

# Podizanje kapljevine klipnim liftom temeljem proračuna s poznatim proizvodnim pokazateljima

Plunger lift based on calculation with known production parameters

Filip Šarčević

Student diplomskog studija RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
[filip.sarcevic97@gmail.com](mailto:filip.sarcevic97@gmail.com)

Mentorstvo: doc.dr.sc. Vladislav Brkić, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu



**Ključne riječi:** klipni lift, podizanje kapljevine, proizvodni parametri

**Key words:** plunger lift, liquid hydrocarbon production, production parameters



## Sažetak

Klipni lift je mehanička metoda umjetnog podizanja kapljevine. Klipni lift se razvio kao široko primjenjiva metoda koja predstavlja ekonomičnu alternativu plinskom liftu. Tema ovog rada je opis načina rada klipnog lifta te moguća primjena u naftnim i plinskim bušotinama na temelju proračuna na konkretnoj proizvodnoj bušotini.



## Abstract

Plunger lift is a mechanical method of the artificial lift. Plunger lift was developed as a widely used method of production, representing an economical alternative in comparison with gas lift. Theme of this final paper is description of plunger lift's production mechanism, as well as possible uses in oil and gas wells based on the calculations in which data is drawn from known production parameters of the well.

## 1. Uvod

Mehaničke metode podizanja kapljevine primjenjuju se kada ležišna energija nije dovoljna za iznošenje kapljevine na ušću i za svladavanje otpora pri protjecanju. Svrha ovih metoda je podignuti kapljevinu iz bušotine kako bi se ostvarila depresija na ležište (razlika između ležišnog i dinamičkog tlaka na dnu bušotine).

Jedna od primjenjivanih metoda iznošenja kapljevine je klipni lift koji nalazi primjenu u naftnim i u plinskim bušotinama. Klipni lift se razvio kao široko primjenjiva metoda koja predstavlja ekonomičnu alternativu plinskom liftu. Klip koji se koristi u ovoj metodi omogućava ekonomičnost proizvodnje; u bušotinama gdje se on ne primjenjuje, potrebna je velika brzina plina za iznošenje kapljevine, dok upotrebom klipa brzina plina može biti i vrlo niska zbog toga što klip predstavlja barijeru između tekuće i plinske faze koja se iznosi na površinu te se u tu svrhu za iznošenje kapljevine može primjenjivati energija samog ležišta (Lake, 2007).

Klipni lift se u počecima svoje primjene koristio pretežno na naftnim bušotinama kao metoda iznošenja kapljevine ili u kombinaciji s plinskim liftom, dok se tijekom i nakon 1980-ih godina sve više razmatra primjena klipnog lifta u plinskim bušotinama. Nekoliko

studija tijekom tog vremena (Morrow i Rogers, 1992, Lea et al., 2009) koji su se bazirali na starijim poznatim radovima (Foss i Gaul, 1965) zaslužno je za razvoj metode klipnog lifta. Primjerice, razmatrana je veza između zračnosti između klipa i proizvodnog niza cijevi (tubinga) i brzine podizanja klipa. Dokazano je da manja zračnost klipa reducira propuštanje plina te u konačnici dovodi do povećanja proizvodnje te da je optimalna brzina kretanja različitih klipova između 150 i 300 m/min (Lake, 2007).

Klipni lift nailazi na široku primjenu u Sjedinjenim Američkim Državama. U posljednje vrijeme, klipni lift nailazi na širu primjenu i u svijetu kao rezultat bolje mehaničke pouzdanosti, fleksibilnosti opreme, poboljšane tehnologije korištenja upravljačke jedinice i boljeg razumijevanja operativnog postupka.

Tema ovog rada je opis načina rada klipnog lifta te moguća primjena u naftnim i plinskim bušotinama na temelju proračuna na konkretnoj proizvodnoj bušotini.

## 2. Osnovna načela rada klipnog lifta

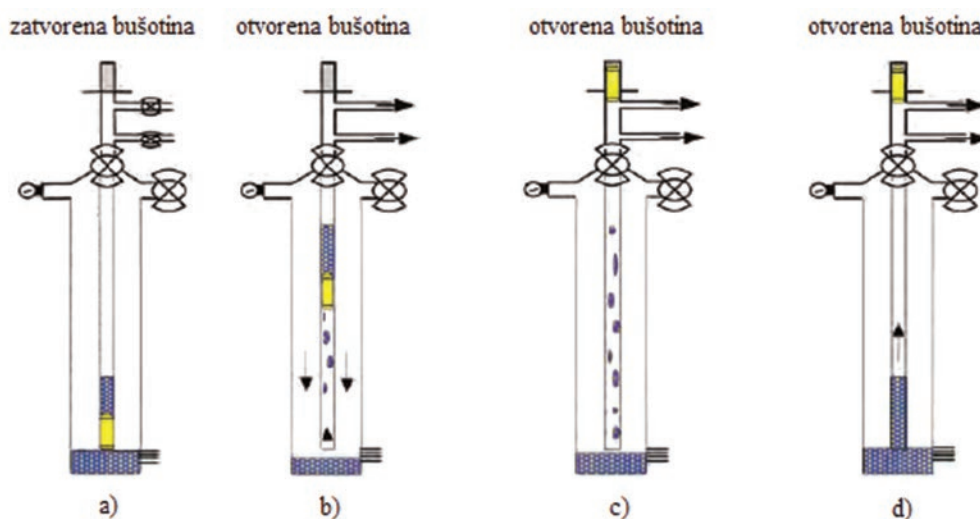
Rad klipnog lifta temelji se na klipu koji se slobodno kreće u bušotini kretanjem prema dolje i podizanjem prema gore. Klip, najjednostavnije opisan kao čelični element promjera gotovo identičnog unutarnjem promjeru tubinga, zahtijeva malu brzinu kretanja kako bi uspješno iznosio kapljevину na površinu. Ova karakteristika predstavlja ključnu razliku primjene klipnog lifta i bušotina u kojima se kapljevina podiže plinom bez primjene klipa, gdje su potrebne izrazito velike brzine strujanja plina. Klip predstavlja prepreku između kapljevine i plina koji ga podiže i

ujedno sprječava zaostajanje kapljevine. (Guo et al., 2007).

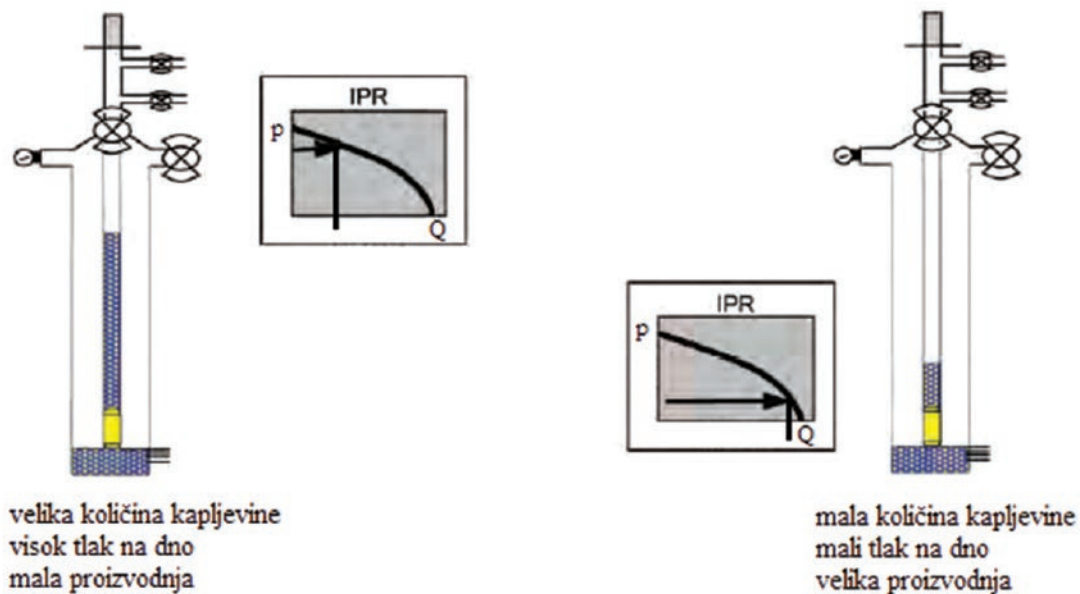
Ciklus klipnog lifta, prikazan na slici 1., započinje privremenim zatvaranjem bušotine kada se klip spušta s vrha na dno bušotine. U isto vrijeme, u bušotini se povećava tlak plina koji se nalazi unutar zaštitnih cijevi (a). Bušotina mora ostati zatvorena toliko dugo dok tlak ne dosegne dostatnu razinu da podigne klip i čep kapljevine koji se nalazi iznad klipa. Nakon toga bušotina se otvara, ponovno se uspostavlja protok i započinje rasterećivanje bušotine od kapljevine. Određeno vrijeme nakon otvaranja bušotine, klip se, zajedno s kapljevinom, kreće prema ušću (b). Pri dolasku na vrh, kapljevina se odvoji, a klip ostaje zadržan u hvataču klipa, odnosno lubrikatoru (c). Dijelovi sustava ostaju u ovoj poziciji dok se brzine plina ne spuste na kritičnu razinu kada se kapljevina ponovno nakuplja unutar bušotine (d). Ponovnim zatvaranjem bušotine cijeli proces se ponavlja.

Maksimalan tlak unutar zaštitnih cijevi se postiže neposredno prije otvaranja bušotine, dok je tlak u uzlaznom nizu (tubingu) u tom trenutku manji od tlaka unutar zaštitnih cijevi. Otvaranjem bušotine, tlak u tubingu iznad kretajućeg klipa pada na razinu priključnog cjevovoda, dok se tlak unutar zaštitnih cijevi i tubingu ispod klipa smanjuje dok klip ne dosegne ušće. Tlak u zaštitnim cijevima je tada na minimumu (Guo et al., 2007).

Kao što je već spomenuto, način na koji će se dobiti maksimalna proizvodnja je osigurati najniži mogući tlak na dno bušotine. Pri tome se vodi računa o količini kapljevine koja se može iznijeti, s obzirom da sila s gornje strane klipa ima suprotan smjer od sile s donje strane klipa. U praksi to znači da vrijeme tijekom kojeg



Slika 1. Ciklus rada klipnog lifta (Lake, 2007)



Slika 2. Utjecaj težine kapljevine iznad klipa na proizvodnju (Lake, 2007)

je bušotina zatvorena treba biti dovoljno da se akumulira tlak te podigne klip i kapljevina (Lake, 2007).

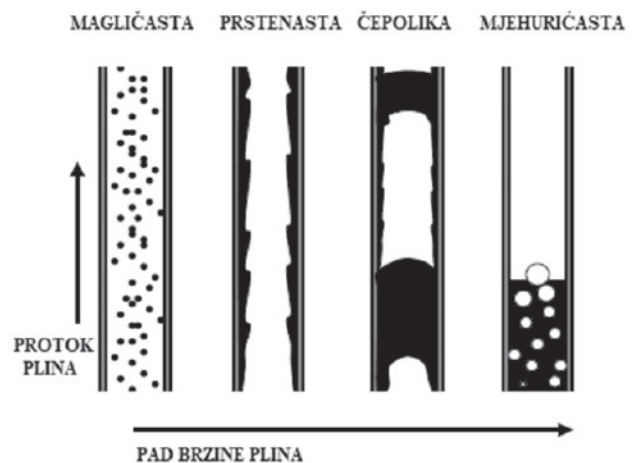
Na slici 2. prikazan je utjecaj težine kapljevine nad klipom na proizvodnju. Može se zaključiti da će pri većem obroku kapljevine IPR krivulja rezultirati manjom proizvodnjom zbog većeg dinamičkog tlaka na dno. Suprotno tome, smanjenje obroka kapljevine konačno će povećati depresiju na sloj i proizvodnju.

### 2.1. Primjena klipnog lifta

Tijekom rane faze proizvodnje u plinskim bušotinama u kojima postoji i dotok kapljevine te u naftnim bušotinama s visokim plinskim faktorom (GLR) brzine podizanja plina su najčešće dovoljno visoke kako bi bušotina uspješno iznosila kapljevinu. U ovoj fazi, kapljevina ulazi u bušotinu u magličastoj formi zajedno s plinom. Turbulentan tok i velike brzine osiguravaju efektivan mehanizam podizanja te kapljevine i bušotina proizvodi ravnomjernim, odnosno stalnim protokom (slika 3.).

Kako se tlak u ležištu tijekom proizvodnje smanjuje, struktura dvofaznog protjecanja se mijenja. Kapljevina više nije u magličastoj formi, te se prislonjena uz stjenku tubinga i dalje podiže prema izlazu iz bušotine, no u nešto manje efektivnoj mjeri. Daljnjim smanjenjem tlaka u bušotini i opadanjem brzine kapljevine uz stjenke tubinga djelovanjem gravitacije, kapljevina kreće zaostajati u bušotini. "Čepovi" kapljevine koji se kreću stvarati kao rezultat ove pojave, uzrokuju porast tlaka uzlaznog plina koji nakon određenog vremena

savlada hidrostatski tlak "čepova" te shodno tome dolazi do pulzirajućeg davanja kapljevine iz bušotine.



Slika 3. Struktura dvofaznog protjecanja u bušotini (Guo et al., 2007)

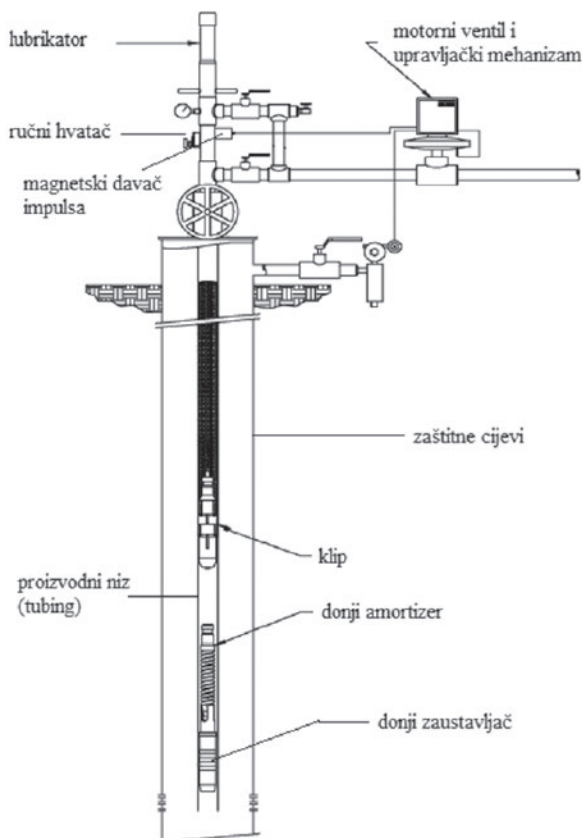
Dio zaostale kapljevine zajedno s onom koja dolazi iz ležišta, formira nove "čepove" te dolazi do ponavljanja cijelog procesa. Utvrđeno je da ovakvim periodičnim procesom u bušotini dubine oko 3000 metara, može zaostati i do 70% kapljevine, što može uzrokovati čak i prestanak proizvodnje (Lake, 2007).

Kako bi se uspješno nadvladao problem manje brzine plina tijekom proizvodnje, koristi se klipni lift koji se za svoj rad više oslanja na sposobnost bušotine da akumulira dovoljno tlaka za podizanje klipa i "čepa" kapljevine.

### 3. Dijelovi klipnog lifta

Tipska konstrukcija sustava za podizanje kapljevine pomoću klipnog lifta sastoji se od sljedećih dijelova: (slika 4.)

- zaštitne cijevi (*engl. casing*);
- uzlazne cijevi (*engl. tubing*);
- donji zaustavljač (*engl. stopper*);
- donji amortizer (*engl. bumper*);
- klip;
- magnetski davač impulsa;
- ručni hvatač;
- lubrikator s gornjim amortizerom;
- uređaj za kontrolu rada koji se sastoji od motornog ventila i upravljačkog mehanizma za regulaciju rada.



Slika 4. Dijelovi klipnog lifta (Guo et al., 2007)

## 4. Primjena klipnog lifta

### 4.1. Uklanjanje kapljevine iz plinskih bušotina

Gotovo sve plinske bušotine su u određenom razdoblju svog radnog vijeka podložne dotoku kapljevine u bušotinu. Sve dok su uvjeti u bušotini takvi da omogućavaju relativno veliku brzinu protoka u uzlaznom nizu, kapljevina i plin se iznose u obliku

dvofaznog protoka. Nakon doseganja kritične brzine dvofaznog toka, kapljevina počinje zaostajati te se skuplja na dnu bušotine. Ovu kritičnu brzinu opisali su Turner et al. (1969) kao ovisnost o dinamičkom tlaku na ušću bušotine, vrsti kapljevine (voda, kondenzat itd.), temperaturi te promjeru uzlaznog niza.

Smanjenjem brzine ispod kritične, bušotina iznosi kapljevinu u obliku manjih čepova što se na uređaju za mjerenje protoka evidentira kao pulzirajuće davanje bušotine. Druge indikacije su česta potreba za ispuhivanjem bušotine te smanjenje proizvodnje. Ako se ubrzo ne poduzmu potrebne mjere, problem se pogoršava te u konačnici može doći do zapunjenja bušotine kapljevinom i prestanka proizvodnje.

Navedeni problem može se riješiti upotrebom klipnog lifta. Primjećivanjem nakupljanja kapljevine na dnu, bušotina se privremeno zatvara. Kada se dotokom nakupi dovoljno plina u prstenastom prostoru, bušotina se otvara te se kapljevina nakupljena iznad klipa iznosi zajedno s klipom. Akumulirani tlak i uzlazna brzina klipa moraju biti dovoljni kako bi se nadvladali svi otpori (Beauregard i Ferguson 1982).

Dolaskom klipa na ušće bušotine, kapljevina je potpuno iznesena iz uzlaznog niza. Također, javljaju se najmanji otpori protoku iz formacije. Nakon određenog vremena nakupljanje vode se ponavlja, pa je potrebno odrediti vremenski ciklus ponavljanja kojim će se uklanjati manje količine kapljevine. Primjenom ovog sistema može se očekivati povećanje ukupne (kumulativne) proizvodnje.

### 4.2. Uklanjanje parafina iz bušotine

Parafin se počinje formirati u obliku filma mikroskopskih veličina ispod temperature oko 35 °C (Beauregard i Ferguson, 1982). Samo stvaranje parafina ne predstavlja problem, no akumulacija tijekom vremena u obliku debljih slojeva će uzrokovati smanjenje proizvodnje. Ovaj se efekt pojačava hlađenjem uzrokovanim ekspanzijom plina u tubing (Joule – Thomson efekt).

Ovaj problem se prilično jednostavno može riješiti u bušotinama s dovoljno visokim plinskim faktorom (GLR-om). Ugradnjom donjeg zaustavljača i donjeg amortizera ispod mjesta stvaranja parafina, klip će svojim prolaskom nekoliko puta dnevno ukloniti nastali sloj parafina. Klip će puno učinkovitije sprječavati stvaranje akumulacija parafina konstantnim mehaničkim djelovanjem po stijenci tubinga, nego što će uklanjati već postojeće akumulacije parafina.

Primjerice, na bušotini QG-25 na polju Quimare u Anaco okrugu u Venezueli instaliran je sustav klipnog lifta kako bi se riješio postojeći problem intenzivnog nakupljanja parafina u bušotini. Lokacija ove bušotine je bila prilično udaljena od logističkog centra, što je uzrokovalo visoke cijene učestalih remonata. Prije ugradnje sustava klipnog lifta proizvodnja je iznosila oko 6.5 m/dan proizvedenog fluida. Nakon ugradnje klipnog lifta proizvodnja je dosegla vrijednost od 40 m/dan (Narvaez i Ferrer, 1991).

### 4.3. Proizvodnja u naftnim bušotinama

Kada se klipni lift primjenjuje u naftnim bušotinama, koncept uklanjanja kapljevine iz bušotine ostaje isti kao i kod plinskih bušotina, samo u ovom slučaju ima drukčiju svrhu. Kao i u bušotinama koje proizvode plin, i u ovom slučaju energija za pogon klipa dolazi od plina. Primjena klipnog lifta za proizvodnju kapljevine odnosi se na (Beauregard i Ferguson, 1982):

- bušotine s niskim dinamičkim tlakom na dnu ( $p_{wf}$ ) i visokom proizvodnošću, te
- bušotine s visokim dinamičkim tlakom na dnu ( $p_{wf}$ ) i niskom proizvodnošću

#### 4.3.1. Primjena klipnog lifta u bušotinama s niskim dinamičkim tlakom na dnu i visokom proizvodnošću

Bušotina s niskim  $p_{wf}$  - om će prestati s kontinuiranim protokom kada sama bušotina više ne može podržati dovoljnu uzlaznu brzinu kapljevine nužnu za podizanje. Pri tome se javljaju već navedeni problemi kao što su pulzirajuće davanje bušotine. Ovakve bušotine u pravilu imaju veliko davanje plina. Klipni lift, koji je ugrađen u ovakvim bušotinskim uvjetima, treba što češće obavljati radni ciklus. Klip pri tome ima kratko vrijeme padanja i dizanja, te je moguće da pri tome iznosi i samo nekoliko litara kapljevine, no zbog visoke proizvodnosti, u njoj će se vrlo brzo stvoriti novi obrok kapljevine za brzi ponovni ciklus. Pri tome je potrebno brzo zatvoriti bušotinu odmah po dolasku klipa u lubrikator kako bi se prestankom protoka akumulirao tlak potreban za idući ciklus (Beauregard i Ferguson, 2007).

Ovakvom primjenom klipnog lifta rezultati su vrlo brzo vidljivi. Povećanje u proizvodnji će ovisiti o IPR (*engl. Inflow Performance Relationship*) krivulji, no nerijetko se proizvodnja i udvostruči. IPR krivulja predstavlja ovisnost dinamičkog tlaka na dnu bušotine ( $p_{wf}$ ) i davanja bušotine (Beauregard i Ferguson, 2007).

#### 4.3.2. Primjena klipnog lifta u bušotinama s visokim dinamičkim tlakom na dnu i niskom proizvodnošću

Za razliku od prethodno navedenog slučaja, bušotine s visokim  $p_{wf}$  - om i niske proizvodnosti najčešće imaju nisku proizvodnju plina. Davanja bušotine su vrlo promjenjiva pri proizvodnji fluida. Oprema je vrlo slična kao i kod prethodne primjene, no jedina razlika je u klipu koji se koristi. Zbog toga što se ciklus neće obaviti brzo, na klipu nije potrebno imati mimoprotetni ventil (*engl. by-pass*).

Tlak akumuliran ispod klipa treba biti veći jer se iznosi veći obrok kapljevine, no količina plina koja je dostupna za podizanje je manja. Zbog toga je u ovom slučaju najčešće potreban vanjski izvor plina koji će pokretati klip. Također, potrebno je pri detekciji dolaska klipa u lubrikator što prije zatvoriti bušotina kako bi se minimalizirao utrošak vanjskog plina, a samim time i trošak proizvodnje. Primjenom sustava klipnog lifta u ovakvim uvjetima postiže se konzistentna proizvodnja (Beauregard i Ferguson, 2007).

### 4.4. Povećanje učinkovitosti povremenog plinskog lifta

Učinkovitost povremenog plinskog lifta ovisi o promjeru i duljini proizvodnog niza kroz koji prolazi obrok kapljevine. Kretanje kapljevine uz samu stjenku tubinga uzrokuje trenje, te tijekom vremena taj obrok primi konusni oblik ispod kojeg se nalazi plin. Također, močenje stjenke tubinga te kapljevina koja je izgubila uzlaznu brzinu uzrokuju zaostajanje kapljevite faze. Uzlazna brzina kapljevine ovisi o tlaku utiskivanja plina i protutlaku na ušću bušotine. Ovisno o ovim parametrima, učinkovitost metode povremenog plinskog lifta kreće se između 30% do 60% (Beauregard i Ferguson, 1982). Navedeni problemi se manifestiraju u povećanju dinamičkog tlaka na dno, što uzrokuje smanjenje depresije, te konačno i smanjenje proizvodnje.

Navedeni problemi se iznimno uspješno rješavaju ugradnjom sustava klipnog lifta neposredno iznad ventila za plinski lift. Pri otvaranju ventila, plin se utiskuje ispod klipa, iznad kojeg se nalazi obrok kapljevine. Zbog toga što je tlak ispod klipa veći nego iznad njega, u ovom slučaju neće biti zaostajanja kapljevine. Štoviše, mala količina plina će kliziti između klipa i tubinga zbog nesavršenosti brtvljenja.

Prednosti ovakve metode vrlo su brzo vidljivi, te se učinkovitost plinskog lifta podiže gotovo do maksimuma. Prednosti uključuju:

- smanjenje potrebnog plina potrebnog za injektiranje,
- manji troškovi održavanja kompresorskih jedinica,
- manji dinamički tlak na dnu bušotine,
- manje taloženje parafina na stjenkama uzlaznog niza.

#### 4.5. Podizanje kapljevine u bušotinama bez tubinga

Bušotine koje su uspješno proizvodile metodom klipnog lifta, tijekom vremena dosegnu određenu minimalnu razinu tlaka ispod koje klipni lift više ne može djelovati. Također, dosezanjem ekonomskog limita isplativosti završava, privremeno ili stalno, proizvodnja iz bušotine. Jedan od razloga zbog čega se doseže ekonomski limit isplativosti je visoka cijena mehaničkih metoda podizanja. Dubinske crpke zahtijevaju složenije održavanje i veći broj remontnih radova od metode klipnog lifta, no i metoda plinskog lifta ima nedostatke kao što su velika potrebna količina plina i trošak komprimiranja plina.

Cilj ugradnje klipnog lifta unutar zaštitnih cijevi je koristan iskorištavanje većeg poprečnog presjeka zaštitnih cijevi nego tubinga. Ovaj način ugradnje dopušta da se kapljevina podiže uz manji potrebni tlak nego u tubingu.

Primjerice, neovisni proizvođač na polju u Hendersonu (Texas, SAD) koristio je dubinske sisaljke s klipnim šipkama. Približavanjem proizvodnje ekonomskom limitu zbog visokih cijena goriva za pogon motora, servisa pogonskog uređaja dubinske crpke i vađenja klipnih šipki tri puta godišnje, sustav je zamijenjen klipnim liftom ugrađenim u zaštitne cijevi. Mjerenjem se nije registriralo povećanje proizvodnje, no sustav klipnog lifta je uspio zadržati istu količinu proizvodnje kao i dubinske sisaljke uz manje operativne troškove (Beauregard i Morrow, 1989).

Troškovi proizvodnje su se drastično smanjili zbog toga što ugradnjom klipnog lifta nije bio potreban vanjski izvor energije. Također, klipni lift ima samo jedan pomični dio, što znači da će troškovi servisa biti manji. Troškovi vađenja (uklanjanja) dubinskih crpki s lokaliteta (što je uključivalo uklanjanje uzlaznog niza, klipnih šipki, njihalice, pogonskog sustava i sanaciju terena) dvostruko je prelazila ukupno kapitalno ulaganje potrebno za sustav klipnog lifta ugrađen unutar zaštitnih cijevi (Beauregard i Morrow, 1989).

#### 4.6. Sprječavanje stvaranja metanskih hidrata na dnu bušotina s visokim tlakom

Stvaranje hidrata na dnu bušotine je funkcija odnosa tlaka u bušotini i temperature. To znači da se povećanjem tlaka povećava i temperatura na kojoj se stvaraju hidrati. Stvaranje hidrata može uzrokovati začepljenje bušotine po poprečnom presjeku. Nakon što se bušotina začepi, povećava se tlak ispod mjesta začepljenja, te se time formiraju uvjeti za nastanak još veće količine leda. Ovaj problem se osobito pojavljuje u području slojeva ugljena koji zbog temperaturne anomalije sadržavaju hladnu vodu.

Osim što se na ovaj način uzrokuje smanjenje proizvodnja, raste i sigurnosni rizik kod pokušaja da se ukloni nastala blokada. Inicijalni pokušaj rješavanja problema bilo je kontinuirano utiskivanje metanola u bušotinu kako bi se spriječilo smrzavanje. Ovaj način se pokazao ekonomski neisplativim (Beauregard i Morrow, 1989).

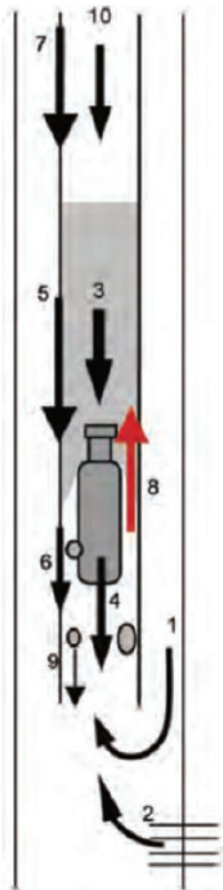
Klipni lift se pokazao korisnim u uklanjanju metanskih hidrata primjenom dvaju elektronskih kontrolera, jednog koji regulira protok kombinacijom tlačne i vremenske regulacije te drugi koji kontrolira pneumatsku crpku za utiskivanje metanola. Podešavanjem djelovanja ova dva kontrolera, omogućeno je sinkronizirano kretanje klipa i utiskivanje metanola. Dok je klip pozicioniran na dnu bušotine, utiskuje se metanol kroz tubing te odlazi u područje hladne vode i sprječava formiranje leda. Sljedećim uzlaznim kretanjem klipa ova se otopljena smjesa iznosi iz uzlaznog niza (Beauregard i Morrow, 1989).

### 5. Metode proračuna ugradnje klipnog lifta

Najveći dio proračuna ugradnje klipnog lifta temelji se na proračunu sila koje djeluju na klip dok se on giba prema gore u tubing u (Lake, 2007). Sile koje se pri tome javljaju u bilo kojem zadanom trenutku prikazane su na slici 5.

#### 5.1. Foss & Gaul-ova metoda proračuna ugradnje klipnog lifta

Metoda proračuna ugradnje klipnog lifta nazvana prema autorima Fossu i Gaulu temelji se na izračunu potrebnog tlaka u prstenastom prostoru za kretanje i iznošenje kapljevine. Kada klip dosegne ušće bušotine, odnosno lubrikator, doseže se kraj ciklusa



Slika 5. Sile koje djeluju na klip u uzlaznoj putanji (Lake, 2007).

klipnog lifta, te je u tom trenutku tlak u zaštitnim cijevima (prstenastom prostoru) najmanji. Kako bi se odredio ovaj tlak potrebno je poznavati i tlak u prstenastom prostoru potreban za pokretanje klipa na početku ciklusa.

Parametri koji se izračunavaju su prosječni tlak u prstenastom prostoru, maksimalni broj ciklusa i količina plina potrebna za jedan ciklus.

Minimalni tlak u prstenastom prostoru računa se prema jednadžbi (Lake, 2007):

$$(p_c)_{min} = [p_p + p_t + (p_{ih} + p_{if}) * S] \left( 1 + 20,6359 * \frac{H}{K} \right)$$

gdje su:

- $(p_c)_{min}$  - minimalni tlak na ušću prstenastog prostora, bar
- $p_p$  - tlak zbog težine klipa, bar
- $p_t$  - tlak u uzlaznom nizu, bar
- $(p_{ih} + p_{if})$  - zbroj diferencijalnog tlaka koji je potreban da se podigne kapljevine i diferencijalnog tlaka potrebnog da se svlada trenje

kapljevine pri podizanju po jedinici volumena, bar/m

- $S$  - volumen kapljevine koju klip iznosi po jednom ciklusu (dobava po ciklusu), m
- $H$  - dubina ugradnje klipnog lifta (dubina bušotine), m
- $K$  - koeficijent trenja plina (aproksimacija),  $(m^3)^{-1}$

Foss i Gaul preporučuju pretpostavku konstanti  $K$  i  $(p_{ih} + p_{if})$  za pojedine veličine tubinga, a prikazani su u tablici 5-1 (Lake, 2007).

Tablica 1: Aproximacija parametara  $K$  i  $(p_{ih} + p_{if})$  obzirom na pojedine veličine tubinga (Lake, 2007)

Unutarnji promjer tubinga [mm]	$K$ [m]	$(p_{ih} + p_{if})$ , [bar/ m]
50,6730	210708,769	71,5552
62,0014	283041,630	44,2341
75,9968	362293,286	27,3211

Tlak u prstenastom prostoru potreban da se klip pokrene računa se prema jednadžbi (Lake, 2007):

$$(p_c)_{max} = (p_c)_{min} * Ra$$

gdje su:

- $(p_c)_{max}$  - tlak u prstenastom prostoru potreban da se klip pokrene, bar

$$Ra = \frac{Aa + At}{Aa}$$

- $Aa$  - površina poprečnog presjeka prstenastog prostora, m
- $At$  - površina poprečnog presjeka tubinga definirana unutarnjim promjerom, m

Prosječni tlak u prstenastom prostoru tijekom ciklusa računa se prema jednadžbi (Lake, 2007):

$$\bar{p}_c = (p_c)_{min} \left( 1 + \frac{At}{2 * Aa} \right)$$

gdje je:

- $\bar{p}_c$  – prosječni tlak u prstenastom prostoru tijekom ciklusa, bar

Tlak potreban za podizanje klipa:

$$p_p = \frac{W_p}{At}$$

gdje su:

$p_p$  – tlak potreban za podizanje klipa, bar

$W_p$  – masa klipa, kg

Na temelju prethodno izračunatih tlakova, računa se količina plina potrebna za jedan ciklus (Lake, 2007):

$$V_g = Fgs * 0,98665 * \bar{p}_c * Vt * \left( \frac{520}{\frac{9}{5} * \bar{T}_g} \right) * \left( \frac{1}{Z} \right)$$

$$Fgs = 1 + \frac{D}{1000} * 0,0656$$

gdje su:

- $V_g$  – količina plina potrebna za jedan ciklus, m
- $D$  – duljina tubinga, m
- $Fgs$  – Foss-Gaul korekcijski faktor zbog proklizavanja plina
- $Vt$  – volumen ostatka uzlaznih cijevi iznad razine kapljevine nad klipom, m
- $\bar{T}_g$  – prosječna temperatura plina u bušotini tijekom podizanja klipa, K
- $Z$  – faktor kompresibilnosti
- $L$  – duljina 1 m kapljevine u uzlaznom nizu, m/m

Također, računa se i maksimalan broj radnih ciklusa u jednom danu (Lake, 2007):

$$Cmax = \frac{86400}{\frac{D - SL}{\bar{v}_{fg}} + \frac{D}{\bar{v}_r} + \frac{SL}{\bar{v}_{fl}}}$$

gdje su:

- $Cmax - Cmax$  – maksimalni mogući broj radnih ciklusa u danu
- $\bar{v}_{fg} - \bar{v}_{fg}$  – prosječna brzina klipa pri silaznom kretanju kroz plin, m/s

- $\bar{v}_r$  – prosječna brzina uzlaznog kretanja klipa, m/s
- $\bar{v}_{fl}$  – prosječna brzina klipa pri silaznom kretanju kroz kapljevину, m/s

Umnoškom maksimalnog broja ciklusa u danu i volumena kapljevine koju klip iznosi po jednom ciklusu dobiva se maksimalna dnevna proizvodnja (Lake, 2007):

$$Qmax = Cmax * S$$

gdje su:

- $Qmax$  – maksimalna dnevna proizvodnja, m
- $S$  – volumen kapljevine koju klip iznosi po jednom ciklusu (dobava po ciklusu), m

## 5.2. Primjer Foss & Gaul proračuna ugradnje klipnog lifta na bušotini poznatih proizvodnih parametara

U proračun je uvrštena pretpostavljena dobava kapljevine po ciklusu od 0,20 m. Ukoliko se proračunom ispostavi da je minimalni potrebni tlak u zaštitnim cijevima manji od ograničenja za odabrane zaštitne cijevi, te istodobno da je maksimalna dnevna proizvodnja veća od volumena kapljevine koju bušotina može dnevno proizvesti, pretpostavka je dovoljno točna za primjenu. U tablici 2. prikazani su podaci o bušotini koji su korišteni za proračun.

Tablica 2: Podaci o bušotini (Lake, 2007)

OZNAKA	PODACI O BUŠOTINI	
$D_t$	Vanjski promjer tubinga	0,060325 m
$d_t$	Unutarnji promjer tubinga	0,050673 m
$d_c$	Unutarnji promjer zaštitnih cijevi (vanjskog promjera 139.7 mm)	0,115824 m
H	Dubina ugradnje klipnog lifta	2150 m
Z	Faktor kompresibilnosti	0,99
$\bar{T}_g$	Prosječna temperatura plina u bušotini tijekom podizanja klipa	333,15 K



OZNAKA	PODACI O BUŠOTINI	
Wp	Masa klipa	4,536 kg
$\bar{v}_{fg}$	Prosječna brzina klipa pri silaznom kretanju kroz plin	3,81 m/s
$\bar{v}_{fl}$	Prosječna brzina klipa pri silaznom kretanju kroz kapljevину	0,762 m/s
$\bar{v}_r$	Prosječna brzina uzlaznog kretanja klipa	5,08 m/s
$p_t$	Tlak u tubingu na ušću	10,5 bar
S	Dobava po ciklusu (aproksimacija)	0,20 m
	Proizvodnja kapljevine	1,50 m/dan
	Dozvoljeni tlak u zaštitnim cijevima	55 bar

## Postupak proračuna:

### 1. Izračun poprečnog presjeka tubinga i prstenastog prostora te $RaRa$ odnosa:

$$At = \frac{d_t^2}{4} * \pi = \frac{0,050673^2}{4} * \pi = 0,0020167 \text{ m}^2$$

$$Aa = \left( \frac{d_c^2}{4} - \frac{D_t^2}{4} \right) * \pi = \left( \frac{0,115824^2}{4} - \frac{0,060325^2}{4} \right) = 0,007678 \text{ m}^2$$

$$Ra = \frac{At + Aa}{Aa} = \frac{0,0020167 + 0,007678}{0,007678} = 1,263$$

### 2. Izračun tlaka potrebnog za podizanje klipa:

$$p_p = \frac{Wp}{At} = \frac{4,536}{0,0020167} = 0,02249 \text{ bar}$$

### 3. Izračun potrebnog minimalnog tlaka u prstenastom prostoru:

$$(p_c)_{min} = [p_p + p_t + (p_{th} + p_{tf}) * S] \left( 1 + 20,6359 * \frac{H}{K} \right)$$

$$= [0,02249 + 10,50 + 71,5552 * 0,20] * \left( 1 + 20,6359 * \frac{2150}{210708,769} \right)$$

$$(p_c)_{min} = 30,0625 \text{ bar}$$

### 4. Izračun tlaka u prstenastom prostoru za pokretanje klipa:

$$(p_c)_{max} = (p_c)_{min} * Ra = 27,89 * 1,263$$

$$(p_c)_{max} = 37,9690 \text{ bar}$$

### 5. Izračun prosječnog tlaka u prstenastom prostoru:

$$\bar{p}_c = (p_c)_{min} \left( 1 + \frac{At}{2 * Aa} \right) = 30,0625 * \left( 1 + \frac{0,0020167}{2 * 0,007678} \right)$$

$$= 34,0106 \text{ bar}$$

### 6. Izračun duljine 1 m<sup>3</sup>m<sup>3</sup> kapljevine u uzlaznoj cijevi:

$$L = \frac{1}{0,0020167} = 495,86 \text{ m/m}^3$$

### 7. Izračun volumena ostatka uzlaznih cijevi iznad razine kapljevine nad klipom:

$$Vt = At * (D - S * L) = 0,0020167 * (2150 - 0,20 * 495,86)$$

$$Vt = 4,1359 \text{ m}^3$$

### 8. Izračun Foss & Gaul korekcijskog faktora zbog proklizavanja plina:

$$Fgs = 1 + \frac{H}{1000} * 0,0656 = 1 + \frac{2150}{1000} * 0,0656$$

$$= 1,14104$$

### 9. Količina plina potrebna za jedan ciklus:

$$Vg = Fgs * 0,98665 * \bar{p}_c * Vt * \left( \frac{520}{9 * \bar{T}_g} \right) * \left( \frac{1}{Z} \right)$$

$$= 1,14104 * 0,98665 * 31,5495 * 4,1359 * \left( \frac{520}{9 * 333,15} \right) * \left( \frac{1}{0,99} \right)$$

$$Vg = 128,67 \text{ m}^3$$

## 10. Izračun maksimalnog broja radnih ciklusa u jednom danu.

$$C_{max} = \frac{86400}{\frac{H-SL}{\bar{v}_{fa}} + \frac{H}{\bar{v}_r} + \frac{SL}{\bar{v}_{fl}}} = \frac{86400}{\frac{2150 - 0,20 * 495,86}{3,81} + \frac{2150}{5,08} + \frac{0,20 * 495,86}{0,762}}$$

$$C_{max} = 79 \text{ ciklusa/dan}$$

## 11. Izračun maksimalne dnevne proizvodnje kapljevine:

$$Q_{max} = C_{max} * S = 79 * 0,2 = 15,8 \text{ m}^3$$

Proračunom je utvrđeno kako je maksimalna moguća proizvodnja po danu 15,8 m<sup>3</sup> kapljevine, dok je dotok kapljevine u bušotinu 1,50 m/dan. Također, maksimalan potreban tlak u zaštitnim cijevima iznosi 37,97 bar, dok je dozvoljeni tlak u zaštitnim cijevima 55 bar. Sukladno tome, pretpostavka da ćemo klipom iznositi 0,20 m kapljevine je tehnički izvediva. Dobava kapljevine po jednom ciklusu računata na temelju drugih pretpostavki prikazane su u tablici 3.

Tablica 3: Dodatne aproksimacije dobave kapljevine po ciklusu

S (pretpostavljeno), m	(p) <sub>max</sub> , bar	Q <sub>max</sub> , m	Valjanost pretpostavke
0,05	21,5584	4,25	✓
0,50	70,7900	34,50	✗
0,30	48,9093	22,50	✓
0,01	17,1823	0,87	✗

## 6. Zaključak

Klipni lift je jedan od najekonomičnijih sustava za umjetno podizanje kapljevine. Osim što se koristi za proizvodnju nafte i plina, koristi se i za pomoćne svrhe kao što su uklanjanje parafina i sprječavanje stvaranja metanskih hidrata.

Prednosti klipnog lifta su ekonomičnost s obzirom na ostale metode umjetnog podizanja kapljevine jer se podizanje kapljevine može obavljati i pri izuzetno niskim tlakovima. Također, moguća je primjena u bušotinama s visokim GLR-om te primjena u bušotinama s niskim indeksom proizvodnosti. Oprema u naftnim i plinskim bušotinama opremljene sustavom plinskog lifta je vrlo slična, što pridonosi jednostavnosti ove metode. S druge strane, negativne strane klipnog lifta su problemi u primjeni u uvjetima dotoka pijeska, te otežana detekcija nakupljanja kapljevine u bušotini.

Na temelju Foss & Gaul-ove metode proračuna na bušotini poznatih proizvodnih parametara moguće je utvrditi količinu kapljevine koja se može proizvesti primjenom klipnog lifta. Konačni izračun moguće proizvodnje u obzir uzima i tehničke parametre bušotine, kao što su količina plina i potreban tlak u prstenastom prostoru. Foss & Gaul-ovom metodom proračuna može se optimizirati proizvodnja na prilično jednostavan način, te je kao takva vrlo primjenjiva.

Sustav klipnog lifta je vrlo jednostavan te ima samo jedan pokretni dio – klip, što predstavlja prednost zbog rijetke potrebe za remontima. Također, klipni lift koristi energiju ležišta na racionalan način te omogućava iscrpljivanje ležišta gotovo do maksimuma.

## Literatura

1. BEAUREGARD, E., MORROW, S., 1989. *New and Unusual Applications for Plunger Lift System*. Richardson: Society of Petroleum Engineers.
2. BEAUREGARD, E., FERGUSON, P.L., 1982. *Introduction to Plunger Lift: Applications, Advantages and Limitations*. Dallas: Society of Petroleum Engineers.
3. GUO, B., LYONS, W.C., GHALAMBOR, A., 2007. *Petroleum Production Engineering: A Computer-Assisted Approach*. Burlington: Gulf Professional Publishing.
4. LAKE, L.W., 2007. *Production Engineering Handbook: Production Operations Engineering*. Richardson: Society of Petroleum Engineers.
5. NARVAEZ, C., A.A. FERRER, 1991. *Prevention of Paraffin Well Plugging by Plunger-Lift Use*. Richardson: Society of Petroleum Engineers.
6. MORROW, S.J. JR., ROGERS, J.R. JR., 1992. *Increasing Production Using Microprocessors and Tracking Plunger-Lift Velocity*. Amarillo: Society of Petroleum Engineers.
7. LEA, J.F., ROWLAN, O.L., MCCOY, J.N., 2009. *Modified Foss and Gaul Model Accurately Predicts Plunger Rise Velocity*. Oklahoma City: Society of Petroleum Engineers.
8. TURNER, R.G., HUBBARD, M.G., DUKLER, A.E., 1969. *Analysis and Prediction of Minimum Flow Rate for the Continuous Removal of Liquids from Gas Wells*. Journal of Petroleum Engineers.