

Izračun kapaciteta dubinskih sisaljki odabirom optimalne stvarne duljine hoda klipa

Čičmir, Jakov

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:177704>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**IZRAČUN KAPACITETA DUBINSKIH SISALJKI ODABIROM OPTIMALNE
STVARNE DULJINE HODA KLIPA**

Završni rad

Jakov Čičmir

N4247

Zagreb, 2020.

IZRAČUN KAPACITETA DUBINSKIH SISALJKI ODABIROM OPTIMALNE
STVARNE DULJINE HODA KLIPA

JAKOV ČIČMIR

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Korištenje dubinske sisaljke s klipnim šipkama je najčešće korištena metoda mehaničkog podizanja kapljevine. To je ujedno i najpraktičnija metoda umjetnog podizanja kapljevine jer postoje razne kombinacije opreme kojima se može postići veliki raspon dnevne proizvodnje kapljevine ovisno o indeksu proizvodnosti odnosno davanju bušotine. Tema ovog završnog rada je analizirati glavne faktore potrebne za izračun dnevne proizvodnje kapljevine te na primjeru proračuna, s realnim podacima, izabrati najbolje parametre za optimalni rad dubinske sisaljke.

Ključne riječi: kapacitet dubinske sisaljke s klipnim šipkama, broj hodova, stvarna duljina hoda klipa

Završni rad sadrži: 27 stranica, 4 slike, 2 tablice i 5 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF
Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF

Datum obrane: 10.7.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	I
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....	II
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O DUBINSKIM SISALJKAMA	2
2.1. Određivanje optimalnog broja hodova u minuti.....	6
2.2. Određivanje stvarne duljine hoda klipa	8
2.3. Utvrđivanje količine podizanja kapljevine	13
3. PRORAČUN KAPACITETA DUBINSKE SISALJKE	16
4. ZAKLJUČAK	25
5. LITERATURA	27

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Faze crpljenja kapljevine	3
Slika 2-2. Shematski prikaz nadzemne i podzemne opreme proizvodne bušotine opremljene dubinskom sisaljkom s klipnim šipkama.....	5
Slika 2-3. Dijagram za određivanje optimalnog broja hodova u minuti za čelični niz klipnih šipki	7
Slika 3-1. Odabir optimalnog broja hodova u minuti za dubinu ugradnje sisaljke od 1500 m	18

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Podatci o bušotini potrebni za proračun.....	16
Tablica 3-2. Promjeri „Axelson“ sisaljki	17

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A_p – površina poprečnog presjeka klipa, m^2

A_r – površina poprečnog presjeka klipnih šipki, m^2

A_t – površina poprečnog presjeka tubinga, m^2

B_g – volumetrijski faktor plina, m^3/m^3

d_p – promjer klipa, m

d_r – promjer klipnih šipki, m

E – modul elastičnosti čelika, Pa

e_p – produljenje duljine hoda klipa, m

e_r – istežanje klipnih šipki, m

e_t – istežanje tubinga, m

F – faktor ubrzanja pri kretanju klipnih šipki prema gore

f – omjer tražene i izračunate proizvodnje

g – ubrzanje sile teže, m/s^2

L_p – dubina ugradnje klipa, m

L_r – duljina klipnih šipki, m

L_t – duljina tubinga, m

N – broj hodova u minuti, min^{-1}

Q_0 – tražena (očekivana) proizvodnja kapljevine, m^3/d

Q_p – stvarna proizvodnja kapljevine, m^3/d

Q_t – teoretska proizvodnja kapljevine, m^3/d

R_p – proizvodni plinski faktor, m^3/m^3

R_s – faktor otopljenog plina, m^3/m^3

S – duljina hoda glatke šipke, m

S_p – stvarna duljina hoda klipa, m

V_c – obujam cilindra, m³

V_g – obujam plina koji ulazi u sisaljku, m³

V_{gps} – obujam plina koji se izdvoji u plinskom sidru, m³

V_{gsp} – obujam slobodnog plina iz ležišta, m³

W_f – opterećenje fluida, N

W_r – težina klipnih šipki, N

η_{sid} – volumetrijski koeficijent korisnog učinka plinskog sidra

η_v – koeficijent korisnog učinka sisaljke

ρ_f – gustoća fluida u tubingu, kg/m³

ρ_r – gustoća čelika, kg/m³

1. UVOD

Mehaničke metode podizanja kapljevine se primjenjuju kada ležišna energija nije dovoljna za eruptivni rad i za savladavanje otpora protjecanju kroz uzlazni niz.

Eruptivni rad bušotine sastoji se od (Brkić, 2018):

- a) pritjecanje fluida iz ležišta u bušotinu zbog ostvarene depresije na sloj;
- b) protjecanje smjese plina i kapljevine u proizvodnom uzlaznom nizu cijevi i
- c) protjecanje u priključnom naftovodu.

Kada se otpori protjecanju tj. padovi tlaka ne mogu prirodno savladati energijom ležišta točnije ležišnim tlakom, tada se pristupa korištenju mehaničkih metoda podizanja kapljevine. Postoje dvije vrste mehaničkih metoda podizanja kapljevine.

To su:

- plinsko podizanje (plinski ili gas lift) i
- proizvodnja različitim vrstama dubinskih sisaljki (crpki).

Određivanje optimalne proizvodnje bitno je pri proračunu odabira cjelokupne proizvodne opreme koja će se koristiti tijekom životnog vijeka bušotine. To znači da se u obzir uzima oprema koja se koristi za eruptivnu proizvodnju bušotine, ali i ona oprema koja će biti korištena za mehaničko podizanje kapljevine, kako bi se ravnomjerno i što ekonomičnije iscrpilo ležište.

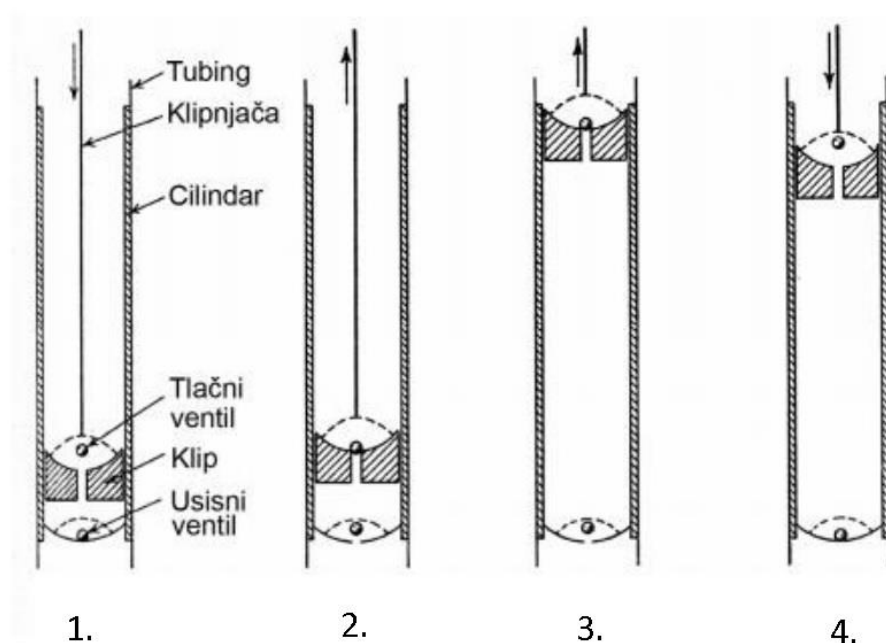
Najstarija i najčešće korištena mehanička metoda podizanja kapljevine je korištenje dubinskih sisaljki s klipnim šipkama (Brkić, 2018). Njihov izbor ovisi o izdašnosti ležišta (indeksu proizvodnosti). Ovaj završni rad obrađuje na koji način optimalno izabrati kapacitet sisaljke s obzirom na broj hodova glatke šipke i stvarne duljine hoda klipa što će biti i pokazano na primjeru jedne proizvodne bušotine.

To je važno radi pravilnog odabira dimenzije sisaljke kako bi se ležište što optimalnije crpilo i kako bi se smanjio broj zamjene opreme remontnim radovima. Cilj je, ako je moguće, volumen fluida koji utječe u kanal bušotine pridobiti na površinu u jednom ciklusu.

2. OPĆENITO O DUBINSKIM SISALJKAMA

Korištenje dubinske sisaljke spada u mehaničke metode pridobivanja nafte. Dubinska sisaljka se ugrađuje na onoj dubini na kojoj će ostati uronjena u kapljevину kroz cijelo vrijeme crpljenja (znači i na kraju ciklusa). Dubinska sisaljka sastoji se od cilindra u kojem se kreće klip. Uz klip i cilindar, obavezna su i dva ventila koja naizmjeničnim otvaranjem i zatvaranjem osiguravaju protok kapljevine kroz proizvodni niz (engl. *tubing*), sve do ušća bušotine. To su usisni i tlačni ventil. Usisni ventil se nalazi na donjem dijelu cilindra, a tlačni na klipu. Klip u cilindru se pomiče samo po vertikalnoj putanji gore-dolje i time svakim pokretom prema gore podiže stupac kapljevine, koji se nalazi iznad klipa, za onoliki volumen koji odgovara radnom volumenu cilindra. Kretanje klipa u cilindru se događa ciklički (slika 2-1.) u 4 faze; prva (1.) faza je kada se klip nalazi neposredno iznad usisnog ventila, točnije u najdonjem položaju. Usisni ventil je zatvoren zbog tlaka kojim klip na njega djeluje preko kapljevine, koja se nalazi u prostoru između tlačnog ventila na klipu i usisnog ventila na cilindru, u hodu prema dolje (klip je još uvijek u infinitezimalnom hodu prema dolje i otvoren je tlačni ventil na klipu). U toj fazi cijeli radni volumen cilindra je ispunjen kapljevinom. Kada klip dođe u najdonji položaj zaustavi se (brzina kretanja je jednaka nuli) na infinitezimalno vrijeme. Zbog jednostavnosti uzet će se pretpostavka da kuglica, koja svojim položajem utječe na otvorenost tlačnog ventila, odmah u trenutku zaustavljanja upada u svoj ležaj i time zatvara tlačni ventil, međutim, to u realnim situacijama nije tako zbog sile uzgona. Nakon zaustavljanja, klip započinje kretanje prema gore i započinje druga (2.) faza. Tlačni ventil je zatvoren i time ne dozvoljava kapljevini koja se nalazi iznad njega da prolazi kroz njega. Usisni ventil, koji se nalazi na cilindru, se zbog razlike tlakova otvara, točnije kapljevina koja se nalazi ispod usisnog ventila vrši tlak na usisni ventil koji je dovoljan za njegovo otvaranje, tj. kuglica usisnog ventila se podiže iz svog ležaja i kapljevina počinje popunjavati prostor između klipa i usisnog ventila, koji postaje sve veći, sve dok je smjer kretanja klipa prema gore. Kada klip dođe u najgornji položaj, na površini Zemlje je pridobiven jedan obrok kapljevine zahvaljujući jednom hodu prema gore. Trenutak kada se klip nalazi zaustavljen u najgornjem položaju je treća (3.) faza. U najgornjem položaju klip se također zaustavlja na infinitezimalno vrijeme.

Opet, zbog jednostavnosti, će se uzeti pretpostavka da kuglica usisnog ventila momentalno upada u svoj ležaj u trenutku kada se klip zaustavi u gornjem položaju. Nakon zaustavljanja klipa u najgornjem položaju započinje četvrta (4.) faza. Posljednja faza ciklusa uključuje otvaranje tlačnog ventila na klipu pod utjecajem uzgona i tlaka koji djeluje na kuglicu tlačnog ventila od dolje, a uzrokuje ga kapljevina koja se nalazi u prostoru između klipa i cilindra. Klip se u četvrtoj fazi kreće prema dolje i kroz tlačni ventil propušta kapljevinu koja je ušla kroz usisni ventil u drugoj fazi. Kada klip dođe u najdonji položaj ponovno započinje prva faza ciklusa. Može se zaključiti da su prva i treća faza infinitezimalnog trajanja, a da druga i četvrta faza traju određeno vrijeme ovisno o brzini kretanja klipa i duljini hoda klipa.

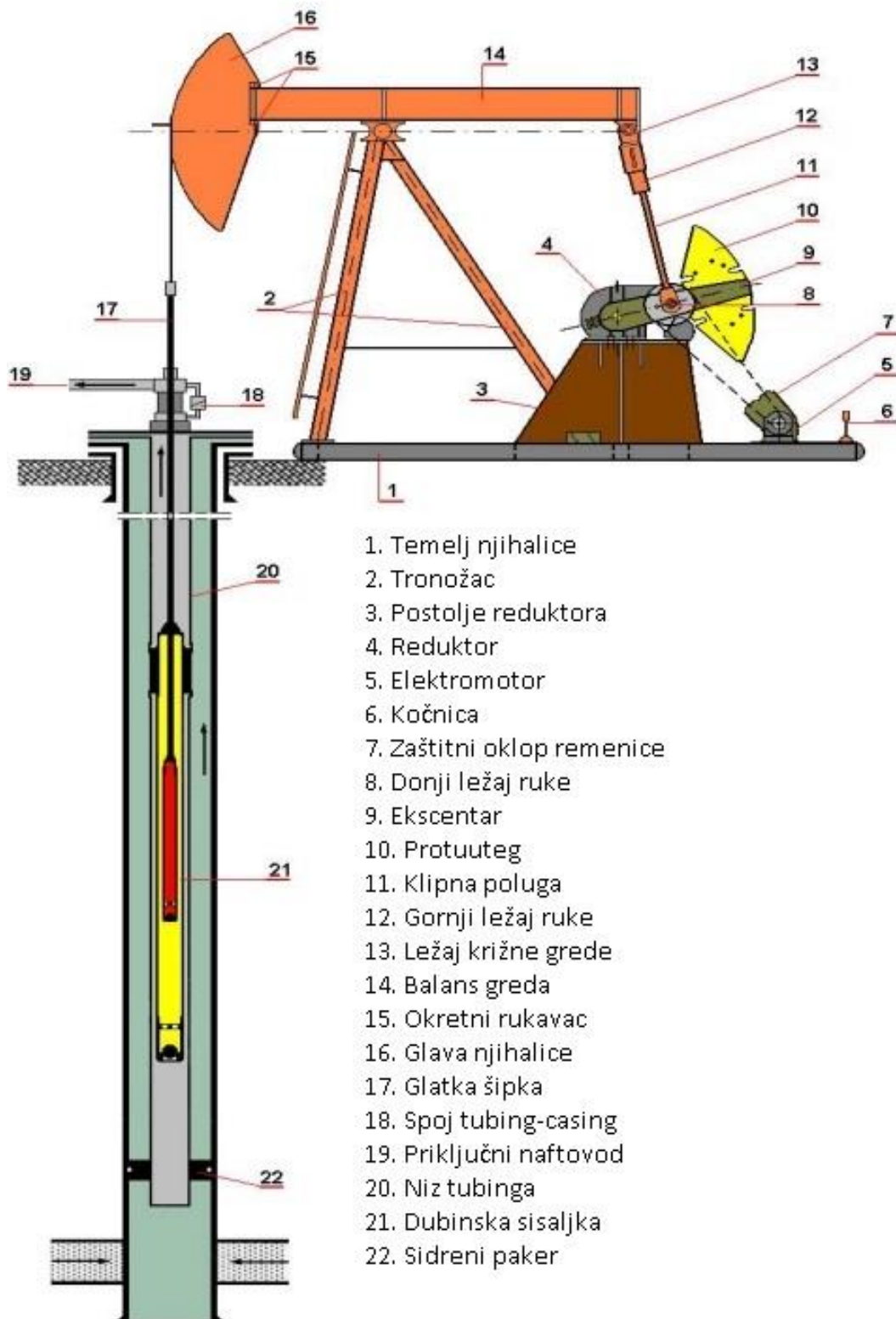


Slika 2-1. Faze crpljenja kapljevine (Zelić i Čikeš, 2006)

Na gornji dio klipa spaja se klipnjača koja se nastavlja na niz klipnih šipki, koji je sa svoje gornje strane spojen na glatku šipku. Glatka šipka se s gornje strane spaja na njihalicu; pogonski sklop koji omogućuje klipu hod gore-dolje.

Njihalica je strojni mehanizam koji pretvara rotacijsko gibanje pogonskog motora u pravocrtno gibanje klipa sisaljke i niza klipnih šipki. Glatka šipka još se naziva i polirana šipka jer je izrađena od najfinijeg čelika i doradena do visokog sjaja (Brkić, 2018). Ona je jako bitan element cijelog sustava zbog toga što ona trpi najveća naprezanja. Pošto je najgornja ima najveću nosivost, a izložena je i trenju u brtvenom sustavu. Iako je polirana do visokog sjaja, s vremenom gubi na svojoj kvaliteti pa se i trenje između glatke šipke i brtvila povećava sa smanjenjem glatkoće šipke.

Klipne šipke su punog profila okruglog presjeka i služe za prijenos energije od njihalice do klipa u dubinskoj sisaljci. Duljine su od 7,62 do 9,14 metara (25-30 ft) (Brown, 1980). Spajaju se jedna u drugu s ojačanim ženskim i muškim navojima. Prije navoja (20-30 cm) šipke su kvadratnog oblika radi zahvata ključevima pri navrtanju i odvrtnju. Prema API standardu klipne šipke se izrađuju u sljedećim promjerima: 12,70 mm (1/2 in); 15,88 mm (5/8 in); 19,05 mm (3/4 in); 22,22 mm (7/8 in); 25,40 mm (1 in); 28,58 mm (1 1/8 in) (Brkić, 2018.). Na slici 2-2. se nalazi shematski prikaz nadzemne i podzemne opreme proizvodne bušotine opremljene dubinskom sisaljkom s klipnim šipkama.



Slika 2-2. Shematski prikaz nadzemne i podzemne opreme proizvodne bušotine opremljene dubinskom sisaljkom s klipnim šipkama (Brkić, 2018)

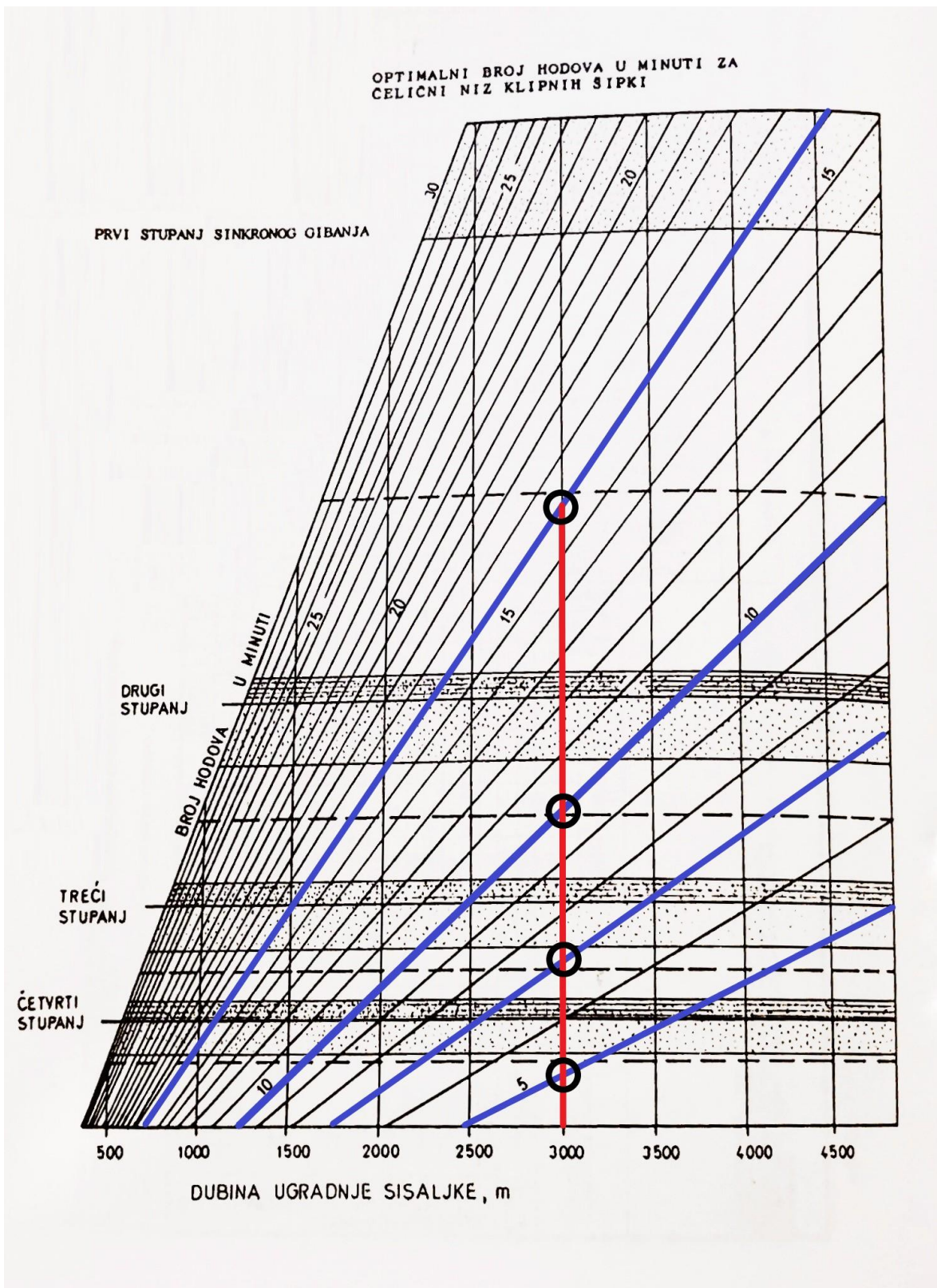
2.1. Određivanje optimalnog broja hodova u minuti

Određivanje optimalnog broja hodova u minuti vitalno je za rad dubinske sisaljke. Jedan hod je pomak glatke šipke iz najvišeg položaja u najniži te opet u najviši i pri tome se podiže jedan obrok kapljevine koji odgovara radnom volumenu cilindra. Jako je bitno odrediti optimalan broj hodova u jedinici vremena, u ovom slučaju kao jedinica vremena se uzima 1 minuta. Broj hodova u minuti se označava akronimom „SPM” koji dolazi iz engleskog govornog područja, a znači: „*strokes per minute*”, a u daljnjem tekstu i izrazima koristit će se oznaka N. Prilikom određivanja optimalnog broja hodova u minuti nailazi se na problem harmoničnih ili sinkronih brzina crpljenja. Sinkrona brzina crpljenja ovisi o prirodnoj frekvenciji niza klipnih šipki, a prirodna frekvencija niza klipnih šipki ovisi o duljini niza klipnih šipki. Ako se na fiksni kraj klipne šipke primjeni iznenadna sila ili udarac, impuls sile će putovati kroz šipku do slobodnog kraja, to jest, klipa sisaljke i natrag u obliku longitudinalnog vala. Ako ti valovi odgovaraju prirodnoj frekvenciji niza klipnih šipki, koja je određena za svaki stupanj sinkronog gibanja i označena sa punom crnom horizontalnom linijom na dijagramu sa slike 2-3., oni mogu brzo narasti do udarnih valova veličine koja izaziva samouništenje niza klipnih šipki. Zato je najbolje da se ostane što je moguće dalje od prirodnih frekvencija niza šipki da bi se izbjeglo oštećenje. Dijagram na slici 2-3. pokazuje optimalan broj hodova u minuti za svaku dubinu ugradnje sisaljke, što označavaju horizontalne crtkane linije na bijelim površinama. Broj hodova u minuti (N) treba odabrati što je moguće bliže tim crtkanim linijama, ostajući izvan zasjenjenih površina i pune crne linije unutar zasjenjenih površina.

Optimalan broj hodova u minuti može se dobiti tako da se odabere postojeća dubina ugradnje sisaljke na dnu dijagrama i slijedi vertikalna linija prema gore. Sjecište vertikalne linije dubine s dijagonalnom linijom N u točki koja je najbliža horizontalnoj crtkanoj liniji dat će optimalan broj hodova u minuti. Postoji nekoliko mogućnosti, a odluka se donosi na temelju raspoložive opreme.

Primjer:

Ako je dubina ugradnje sisaljke 3000 m i ako se ide do prve crtkane linije (četvrtog stupnja); broj hodova bi bio 5 N. Penje li se više, do druge crtkane linije (trećeg stupnja); broj hodova je 7 N. Ako se nastavi do sljedeće linije (drugog stupnja); broj hodova iznosi 10 N. I u konačnici ako bi se išlo do crtkane linije prvog stupnja, broj hodova bi iznosio 16 N (Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson, 1993).



Slika 2-3. Dijagram za određivanje optimalnog broja hodova u minuti za čelični niz klipnih šipki (Priručnik za dubinske sisaljke-Axelsson, 1993)

2.2. Određivanje stvarne duljine hoda klipa

Tijekom crpljenja nafte dubinskim sisaljka s klipnim šipkama, pod utjecajem težine i duljine klipnih šipki, dolazi do elastičnog istežanja i stežanja klipnih šipki. Iako se ne radi o relativno velikim brzinama kretanja klipnih šipki i time klipa, zbog velike težine klipnih šipki dolazi i do inercijskih sila klipa pri hodu gore-dolje i zbog toga se stvarna duljina hoda klipa razlikuje od duljine hoda glatke šipke. Stvarna duljina hoda klipa je važan podatak za proračun crpljenja nafte jer je duljina hoda klipa ta koja izravno utječe na kapacitet sisaljke.

Stoga, utjecaj na stvarnu duljinu hoda klipa ima istežanje klipnih šipki i tubinga te prekomjerna duljina hoda klipa uslijed akceleracije, odnosno inercijskih sila klipa koje su posljedica akceleracije i mase svih dijelova sustava koji svojim kretanjem izravno podižu kapljevину na površinu. Istežanje klipnih šipki i tubinga javlja se zbog cikličkog prijenosa opterećenja fluida sa usisnog na tlačni ventil i obratno. Zbog toga je važno da su klipne šipke i tubing izrađene od materijala, pretežito čelika, koji ima odgovarajuća elastična svojstva. Dakle, stvarna duljina hoda klipa je manja od duljine hoda glatke šipke jer glatka šipka trpi najveća opterećenja prilikom hoda prema gore, masu kapljevine i masu klipnih šipki i klipa te se zbog toga isteže.

Istežanje klipnih šipki i tubinga, matematički se izražava sljedećim izrazima (Brown, 1980):

$$e_r = \frac{W_f L_r}{A_r E} \quad (2-1)$$

odnosno:

$$e_t = \frac{W_f L_t}{A_t E} \quad (2-2)$$

gdje su:

e_r – istežanje klipnih šipki, m;

e_t – istežanje tubinga, m;

W_f – opterećenje fluida, N;

L_r – duljina klipnih šipki, m;

L_t – duljina tubinga, m;

A_r – površina poprečnog presjeka klipnih šipki, m²;

A_t – površina poprečnog presjeka tubinga, m²;

E – modul elastičnosti čelika ($E=2,1 \times 10^{11}$ Pa).

Iako je naveden izraz za računanje produljenja tubinga, to produljenje se zanemaruje jer je tubing u većini slučajeva usidren pa je njegovo istežanje relativno malo.

Ako se izraz za opterećenje fluida temelji na punom poprečnom presjeku klipa, slijedi:

$$W_f = A_p \rho_f g L_p \quad (2-3)$$

pri čemu su:

A_p – površina poprečnog presjeka klipa, m²;

ρ_f – gustoća fluida u tubingu, kg/m³;

g – ubrzanje sile teže, ($g=9,80665$ m/s²);

L_p – dubina ugradnje klipa, m.

Istezanje klipnih šipki i tubinga (uz pretpostavku da je $L=L_p=L_r=L_t$) se određuje sljedećim izrazom:

$$e_{r-t} = \frac{A_p \rho_f g L^2}{E} \left(\frac{1}{A_r} + \frac{1}{A_t} \right) \quad (2-4)$$

odnosno, ako je tubing usidren, tada je:

$$e_r = \frac{A_p \rho_f g L_r^2}{A_r E} \quad (2-5)$$

Ako su u bušotini ugrađene kombinirane klipne šipke, što je najčešći slučaj i što znači da sve šipke nemaju istu površinu poprečnog presjeka, tada se izraz (2-5) izražava na sljedeći način:

$$e_r = \frac{A_p \rho_f g L_r}{E} \left(\frac{l_{r1}}{A_{r1}} + \frac{l_{r2}}{A_{r2}} + \dots + \frac{l_{rn}}{A_{rn}} \right) \quad (2-6)$$

gdje su $l_{r1}+l_{r2}+\dots+l_{rn} = L_r$

Prekomjerna duljina hoda klipa je posljedica inercijske sile klipa, to jest faktora ubrzanja pri kretanju klipnih šipki prema gore (F), pa se produljenje duljine hoda klipa može izraziti ovim obrascem:

$$e_p = \frac{W_r F L_r}{A_r E} \quad (2-7)$$

e_p – produljenje duljine hoda klipa, m;

W_r – težina klipnih šipki, N;

F – faktor ubrzanja pri kretanju klipnih šipki prema gore.

Ako se faktor ubrzanja pri kretanju klipnih šipki prema gore, odnosno faktor dinamičnosti izrazi sljedećom formulacijom:

$$F = \frac{S N^2}{1790} \quad (2-8)$$

S – duljina hoda glatke šipke, m;

N – broj hodova, min^{-1}

i taj izraz uvrsti u jednadžbu (2-7), tada se dobiva:

$$e_p = \frac{W_r L_r}{A_r E} \frac{S N^2}{1790} \quad (2-9)$$

Uzme li se da je $W_r = A_r \rho_r g L_r$, tada je:

$$e_p = \frac{A_r \rho_r g L_r^2}{A_r E} \frac{S N^2}{1790} \quad (2-10)$$

Ako se uzme gustoća čelika $\rho_r = 7850 \text{ kg/m}^3$ te da je $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$, tada se sređivanjem dobiva konačan izraz za produljenje duljine hoda klipa:

$$e_p = 2,05 \times 10^{-10} L_r^2 S N^2 \quad (2-11)$$

Produljenje duljine hoda klipa pri hodu prema gore je zanemarivo, a zbog utjecaja nestlačivosti stupca fluida ne dolazi do izvijanja klipnih šipki.

Stoga, stvarna duljina hoda klipa će biti:

$$S_p = S - e_r + e_p \quad (2-12)$$

Točnije, uvrštavanjem izraza (2-1) i (2-10):

$$S_p = S - \frac{L_r}{A_r E} \left(W_f - \frac{S N^2}{1790} W_r \right) \quad (2-13)$$

gdje je:

S_p – stvarna duljina hoda klipa, m.

2.3. Utvrđivanje količine podizanja kapljevine

Kada je poznata proizvodnja kapljevine koja se želi pridobiti koriste se razni dijagrami za određivanje broja hodova u minuti (N) i stvarne duljine hoda klipa (S_p) na temelju određene količine podizanja kapljevine (Q_p) i određenog promjera sisaljke (d_p). Ako se ne zna količina pridobivane kapljevine, a poznata je dubina ugradnje sisaljke, koriste se metode i izračuni u nastavku. Na temelju promjera tubinga odabere se promjer sisaljke. Prema API standardu postoje sisaljke promjera od 25,4 mm (1 in) pa do otvora s promjerom 120,65 mm (4 ¾ in) (Brkić, 2018). Nakon odabira promjera sisaljke pretpostavlja se dnevna proizvodnja kapljevine (Q_o), uz pretpostavku da bušotina može davati pretpostavljenu količinu kapljevine. Teoretska proizvodnja (100%-tni volumetrijski koeficijent korisnog učinka sisaljke) za pojedini promjer sisaljke ovisi o promjeru klipa (A_p), broju hodova u minuti (N) i stvarnoj duljini hoda klipa (S_p).

Kao što je naglašeno u prethodnom dijelu koji obrađuje određivanje stvarne duljine hoda klipa, stvarna duljina hoda klipa se razlikuje od duljine hoda glatke šipke (duljina hoda glatke šipke ovisi o tehničkim karakteristikama njihalice). Razlika u duljini hoda glatke šipke i hoda klipa je posljedica povećanja duljine hoda zbog produljenja klipnih šipki (engl. *over-travel*) i smanjenja duljine hoda zbog istežanja klipnih šipki. Izraz *over-travel* se odnosi na vibracijsko kretanje niza klipnih šipki i klipa sisaljke, koje ima tendenciju produljivanja hoda klipa sisaljke. To se događa zbog inercijske sile klipa.

Produljenje hoda klipa (e_p) računa se pomoću formule (2-11). Ulazni podatci za tu formulu su: duljina klipnih šipki (L_r), duljina hoda glatke šipke (S) te broj hodova u minuti (N). Kao što je prije spomenuto, produljenje hoda klipa je manje od skraćivanja hoda klipa tzv. gubitak hoda (e_r). Gubitak hoda klipa se računa izrazom (2-1) odnosno izrazom (2-6) ako se radi o kombiniranim klipnim šipkama. Ulazni podatci za tu jednadžbu su: površina poprečnog presjeka klipa (A_p), gustoća fluida u tubingu (ρ_f), ubrzanje sile teže ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$), modul elastičnosti čelika ($E = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$), duljina određenih sekcija klipnih šipki ($l_{r1}, l_{r2}, \dots, l_{rn}$) i površina poprečnog presjeka klipnih šipki ($A_{r1}, A_{r2}, \dots, A_{rn}$). Uglavnom je tubing usidren te se zbog toga ne računa njegovo istežanje. Kada se izračunaju produljenje i smanjenje duljine hoda klipa (e_p i e_r), pomoću jednadžbe (2-12) se izračuna stvarna duljina hoda klipa (S_p).

Za računanje teoretske proizvodnje koristi se sljedeći izraz (Zelić i Čikeš, 2006):

$$Q_t = 1440 * N * S_p * A_p \quad (2-14)$$

Q_t – teoretska proizvodnja kapljevine; m³/d.

Stvarni kapacitet sisaljke se dobije ako se gornji izraz pomnoži volumetrijskim koeficijentom korisnog učinka sisaljke (η_v), odnosno:

$$Q_p = 1440 * N * S_p * A_p * \eta_v \quad (2-15)$$

gdje su:

Q_p – stvarna proizvodnja kapljevine; m³/d;

η_v – koeficijent korisnog učinka sisaljke.

Vrijednost volumetrijskog koeficijenta korisnog učinka sisaljke poprima širok raspon vrijednosti, teoretski od 0,00 do 1,00, dakle, izražava se kao dio cijelog (Zelić i Čikeš, 2006). Na njega utječe količina slobodnog plina koji prolazi kroz sisaljku. Zbog toga je poželjno što više smanjiti ulaženje plina u sisaljku, npr. primjenom dubinskog plinskog sidra.

Volumetrijski koeficijent korisnog učinka sisaljke može se izraziti ovom formulom:

$$\eta_v = \frac{V_c - V_g}{V_c} \quad (2-16)$$

pri čemu su:

V_c – obujam cilindra, m^3 ;

V_g – obujam plina koji ulazi u sisaljku, m^3 :

$$V_g = V_{gsp} - V_{gps} \quad (2-17)$$

V_{gsp} – obujam slobodnog plina iz ležišta, m^3 ;

$$V_{gsp} = V_c (R_p - R_s) B_g \quad (2-18)$$

V_{gps} – obujam plina koji se izdvoji u plinskom sidru, m^3 :

$$V_{gps} = V_{gsp} \eta_{sid} \quad (2-19)$$

gdje su:

R_p – proizvodni plinski faktor (GOR), m^3/m^3 ;

R_s – faktor otopljenog plina, m^3/m^3 ;

B_g – volumetrijski faktor plina, m^3/m^3 ;

η_{sid} – volumetrijski koeficijent korisnog učinka plinskog sidra.

3. PRORAČUN KAPACITETA DUBINSKE SISALJKE

Proračun kapaciteta dubinske sisaljke se bazira na sljedećim podacima bušotine X (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2019):

Tablica 3-1. Podatci o bušotini potrebni za proračun

Dubina bušotine	2000 m
Dubina ugradnje sisaljke	1500 m
Promjer tubinga	60,32 mm
Je li tubing usidren?	da
Razina kapljevine	1500 m (na razini sisaljke)
Gustoća kapljevine	900 kg/m ³
Tražena proizvodnja	20 m ³ /d kod 85 % volumetrijskog koeficijenta korisnog učinka sisaljke

U tablici 3-2. se nalaze API preporuke za odabir promjera sisaljke na temelju promjera tubinga. Iz tablice je vidljivo da je za tubing promjera 60,32 mm moguće odabrati sljedeće sisaljke:

44,45 mm tubing-sisaljka debele stijenke (TIP API: TH)

45,24 mm tubing-sisaljka debele stijenke s klipom mekih brtvi (TIP API: TP)

31,75 mm usadna sisaljka debele stijenke (TIP API: RH)

38,10 mm usadna sisaljka tanke stijenke (TIP API: RW)

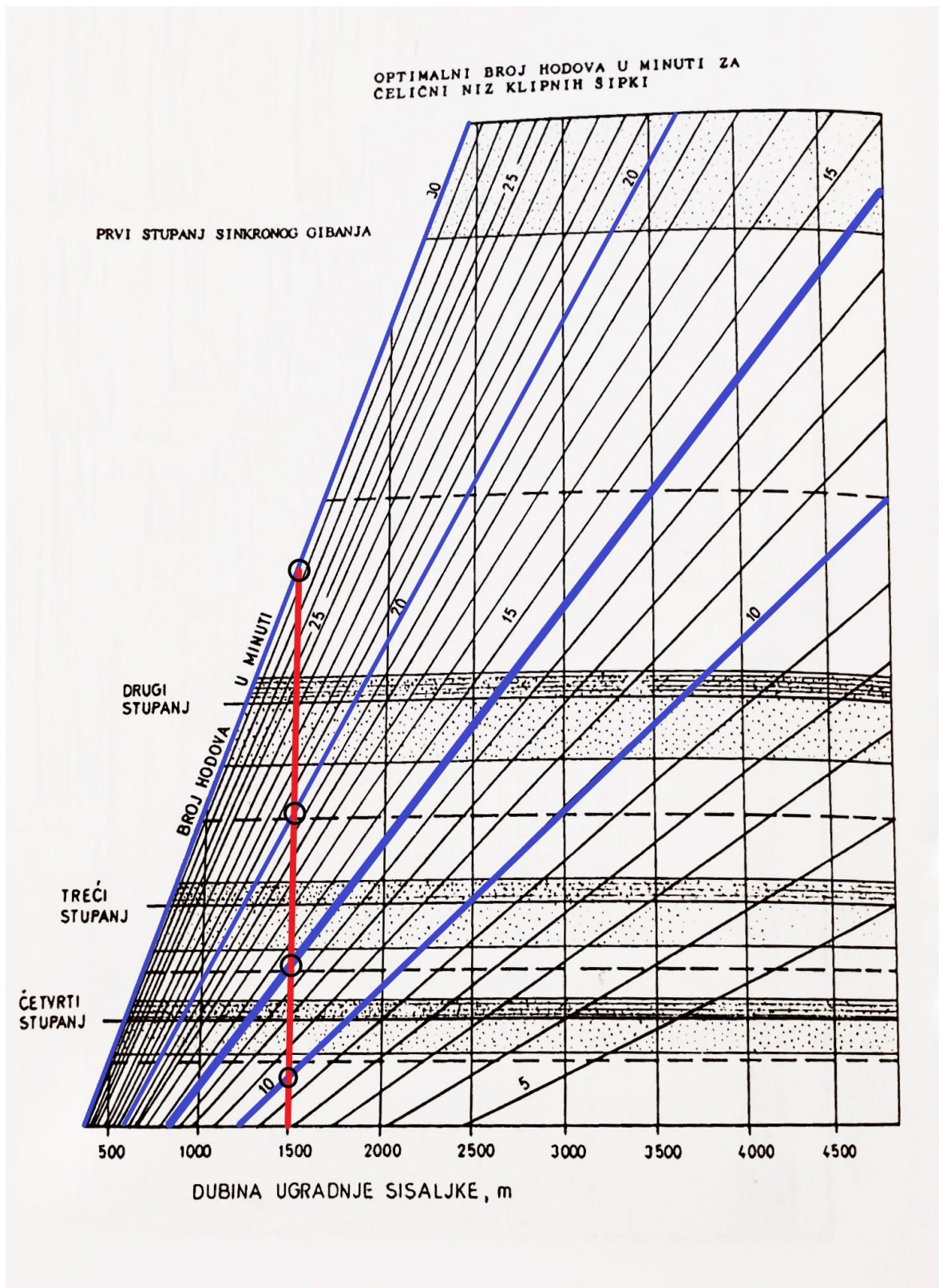
31,75 mm i 38,10 mm usadna sisaljka tanke stijenke s klipom mekih brtvi (TIP API: RS)

U proračunu se određuje je li moguća proizvodnja kapljevine od 20 m³/d, naravno uz pretpostavku da ležište može davati tu količinu. Odabrana je usadna sisaljka tanke stijenke promjera 38,10 mm. Za proračun je potrebno odrediti parametre navedene u prethodnom dijelu (2.3. Utvrđivanje količine podizanja kapljevine), a to su broj hodova u minuti (N) i stvarna duljina hoda klipa (S_p). Za to će se koristiti podatci iz tablice 3-1. i još neki podatci koji će se naknadno prikazati.

Tablica 3-2. Promjeri „Axelson“ sisaljki (Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson, 1993)

OPIS SISALJKE	TIP API	PROMJER TUBINGA, mm						
		31,75	38,10	60,32	73,02	88,90	114,30	139,70
tubing, debelostijena sisaljka	TH			44,45	57,15	69,85	95,25	120,65
tubing, debelostijena sisaljka mekih brtvi	TP			45,24	57,15	69,85		
usadna, debelostijena sisaljka	RH			31,75	38,10 44,45			
„Sure seal“	RW	22,22	31,75	38,10	50,80	63,50	82,55 88,90	
„Elonmax“	RS			31,75 38,10	50,80			
Prikazani promjeri mogu se ugrađivati i u tubing većeg promjera								

Nadalje je potrebno utvrditi koliko iznosi broj hodova u minuti (N). To se određuje na način kako je objašnjeno u dijelu „2.1. Određivanje optimalnog broja hodova u minuti“. Na temelju dijagrama sa slike 3-1. dobiveni su podatci o broju hodova u minuti, može se odabrati različit broj hodova, ovisno o kojem stupnju sinkronog gibanja se radi. Tako za prvi stupanj sinkronog gibanja optimalan broj hodova u minuti za dubinu od 1500 metara iznosi preko 30 N i neće se odabrati jer bi odabrani broj hodova u minuti preopteretio motor njihalice (dubina od 1500 m je premalena da bi motor radio u prvom stupnju sinkronog gibanja). Za drugi stupanj sinkronog gibanja; 20 N, za treći; 14 N, a za četvrti; 10 N. Odabran je četvrti stupanj sinkronih brzina; 10 N zato jer je optimalno da motor njihalice, kad je god to moguće radi u što većem stupnju prijenosa zbog efikasnosti cijelog procesa crpljenja kapljevine. Ukoliko odabrani broj hodova ne bude dovoljan za podizanje očekivane količine kapljevine, uzet će se odgovarajući niži stupanj prijenosa.



Slika 3-1. Odabir optimalnog broja hodova u minuti za dubinu ugradnje sisaljke od 1500 m

Uzet će se duljina hoda glatke šipke (S) od 3,427 m. To je pretpostavljena duljina hoda koja će prva ući u proračun i koja se po potrebi može korigirati, ali da bude u rasponu tehničkih ograničenja njihalice. Iznos od S=3,427 m će biti korišten u daljnjem proračunu.

Jednadžba za izračunavanje produljenja hoda (e_p) je navedena pod oznakom (2-11) i u nastavku se koristi:

$$e_p = 2,05 \times 10^{-10} L_r^2 S N^2$$

uvrštavanjem u jednadžbu dobiva se:

$$e_p = 2,05 \times 10^{-10} * 1500^2 * 3,427 * 10^2 = 0,158 \text{ m}$$

Nadalje, potrebno je izračunati skraćenje duljine hoda klipa (e_r), koje se računa jednadžbom (2-6):

$$e_r = \frac{A_p \rho_f g L_r}{E} \left(\frac{l_{r1}}{A_{r1}} + \frac{l_{r2}}{A_{r2}} + \dots \frac{l_{rn}}{A_{rn}} \right)$$

Tu se dolazi do potrebe za dodatnim podacima koji nisu navedeni u tablici 3-1., a to su: duljine i promjeri određenih sekcija klipnih šipki ($l_{r1}, l_{r2}, d_{r1}, d_{r2}$). Poznati su sljedeći podatci iz podataka o ugrađenoj opremi u bušotini X (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2019):

- duljina donje sekcije klipnih šipki, $l_{r1}=364,14 \text{ m}$
- duljina gornje sekcije klipnih šipki, $l_{r2}=1135,86 \text{ m}$
- promjer donje sekcije klipnih šipki, $d_{r1}=22,22 \text{ mm}$
- promjer gornje sekcije klipnih šipki, $d_{r2}=25,40 \text{ mm}$.

Za izračun skraćanja duljine hoda klipa potrebno je izračunati površine poprečnih presjeka klipa i klipnih šipki. U jednadžbi (2-6) je vidljivo da nema ulaznih podataka o tubingu jer je on usidren (nema produljenja tubinga). Prije uvrštavanja iznosa promjera u jednadžbu, potrebno je preračunati promjer iz milimetara u metre jer jednadžba (2-6) to zahtjeva.

Površina poprečnog presjeka računa se jednadžbom :

$$A_{p/r} = \frac{d_{p/r}^2 \pi}{4} \quad (3-1)$$

pa je na temelju toga, površina poprečnog presjeka klipa;

$$A_p = \frac{d_p^2 \pi}{4} = \frac{0,03810^2 \pi}{4} = 1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Prema tome, površine poprečnih presjeka klipnih šipki su sljedeće:

$$A_{r1} = \frac{d_{r1}^2 \pi}{4} = \frac{0,02222^2 \pi}{4} = 3,88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

odnosno:

$$A_{r2} = \frac{d_{r2}^2 \pi}{4} = \frac{0,02540^2 \pi}{4} = 5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Kada su poznate sve veličine mogu se uvrstiti u jednadžbu (2-6):

$$e_r = \frac{1,14 \times 10^{-3} * 900 * 9,80665 * 1500}{2,1 \times 10^{11}} \left(\frac{364,14}{3,88 \times 10^{-4}} + \frac{1135,86}{5,07 \times 10^{-4}} \right) = 0,228 \text{ m}$$

Sada se računa prava duljina hoda klipa, pomoću jednadžbe (2-12):

$$S_p = S - e_r + e_p$$

uvrštanjem se dobije sljedeće:

$$S_p = 3,427 - 0,228 + 0,158 = 3,357 \text{ m}$$

Sada su poznati svi ulazni podatci za izračun teoretske proizvodnje, putem jednadžbe (2-14):

$$Q_t = 1440 * N * S_p * A_p$$

Uvrštavanjem se dobiva;

$$Q_t = 1440 * 10 * 3,357 * 1,14 \times 10^{-3} = 55,11 \text{ m}^3/d$$

i to je teoretska proizvodnja. Za izračun stvarne proizvodnje koristi se jednačba (2-15):

$$Q_p = 1440 * N * S_p * A_p * \eta_v$$

Uvrštavanjem teoretske proizvodnje i množenjem s koeficijentom korisnog učinka sisaljke (η_v), koji u ovom slučaju iznosi 0,85, dobije se sljedeće:

$$Q_p = 55,11 * 0,85 = 46,84 \text{ m}^3/d$$

Dobiveni iznos dnevne proizvodnje kapljevine odstupa od željenog iznosa za +26,84 m³/d, tj. dobivena dnevna proizvodnja s duljinom hoda glatke šipke od 3,427 m je veća od očekivane za 234,2%.

Da bi se dobila očekivana proizvodnja od 20 m³/d potrebno je korigirati ulazne podatke u jednačbi (2-15). U toj jednačbi može se utjecati na sve ulazne parametre (N, S_p i A_p). Međutim zbog jednostavnosti korekcije, jedino će biti promjene u stvarnoj duljini hoda klipa (S_p) budući da se neće mijenjati dubinska sisaljka (klip ostaje isti), a samo podizanje kapljevine korištenjem njihalice ima ograničenja u broju hodova u minuti i kod konvencionalnih njihalica minimalan broj hodova iznosi 8-10 N (Brkić, 2018), osim kod korištenja tzv. linearno pogonjenih sisaljki ili LRP što ovdje nije slučaj. Kada bi se broj hodova (N) i dalje ostavio u četvrtom stupnju sinkronog gibanja, i uzeo minimalan broj hodova u minuti; 8 N, tada bi dnevna proizvodnja kapljevine (Q_p) s nepromijenjenim vrijednostima S i d_p, iznosila 36,84 m³/d. Što znači da je i u tom slučaju potrebno smanjiti neki od ulaznih parametara u jednačbu (2-15). Ostat će se kod 10 N jer je ta brzina najbliža crtkanoj liniji četvrtog stupnja sinkronog gibanja pa se može smatrati optimalnom.

Potrebno je zatim odrediti omjer tražene i dobivene proizvodnje:

$$f = \frac{Q_o}{Q_p} \quad (3-2)$$

gdje su:

f – omjer tražene i dobivene proizvodnje;

Q_o – tražena/očekivana proizvodnja; m^3/d .

S omjerom tražene i dobivene proizvodnje (f) se množi parametar koji će biti promijenjen u jednadžbi (2-15), u konkretnom slučaju to je iznos stvarne duljine hoda klipa (S_p). Množenjem se dobiva sljedeće:

$$S_p * f = 3,357 * \frac{20,00}{46,84} = 3,357 * 0,427 = 1,433 \text{ m}$$

Iz prethodne jednadžbe je vidljivo da stvarna duljina hoda klipa treba biti 1,433 m ukoliko se želi ostvariti proizvodnja od 20 m^3/d i uz to da se ne mijenjaju ostali ulazni parametri u jednadžbi (2-15), točnije broj hodova u minuti (N) i površina poprečnog presjeka klipa (A_p). Jednadžba (2-12) određuje kako se izračunava stvarna duljina hoda klipa. Iz nje je vidljivo da se duljini hoda glatke šipke (S) dodaje produljenje duljine hoda klipa (e_p) te joj se oduzima skraćenje duljine hoda klipa (e_r). Skraćenje duljine hoda klipa ovisi o više ulaznih parametara, ali niti jedan od tih parametara neće biti promijenjen u ovom slučaju. Stoga je skraćenje duljine hoda klipa već izračunato te iznosi 0,228 m. Uvrštenjem u jednadžbu (2-12), dobiva se sljedeće:

$$S_p = S - e_r + e_p$$

$$1,433 \text{ m} = S - 0,228 + e_p$$

$$1,661 \text{ m} = S + e_p$$

Iz prethodne jednadžbe je vidljivo da zbroj duljine hoda glatke šipke (S) i produljenja duljine hoda klipa (e_p) mora iznositi 1,661 m. Produljenje duljine hoda klipa se može izraziti pomoću jednadžbe (2-11) te uvrštavanjem u prethodnu jednadžbu se dobiva sljedeće:

$$S + (2,05 \times 10^{-10} * L_r^2 * S * N^2) = 1,661 \text{ m}$$

$$S + (2,05 \times 10^{-10} * 1500^2 * S * 10^2) = 1,661 \text{ m}$$

$$S + 0,046 S = 1,661 \text{ m}$$

$$1,046 S = 1,661 \text{ m}$$

$$S = \frac{1,661}{1,046} = 1,588 \text{ m}$$

Iz prethodne formulacije je vidljivo da je potrebno duljinu hoda glatke šipke postaviti na 1,588 metara kako bi se ostvarila proizvodnja od 20 m³/d. Kada se duljina hoda glatke šipke postavi na tu vrijednost potrebno je provjeriti daje li ta duljina traženu proizvodnju.

Potrebno je iz jednadžbe (2-11) izračunati novo produljenje duljine hoda klipa (e_p). Uvrštavanjem korigirane vrijednosti duljine hoda glatke šipke dobiva se:

$$e_p = 2,05 \times 10^{-10} * 1500^2 * 1,588 * 10^2 = 0,073 \text{ m}$$

Kao što je naglašeno, skraćenje duljine hoda klipa (e_r) se nije promijenilo te iznosi 0,228 m. Na taj način su poznati svi podatci za izračun korigirane vrijednosti stvarne duljine hoda klipa. Uvrštavanjem u jednadžbu (2-12) dobiva se sljedeće:

$$S_p = 1,588 - 0,228 + 0,073 = 1,433 \text{ m}$$

Uvrštavanjem korigirane vrijednosti stvarne duljine hoda klipa u jednadžbu (2-14) dobiva se novi iznos teoretske proizvodnje:

$$Q_t = 1440 * 10 * 1,433 * 1,14 \times 10^{-3} = 23,52 \text{ m}^3/d$$

Množenjem teoretske proizvodnje s koeficijentom korisnog učinka sisaljke dobiva se stvarna proizvodnja. Uvrštavanjem u jednadžbu (2-15) dobiva se:

$$Q_p = 23,52 * 0,85 = 19,99 \text{ m}^3/d$$

Vidljivo je da je dobivena tražena proizvodnja.

4. ZAKLJUČAK

U početnoj fazi iskorištavanja ležišta ugljikovodika, koristi se energija ležišta akumulirana u ležištu. Tijekom proizvodnog vijeka pada ležišni tlak i postaje nedovoljan za savladavanje svih otpora protjecanju fluida. Tada se pristupa jednoj od mehaničkih metoda podizanja kapljevine, a jedna od tih metoda je obrađena u ovom radu.

Proizvodnja nafte dubinskim sisaljka je najstarija mehanička metoda podizanja kapljevine, ujedno i najkorištenija. Korištenje te metode je nekako najmanje rizično jer je to metoda o kojoj se puno zna i koja je dosta istražena pa ako i dođe do nekakvih problema, prilikom upotrebe, lakše ih je otkloniti nego da je korištena neka druga manje poznata metoda mehaničkog podizanja kapljevine.

Kao što je navedeno, opremu za podizanje kapljevine dubinskom sisaljkom čini veći broj samostalnih dijelova, koji su usklađeni u jedan mehanizam i tek tada svi dijelovi tog sustava dobivaju svrhu i čine koristan rad, a to je podizanje kapljevine. U ovom radu opisan je jedan manji dio podataka i proračuna koji se rabi prilikom odabira cjelokupne opreme, konkretno odabir promjera klipa dubinske sisaljke te određivanje kapaciteta ugrađene sisaljke odabirom optimalne stvarne duljine hoda klipa. Prikazano je da se na temelju pravilnog odabira broja hodova u minuti, te stvarne duljine hoda klipa može izračunati dnevna proizvodnja kapljevine. Ukoliko se ne dobije tražena proizvodnja potrebno je mijenjati neke parametre koji ulaze u jednadžbu (2-15) za izračun dnevne proizvodnje kapljevine. U konkretnom slučaju iz proračuna mijenjao se samo jedan ulazni parametar, stvarna duljina hoda klipa (S_p), a inače moglo se pristupiti mijenjanju broja hodova u minuti (N) i promjera klipa (d_p) koji neposredno utječe na površinu poprečnog presjeka klipa (A_p). Ali da se promijenio i promjer klipa i broj hodova tj. da su se smanjili do krajnjih ograničenja proračuna, svakako bi trebalo mijenjati stvarnu duljinu hoda klipa, ali onda, naravno, u tom slučaju stvarna duljina hoda bi se manje smanjila jer su se smanjili ostali ulazni parametri u jednadžbu (2-15).

Na primjeru bušotine iz proračuna vidljivo je da je početna duljina hoda glatke šipke ($S=3,427$ m) predimenzionirana te se za traženu proizvodnju koristi 46,34% od prvotno odabrane duljine hoda glatke šipke.

Moguće su razne kombinacije varijabli koje ulaze u jednadžbu (2-15), no maksimalna proizvodnja ostvaruje se odabirom najvećeg promjera klipa sisaljke (d_p) iz tablice 3-2. za odgovarajući promjer tubinga. Također potrebno je odabrati najveći broj hodova u minuti (N) na temelju dijagrama sa slike 3-1. te konačno postaviti duljinu hoda glatke šipke na maksimalnu moguću. Tako bi svi ulazni parametri u jednadžbu (2-15) imali maksimalnu moguću vrijednost te sukladno tome i dnevna proizvodnja imat će maksimalni iznos.

5. LITERATURA

1. BRKIĆ, V. (2018): *Proizvodnja nafte i plina 1; bilješke s predavanja*, neobjavljeno, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
2. BROWN, K.E. (1980): *The Technology of Artificial Lift Methods*, izd. Tulsa, SAD: PennWell books
3. Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson (1993), izd. Zagreb: INA-NAFTAPLIN
4. Tehnička dokumentacija INA d.d. (2019), neobjavljeno, Zagreb: INA d.d.
5. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M. (2006): *Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama*, izd. Zagreb: INA d.d.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom "Izračun kapaciteta dubinskih sisaljki odabirom optimalne stvarne duljine hoda klipa" izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Jakov Čičmir



KLASA: 602-04/20-01/144
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 15.06.2020.

Jakov Čičmir, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/144, UR.BR. 251-70-12-20-1 od 04.05.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

IZRAČUN KAPACITETA DUBINSKIH SISALJKI ODABIROM OPTIMALNE STVARNE DULJINE HODA KLIPA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Vladislav Brkić, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)