isti i pri hodu gore i pri hodu dolje.
- Budući je ovo dvoradna crpka, ovaj 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”.
- Tablica specifikacije 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 prethodnu jednadžbu kako bismo dobili opću jednadžbu za sve hidrauličke crpke sa zatvorenim sustavom pogonskog fluida:

$$p_1 - p_2 - (p_3 - p_4) P/E - \Delta p = 0$$

gdje je dodan  $\Delta p$ , tj. gubitak tlaka neopterećene crpke.

# Utisni tlak na površini



- Supstitucijom izraza za  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  i  $p_4$  prethodna jednačba glasi:

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

pa je utisni tlak na površini, u zatvorenom sustavu pogonskog fluida:

$$p_s = \Delta p_{f1} + \Delta p_{f2} + p_{PR} + \left[ (h_1 - h_4) \rho_4 g + \Delta p_{f3} + p_{wh} \right] P/E + \Delta p$$

- U otvorenom sustavu pogonskog fluida je  $p_2 = p_3$ , pa opća jednačba za sve hidrauličke crpke s otvorenim sustavom pogonskog fluida glasi:  $p_1 = p_3 (1 + P/E) - p_4 P/E + \Delta p$
- Supstitucijom izraza za  $p_1$ ,  $p_3$  i  $p_4$  u gornju jednačbu dobivamo

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

odakle i utisni tlak na površini, u otvorenom sustavu pogonskog fluida:

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



# Hidraulički gubitci uslijed trenja pojedinog fluida u cijevima

- Gubitak tlaka uslijed trenja u cijevima moguće je odrediti temeljem Hagen-Poiseuilleovog zakona, tj.  $\Delta p_f = \frac{128\mu L_c q}{\pi D_c^4}$  pomoću jednadžbe:

gdje je  $L_c$  duljina cijevi, a  $D_c$  njezin unutarnji promjer.

- Jednadžba podrazumijeva laminarno (strujno) protjecanje, karakterizirano Reynoldsovim brojem manjim od 2320, tj.  $Re = \frac{vD_c\rho}{\mu} \leq 2320$

- No, za prijelazno ( $2320 < Re < 3000$ ) ili turbulentno (vrtložno) protjecanje ( $Re > 3000$ ), treba koristiti Darcy-Weissbachovu jednadžbu

$$h_w = f \frac{L_c}{D_c} \frac{v^2}{2g};$$

- Ovdje je  $f$  koeficijent trenja, a on je funkcija Reynoldsovog broja. Za laminarno protjecanje, koeficijent trenja je jednak

$$\Delta p_f = f \frac{L_c}{D_c} \frac{v^2 \rho}{2}$$

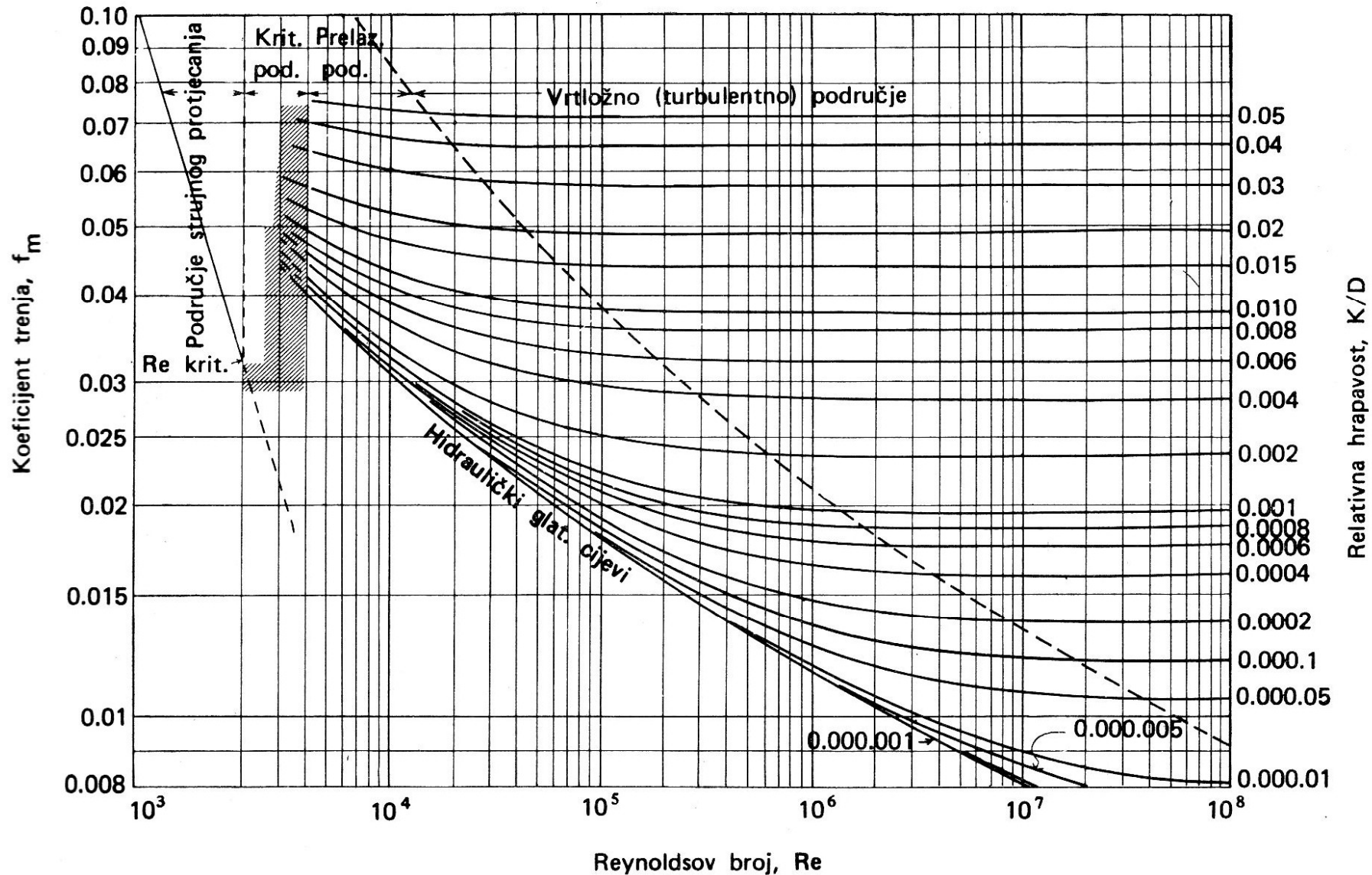
$$f = \frac{64}{Re}$$

- Za turbulentno (vrtložno) protjecanje, koeficijent trenja se može aproksimirati Blasiusovom jednadžbom

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

budući Reynoldsov broj, u praksi, rijetko prelazi vrijednost  $5 \times 10^4$ . (Altern. Moodyjev dijagram.)

# Moodyjev dijagram



Slika 2.1. — Dijagram ovisnosti koeficijenta trenja o Reynoldsovom broju  $Re$  i relativnoj hrapavosti ( $K/D$ )

# Postupak proračuna sustava

1. Određivanje potrebnog dinamičkog tlaka na razini ležišta za zadanu dnevnu proizvodnju, temeljem poznatog indeksa proizvodnosti, odnosno IPR krivulje.
2. Odabir otvorenog ili zatvorenog sustava pogonskog fluida, te odluka da li slobodni plin odvoditi mimo crpke ili ga crpiti zajedno s naftom. Gdje god je to moguće, treba odabrati najekonomičniji i najčešći sustav, tj. slobodnu crpku s otvorenim sustavom pogonskog fluida. No, konačna odluka slijedi nakon određivanja teoretske obujamske djelotvornosti crpke
3. Određivanje teoretskog protoka crpke, koji će ostvariti zadanu (stvarnu) dnevnu proizvodnju, što znači protoka uvećanog na račun smanjene djelotvornosti crpke.
4. Odabir crpke koja pristaje dimenzijama tubinga i zaštitnih cijevi, a može ostvariti izračunati teoretski protok.
5. Određivanje potrebnog broja hodova crpke, te potrebnog protoka pogonskog fluida.
6. Proračun tlaka
7. Odabir odgovarajuće površinske utisne crpke.

# Primjer proračuna

Dinamički tlak na ušću bušotine, $p_{wh}$	7 bara
Srednji ležišni tlak, $p_{sr}$	106 bar
Ležišna temperatura, $T$	80 °C
Potrebna proizvodnja, $q_L$	68 m <sup>3</sup> /d
Indeks proizvodnosti, $J$	2,3 m <sup>3</sup> /d/bar
Gustoća nafte, $\rho_o$	870 kg/m <sup>3</sup>
Proizvodni plinski faktor, $GOR$	62 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Udio vode u proizvodnom fluidu, $f_w$	0,25
Gustoća vode, $\rho_w$	1070 kg/m <sup>3</sup>
Dubina sredine perforacija, $H_p$	2134 m
Vanjski / unutarnji promjer tubinga, $D_t / d_t$	60,325 / 50,8 mm
Vanjski / unutarnji promjer zaštitnih cijevi, $D_c / d_c$	139,7 / 127 mm

# Proračun

Određivanje dinamičkog tlaka na razini ležišta:

- Temeljem poznatog indeksa proizvodnosti, te poznatog srednjeg ležišnog tlaka, za zadanu proizvodnju dinamički tlak na razini ležišta je

$$p_{wf} = \bar{p} - \frac{q_L}{J} = 106 - \frac{68}{2.3} = 76,44 \text{ bara}$$

- Pošto će crpka biti ugrađena neposredno iznad perforacija, izračunati dinamički tlak na razini ležišta je istodobno i dinamički tlak na razini usisa crpke, tj.  $p_4 \approx p_{wf}$

Odabir sustava pogonskog fluida:

- Kao prvi izbor, odabiremo slobodnu crpku s otvorenim sustavom pogonskog fluida, te naftu kao pogonski fluid. Prema dijagramu, za usisni tlak od 76 bara, te GOR=62 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> i udio vode od 25%, teoretska obujamska djelotvornosti crpke,  $\eta_t$ , iznosi 0,8 (80% > 50%).
- Dakle, slobodni plin nije nužno odvajati već se može crpiti zajedno s naftom, što znači da je izbor slobodne crpke s otvorenim sustavom pogonskog fluida, bez odvođenja slobodnog plina, prihvatljiv.

Određivanje potrebnog teoretskog protoka crpke:

- Sukladno općim načelima, odabiremo obujamske djelotvornosti motora i crpke, tj.  $\eta_1=0.90$  i  $\eta_4=0,85$ . Budući je djelotvornost crpke još umanjena i na račun crpljenja plina zajedno s naftom, ukupna djelotvornost crpke je jednaka umnošku teoretske i obujamske djelotvornosti. Stoga će potrebni teoretski protok crpke biti

$$q_4' = \frac{q_L}{\eta_t \eta_4} = \frac{68}{0,8 \times 0,85} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$$



# Odabir crpke

- Prema specifikaciji hidrauličke crpke danoj u Tablici 1, zadanim dimenzijama tubinga pristaju prve tri crpke koje iza oznake "VFR" imaju brojku "20". Ta brojka označava nominalni promjer crpke od 2,0 in., a on pristaje zadanom unutarnjem promjeru tubinga od 50,8 mm (2,0 in.).
- Međutim, samo crpka s oznakom VFR201616 može ostvariti izračunati teoretski protok, pa ju odabiremo i iz tablice očitavamo njene karakteristike:

- omjer crpke i motora:  $P/E=1,32$ ;
- teoretski protok crpke pri maksimalnom broju hodova:  $q_4' = 107 \text{ m}^3/\text{d}$ ;
- jedinični protok motora:  $q_1'/N = 0,674 \text{ m}^3/\text{d}/\text{min}^{-1}$ ;
- jedinični protok crpke:  $q_4'/N = 0,713 \text{ m}^3/\text{d}/\text{min}^{-1}$ ;
- maksimalni broj hodova:  $N = 150 \text{ min}^{-1}$ .



- Prije konačnog izbora, nužno je provjeriti udovoljava li odabrana crpka općem pravilu danom jednačbom  $P/E \leq 3000 \text{ m}/\text{neto visina podizanja}$ . Kako je "neto visina podizanja" ekvivalentna razlici tlaka što je ostvari crpka, ovu provjeru ćemo učiniti nakon proračuna tlaka.

Određivanje potrebnog broja hodova i potrebnog protoka pogonskog fluida:

- Potrebni broj hodova crpke

$$N = \frac{q_4'}{(q_4'/N)} = \frac{100}{0,713} = 140 \text{ min}^{-1}$$

- a stvarno potrebni protok pogonskog fluida je

$$q_1 = \left( \frac{q_1'}{N} \right) \frac{N}{\eta_1} = 0,674 \times \frac{140}{0,9} = 105 \text{ m}^3/\text{d}$$

# Proračun tlaka

Za otvoreni sustav pogonskog fluida, utisni tlak na površini može se izračunati prema danoj jednadžbi. No, prethodno je potrebno definirati još neke ulazne parametre, kao što su obujamske gustoće pojedinih fluida i hidraulički gubitci.

- Pošto je za pogonski fluid odabrana nafta, obujamska gustoća pogonskog fluida jednaka je obujamskoj gustoći nafte

$$\rho_1 = \rho_o = 870 \text{ kg/m}^3$$

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

$$q_3 = q_1 + q_4 = q_1 + q_L = 105 + 68 = 173 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Pošto je udio vode u proizvodnom fluidu 25%, u smjesi će on iznositi

$$f_{w3} = \frac{q_L f_w}{q_3} = \frac{68 \times 0,25}{173} = 0,10$$

- pa će gustoća povratnog fluida, zanemarujući plin, biti

$$\rho_3 = \rho_o (1 - f_{w3}) + \rho_w f_{w3} = 870 \times (1 - 0,1) + 1070 \times 0,1 = 890 \text{ kg/m}^3$$

# Proračun tlaka

Hidrauličke gubitke u tubingu i prstenastom prostoru odredit ćemo prema danim jednadžbama, s tim da prethodno odredimo viskoznost pojedinih fluida temeljem neke od publiciranih korelacija. Prema jednoj od korelacija, otplinjena nafta gustoće  $870 \text{ kg/m}^3$ , pri temperaturi od  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  (srednja temperatura u bušotini), ima viskoznost  $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Dakle, viskoznost pogonskog fluida je  $\mu_1 = 7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

U povratnom fluidu, uz naftu i vodu ima i plina, i to u količini

$$GLR = \frac{q_L (1 - f_w) \times GOR}{q_3} = \frac{68 \times (1 - 0,25) \times 62}{173} = 18 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

- pa ako je on sav otopljen u nafti, viskoznost nafte iznosi  $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Dakle, zanemarimo li vodu, viskoznost povratnog fluida možemo aproksimirati kao  $\mu_3 = 4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Temeljem poznatih ulaznih parametara, postupak računanja gubitka tlaka u tubingu pri protjecanju pogonskog fluida je sljedeći:

- brzina protjecanja:  $v_1 = \frac{4q_1}{d_t^2 \pi} = \frac{4 \times 105 / 86400}{(50,8 \times 10^{-3})^2 \pi} = 0,5996 \text{ m/s}$

- Reynoldsov broj:  $Re_1 = \frac{v_1 d_t \rho_1}{\mu_1} = \frac{0,5996 \times 50,8 \times 10^{-3} \times 870}{7 \times 10^{-3}} = 3786$

- koeficijent trenja :  $f_1 = \frac{0,3164}{Re_1^{0,25}} = \frac{0,3164}{3786^{0,25}} = 0,04$

- gubitak tlaka :  $\Delta p_{f1} = f_1 \frac{h_1}{d_t} \frac{v_1^2 \rho_1}{2} = 0,04 \frac{2134}{50,8 \times 10^{-3}} \frac{0,6^2 \times 870}{2} = 263137 \text{ Pa} = 2,63 \text{ bar}$



# Proračun tlaka

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

➤ brzina protjecanja:  $v_3 = \frac{4q_3}{(d_c^2 - D_t^2)\pi} = \frac{4 \times 173 / 86400}{\left[ (127 \times 10^{-3})^2 - (60,325 \times 10^{-3})^2 \right] \pi} = 0,204 \text{ m/s}$

➤ Reynoldsov broj:  $Re_3 = \frac{v_3 (d_c - D_t) \rho_3}{\mu_3} = \frac{0,204 \times (127 - 60,325) \times 10^{-3} \times 890}{4 \times 10^{-3}} = 3028$

➤ koeficijent trenja:  $f_3 = \frac{0,3164}{Re_3^{0,25}} = \frac{0,3164}{3028^{0,25}} = 0,043$

➤ gubitak tlaka:  $\Delta p_{f3} = \frac{f_3 h_1}{(d_c - D_t)} \frac{v_3^2 \rho_3}{2} = \frac{0,043 \times 2134}{(127 - 60,325) \times 10^{-3}} \frac{0,2^2 \times 890}{2} = 24497 \text{ Pa} = 0,25 \text{ bar}$

➤ Gubitak tlaka zbog trenja u crpki, očitano iz dijagrama proizvođača konkretne crpke, iznosi  $\Delta p = 35 \text{ bara}$

➤ Dakle, utisni tlak na površini jednak je

$$p_s = (890 \times 9,81 \times 2134 \times 10^{-5} + 0,25 + 7)(1 + 1,32) - 76,44 \times 1,32 - 870 \times 9,81 \times 2134 \times 10^{-5} + 2,63 + 35 = 203,68 \text{ bara}$$

# Proračun tlaka

- Sad je moguće provjeriti udovoljava li odabrana crpka općem pravilu. "Neto visina podizanja" ekvivalentna je razlici tlaka što je ostvari crpka, tj.  $L_{net} \propto p_3 - p_4$

- Supstitucijom izraza za  $p_3$  i  $p_4$ , slijedi

$$L_{net} \propto \rho_3 g h_1 + \Delta p_{f3} + p_{wh} - p_{wf}$$

- odnosno 
$$L_{net} = h_1 - \frac{p_{wf} - p_{wh} - \Delta p_{f3}}{\rho_3 g} = 2134 - \frac{76,44 - 7 - 0,25}{890 \times 9,81} \times 10^5 = 1342 \text{ m}$$

- pa maksimalni omjer P/E iznosi

$$(P/E)_{\max} = \frac{3000}{L_{net}} = \frac{3000}{1342} = 2,24$$

- Dakle, omjer P/E odabrane crpke je manji od maksimalno prihvatljivog P/E, čime je potvrđen izbor crpke s oznakom VFR201616.

# Odabir površinske utisne crpke

- Prema katalogu proizvođača, odabiremo trorednu (trocilindričnu) crpku, koja može ostvariti protok pogonskog fluida  $q_1 = 105 \text{ m}^3/\text{d}$
- pri tlaku  $p_s = 203,68 \text{ bara}$
- Najbliža tom uvjetu je crpka J-60-H, s promjerom stapa 35 mm, čije su karakteristike slijedeće:
- maksimalni radni tlak: 220 bar;
- protok pri 350 okretaja u minuti:  $110 \text{ m}^3/\text{d}$ .
- Potrebna hidraulička snaga utisne crpke jednaka je

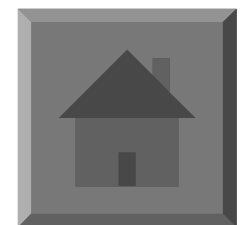
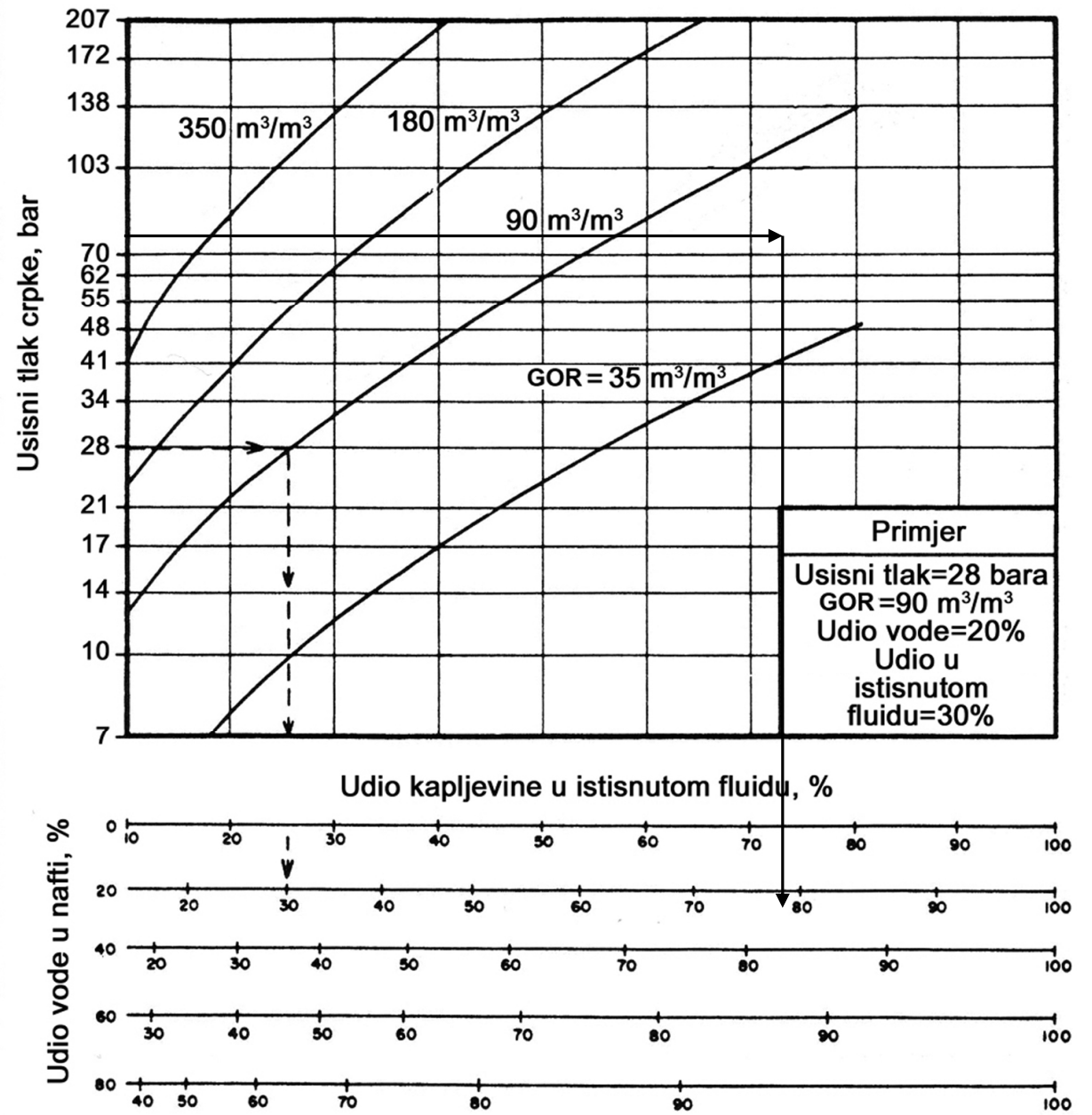
$$P_h = q_1 p_s = \frac{105}{86400} \times 203,68 \times 10^5 = 24753 \text{ W} = 24,75 \text{ kW}$$

- Pretpostavimo li mehaničku djelotvornost od 90%, potrebna snaga elektromotora za pogon površinske utisne crpke je  $P_e = \frac{P_h}{\eta_e} = \frac{24,75}{0,9} = 27,5 \text{ kW}$
- Za usporedbu, koristan rad koji će obaviti dubinska hidraulička crpka, time što će povisiti dinamički tlak proizvodnog fluida s  $p_{wf}$  na  $p_3$ , odnosno ostvariti "neto visinu podizanja",  $L_{net}$ , pri protoku  $q_4 = q_L$ , jednak je

$$P = (p_3 - p_{wf}) q_4 = L_{net} \rho_3 g q_4 = 1342 \times 890 \times 9,81 \times 68 / 86400 = 9222 \text{ W} = 9,22 \text{ kW}$$

Dakle, ukupna djelotvornost sustava je

$$\eta = \frac{P}{P_e} = \frac{9,22}{27,5} = 0,34$$



# Napomene uz pojedine 'slajdove':

- **str. br. 18:** \*Oznaka crpke obično je koncipirana tako da, izravno ili neizravno, daje njene glavne dimenzije. Tako npr. u oznaci „VFR252015” prve dvije brojke („25”) označavaju nominalni promjer crpke, koji je u ovom slučaju 2,5 in., odnosno 63,5 mm. Time je ujedno određen i nominalni promjer tubinga u koji dotična crpka pristaje: 73 mm (2 7/8 in.) s unutarnjim promjerom 63,5 mm (2,5 ili 2 1/2 in.). Sljedeće dvije brojke („20”) označavaju promjer stapa motora (2,0 in.=50,8 mm), a posljednje dvije („15”) promjer stapa crpke (1,5 in.=38,1 mm). Omjer P/E bit će detaljno objašnjen kasnije, a u svezi je s tlakom površinskog sustava, potrebnim za određenu visinu podizanja fluida u bušotini. Treći stupac u tablici specifikacije crpke daje maksimalni obujamski protok crpke, tj. protok pri maksimalnom broju hodova. U četvrtom i petom stupcu tablice specifikacije su vrijednosti jediničnog protoka motora i crpke, tj. protoka po jednom hodu stapa u minuti, temeljem kojih se određuje protok pogonskog fluida.
- **str. br. 20:** \*Ukupan raspoloživi tlak za pogon motora označen je kao  $p_1$ , dok je ukupan tlak na izlazu (ispuhu) motora  $p_2$ . Tlak na izlazu iz crpke je  $p_3$ , dok je usisni tlak crpke  $p_4$ .