

# Utjecaj plina i pijeska na djelotvornost rada dubinskih sisaljki

---

**Radišić, Ante**

**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:169:966454>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**UTJECAJ PLINA I PIJESKA NA DJELOTVORNOST RADA DUBINSKIH SISALJKI**

Završni rad

Ante Radišić

N4228

Zagreb, 2020.

## UTJECAJ PLINA I PIJESKA NA DJELOTVORNOST RADA DUBINSKIH SISALJKI

ANTE RADIŠIĆ

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

### Sažetak

Proizvodnja nafte dubinskim sisaljkama jedna je od najstarijih i najraširenijih metoda mehaničkog podizanja kapljevine iz bušotine. Osnovni princip djelovanja ove metode jest prijenos pogonske energije s površine do dubine postavljanja dubinske sisaljke. Prodor plina zajedno s kapljevinoom te ulazak pijeska iz ležišta u prostor sisaljke predstavlja neizbježan problem prilikom korištenja ove mehaničke metode. Samim time, podizanje kapljevine u takvim uvjetima uvelike utječe na djelotvornost i trošenje pokretnih i fiksnih elemenata dubinske sisaljke. Tema ovog završnog rada jest prikazati utjecaj plina i pijeska na rad i trošenje dubinskih sisaljki te navesti prikladna rješenja za pojedinu situaciju.

Ključne riječi: dubinska sisaljka, plin, plinska sidra, pijesak

Završni rad sadrži: 35 stranica, 14 slika i 12 referenci  
Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

Datum obrane: 11.9.2020.,

Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	II
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA</b> .....	II
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. DUBINSKE SISALJKE S KLIPNIM ŠIPKAMA</b> .....	2
<b>2.1. Karakteristike sustava proizvodnje nafte dubinskim sisaljka</b> .....	2
<b>2.2. Konstrukcija dubinskih sisaljki s klipnim šipkama</b> .....	3
<b>3. UTJECAJ PLINA NA RAD SISALJKI</b> .....	8
<b>3.1. Podrijetlo plina</b> .....	8
<b>3.2. Volumetrijska djelotvornost sisaljke</b> .....	9
<b>3.3. Hidraulički udar</b> .....	13
<b>3.4. Plinski čep</b> .....	15
<b>3.5. Rješenja za sprečavanje utjecaja plina na djelotvornost rada sisaljke</b> .....	15
3.5.1. <i>Tehnička rješenja-plinska sidra</i> .....	16
3.5.2. <i>Prirodno ili uronjeno plinsko sidro</i> .....	18
3.5.3. <i>Sidro s pakerom</i> .....	19
3.5.4. <i>Jednodijelno plinsko sidro</i> .....	20
3.5.5. <i>Tanjurasto plinsko sidro</i> .....	22
3.5.6. <i>Vijčasto plinsko sidro</i> .....	22
<b>4. UTJECAJ PIJESKA NA RAD SISALJKI</b> .....	24
<b>4.1. Podrijetlo pijeska</b> .....	25
<b>4.2. Zakonitost sedimentiranja čestice pijeska</b> .....	26
<b>4.3. Djelovanje pijeska na rad dubinskih sisaljki</b> .....	27
<b>4.4. Pješčana sidra i specijalne sisaljke</b> .....	29
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	33
<b>6. LITERATURA</b> .....	35

## POPIS SLIKA

Slika 2 - 1. Shematski prikaz nadzemne i podzemne opreme proizvodne bušotine opremljene dubinskom sisaljkom s klipnim šipkama.....	4
Slika 2 - 2. Faze crpljenja kapljevine .....	8
Slika 3 - 1. Prikaz hidrauličkog udara .....	14
Slika 3 - 2. Lom sjedišta usisnog ventila .....	14
Slika 3 - 3. Prirodno ili uronjeno plinsko sidro .....	19
Slika 3 - 4. Sidro s pakerom .....	20
Slika 3 - 5. Jednodijelno plinsko sidro .....	21
Slika 3 - 6. Tanjurasto plinsko sidro.....	22
Slika 3 - 7. Vijčasto plinsko sidro .....	23
Slika 4 - 1. Istrošena metalna površina klipa sisaljke.....	28
Slika 4 - 2. Oštećenje klipne šipke .....	28
Slika 4 - 3. Izravno pješćano sidro .....	30
Slika 4 - 4. Neizravno pješćano sidro .....	31
Slika 4 - 5. Sisaljka s tri cijevi .....	32

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

API – Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute*)

OPEX – operativni troškovi, troškovi održavanja (engl. *operating expenses*)

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

$A_p$  – površina poprečnog presjeka klipa,  $m^2$

$A_{ps}$  – površina poprečnog presjeka prstenastog prostora u sidru kroz koje protječe kapljevina,  $m^2$

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

$B_o$  – volumetrijski faktor nafte,  $m^3/m^3$

$B_w$  – volumetrijski faktor vode,  $m^3/m^3$

$C_e$  – empirijska konstanta

$d_c$  – srednji promjer čestice, m

$F_d$  – sila trenja, N

$g$  – ubrzanje sile teže,  $m/s^2$

GOR – omjer otopljenog plina u nafti,  $m^3/m^3$  (engl. *Gas-to-Oil Ratio*)

$k_c$  – koeficijent separacije

$N$  – broj hodova klipa u minuti

$p$  – apsolutni tlak plina, bar

$p$  – ulazni tlak, odnosno tlak ispod sisaljke, bar

$p_0$  – standardni tlak, bar

$q_g$  – ukupna količina plina u nafti (slobodni + otopljeni),  $m^3/d$

$q_{gp}$  – količina slobodnog plina koji ulazi u sisaljku,  $m^3/d$

$q_{gpp}$  – količina slobodnog plina koji ulazi u sisaljku nakon separacije,  $m^3/d$

$q_{gs}$  – količina otopljenog plina pri tlaku na dubini uranjanja,  $m^3/d$

$(q_g)_{sep}$  – separirana (slobodna) količina plina,  $m^3/d$

$q_L$  – količina kapljevine koja ulazi u sisaljku,  $m^3/d$

$q_o$  – proizvodnja nafte,  $m^3/d$

$q_t$  – teoretski kapacitet sisaljke,  $m^3/d$

$q_w$  – proizvodnja vode,  $m^3/d$

$R$  – radijus čestice, m

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

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

$S_p$  – duljina hoda klipa, m

$T$  – temperatura plina, K

$T_0$  – standardna temperatura, K

$v$  – brzina čestice, m/s

$v_{\check{c}}$  – brzina sedimentacije čestica, m/s

$v_{sl}$  – brzina protoka kapljevine kroz prstenasti prostor sidra svedeno na puni presjek prstenastog prostora sidra bez plina, m/s

$Z$  – faktor stlačivosti, popravni faktor plina

$\rho_{\check{c}}, \rho_l$  – gustoća pijeska, odnosno kapljevine, pod uvjetima separacije,  $kg/m^3$

$\mu$  – dinamička viskoznost fluida, Pas

$\mu_l$  – dinamička viskoznost kapljevine, Pas

$\eta$  – koeficijent korisnog učinka/volumetrijska djelotvornost sisaljke

$\eta$  – koeficijent punjenja sisaljke

$\eta_{sid}$  – koeficijent korisnog učinka sidra

## 1. UVOD

Naftne kompanije veliku važnost pridodaju segmentu proizvodnje nafte i plina u cilju pridobivanja maksimalne količine ležišnog fluida uz minimalne troškove proizvodnje. Na proizvodnju nafte i plina utječu geološko – fizikalne karakteristike ležišta, konstrukcija bušotine i ugrađena proizvodna oprema (Brkić, 2018). Postoji više metoda podizanja kapljevine od ležišta do površine, a sam odabir metode podizanja ovisit će o uvjetima u ležištu, ponajviše o ležišnom tlaku i izdašnosti ležišta. Metode podizanja ležišnog fluida do površine dijele se na eruptivnu i mehaničku metodu. Proizvodnja kapljevine eruptivnom metodom jest najoptimalnija jer je za podizanje kapljevine dovoljna energija ležišta. Nasuprot tome, mehaničke metode se upotrebljavaju kada je energija ležišta premalena da savlada otpor protjecanju kroz uzlazni niz cijevi (engl. *tubing*) do površine.

Proizvodnja fluida eruptivnim načinom odvija se prvotno iz ležišta u bušotinu zbog ostvarene depresije u sloju, zatim kroz uzlazni niz cijevi te konačno kroz priključne cijevi, odnosno naftovod. Kada je ležišni tlak nedovoljan za podizanje kapljevine uzlaznim nizom do površine, odnosno kada tlak protjecanja nije dovoljan za savladavanje padova tlaka u tubingu, prilazi se mehaničkim metodama proizvodnje. Mehaničke metode se dijele u dvije temeljne vrste: plinsko podizanje (plinski lift) i podizanje različitim vrstama dubinskih sisaljki. Optimizacija pridobivanja nafte uvelike je važna iz dvaju aspekata: povećanje energetske učinkovitosti samog ležišta te smanjenje troškova održavanja proizvodne bušotine, odnosno proizvodne opreme. Pojednostavljeno, usklađivanje proizvodnih mogućnosti ležišta s operativnim parametrima primijenjene metode proizvodnje je optimalni sustav podizanja (Zelić i Čikeš, 2006).

U primjeni mehaničkih metoda podizanja dubinskim sisaljka, razlikuju se više vrste sisaljki (sisaljke s klipnim šipkama, vijčasta sisaljka, centrifugalna sisaljka, mlazna sisaljka itd.). Najraširenija mehanička metoda korištena u svijetu jest podizanje kapljevine pomoću dubinskih sisaljki s klipnim šipkama. Kako prilikom rada dubinskih sisaljki dolazi do trošenja pokretnih i fiksnih dijelova samih sisaljki, potrebno je optimizirati rad sisaljki, ugraditi dodatnu opremu te kontrolirati proizvodne parametre. U ovom radu obradit će se podrijetlo plina i pijeska u bušotini, utjecaj plina i pijeska na djelotvornost dubinskih sisaljki te adekvatna rješenja za rješavanje takvih vrsta problema prilikom proizvodnje nafte.



## **2. DUBINSKE SISALJKE S KLIPNIM ŠIPKAMA**

Primarna proizvodnja nafte podrazumijeva iskorištavanje ležišta prirodnom slojnom energijom, odnosno ležišnim tlakom i energijom akumuliranom u stlačenom plinu. Najčešći prirodni režimi crpljenja nafte iz ležišta su (Matanović i Moslavac, 2011): vodonaporni režim, režim plinske kape i režim otopljenog plina. Kada jedan od režima crpljenja iskoristi većinu svog potencijala, odnosno kada energija ležišta nije dovoljna za proizvodnju fluida eruptivnim radom ili ako je proizvedena količina nafte manja od željene (optimizacija rada), prilazi se remontu bušotine i ugradnji opreme za mehaničko podizanje kapljevine.

### **2.1. Karakteristike sustava proizvodnje nafte dubinskim sisaljka**

Način mehaničkog podizanja nafte ponajviše ovisi o uvjetima u bušotini i ležištu, troškovima podizanja (operativni i remontni troškovi), dostupnosti opreme i preferencijama pojedine kompanije. Od primarne su važnosti bušotinski i ležišni pokazatelji: 1. dubina bušotine, 2. dotok fluida iz ležišta u kanal bušotine i 3. promjer tubinga i zaštitnih cijevi (Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson, 1993). Kako se u ovom radu obrađuju rad i djelotvornost dubinskih sisaljki s klipnim šipkama, važno je spomenuti par bitnih stavaka vezanih uz taj način umjetnog podizanja kapljevine.

Proizvodnja nafte dubinskim sisaljka s klipnim šipkama najstarija je i najzastupljenija mehanička metoda proizvodnje nafte kako kod nas, tako i u svijetu. Razlog tomu je vrlo jednostavan princip rada sisaljke, općenito u strojarskom smislu sisaljke su veoma star i iznimno zadovoljavajući stroj za podizanje kapljevine čiji je princip rada ostao praktički isti od antičkih vremena, te optimizacija, odnosno kontrola procesa proizvodnje i rada sisaljke. Osnovni princip djelovanja dubinske sisaljke temelji se na prijenosu pogonske energije s površine do razine uranjanja dubinske sisaljke mehaničkim načinom, tj. klipnim šipkama (Zelić i Čikeš, 2006).

Dubina ugradnje dubinskih sisaljki s klipnim šipkama kreće se u plitkim do srednje dubokim bušotinama dubine od 500 do 2500 metara s velikim rasponom davanja bušotine, odnosno s velikim indeksom proizvodnosti.

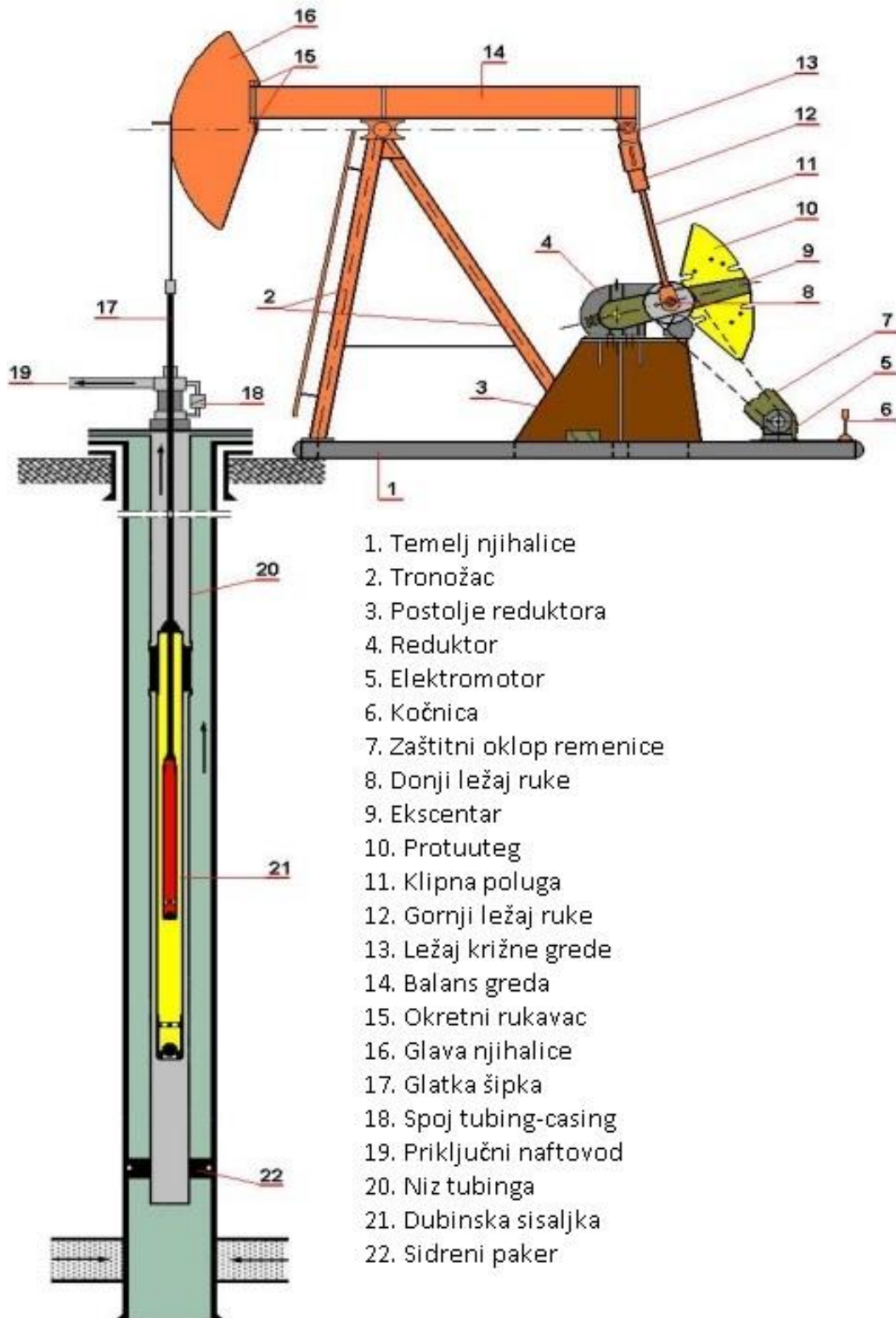
Pri procesu crpljenja nafte iz bušotina dubinskim sisaljka s klipnim šipkama na njene podzemne dijelove djeluju različite sile (Čikeš i Zelić, 2006):

- sila uzgona (Arhimedova sila), koja djeluje na klipne šipke i umanjuje im težinu;
- statička sila uslijed težine klipnih šipki, uzlaznih cijevi (tubinga) i stupca kapljevine;
- sila elastičnosti materijala klipnih šipki i stupca kapljevine;
- inercijske sile pri kretanju mase klipnih šipki, klipa i stupca kapljevine i
- sile trenja u koje se ubrajaju:
  - trenje spojnica klipnih šipki o stijenke uzlaznih cijevi te trenje klipa o stijenke cilindra dubinske sisaljke;
  - hidrodinamičko trenje između klipnih šipki i kapljevine i
  - unutarnje trenje u materijalu klipnih šipki i uzlaznih cijevi koje se javlja pri njihovoj deformaciji uslijed naprezanja.

Za dubinske sisaljke važno je naglasiti i dodatne parametre koji su bitni za lakši odabir i projektiranje sustava dubinske sisaljke. Neki od bitnih parametara su zakrivljenost bušotine, odnosno otklon od vertikalne osi, koja rezultira povećanjem djelovanjem sila (sila trenja) na podzemnu opremu; koliki je slojni omjer otopljenog plina i nafte, tzv. GOR (engl. *Gas-to-Oil Ratio*), u ovom slučaju sadržaj slobodnog plina te fizikalno-kemijska svojstva ležišnog fluida i ležišta, u ovom slučaju sadržaj proizvedenog pijeska (Brkić, 2018).

## **2.2. Konstrukcija dubinskih sisaljki s klipnim šipkama**

Kao što je već rečeno, proizvodnja nafte dubinskim sisaljka najraširenija je metoda mehaničkog podizanja kapljevine, s udjelom od oko 50% zastupljenosti na hrvatskim naftnim poljima. Osnovni sastav proizvodne opreme dubinske sisaljke (slika 2-1.) dijeli se na nadzemni i podzemni dio, nadzemni dio čine njihalica i glatka šipka, dok podzemni čine klipne šipke, uzlazni niz cijevi, dubinska sisaljka, sidreni paker i pripadajuća dodatna proizvodna oprema.



Slika 2 - 1. Shematski prikaz nadzemne i podzemne opreme proizvodne bušotine opremljene dubinskom sisaljkom s klipnim šipkama (Brkić, 2018.)

U daljnjem tekstu bit će nabrojani i objašnjeni temeljni dijelovi čitave konstrukcije dubinskih sisaljki s klipnim šipkama.

**Njihalice** je konstrukcijski složen mehanizam koji omogućava prijenos energije s pogonskog motora na klipne šipke. Detaljnije, služi za pretvaranje rotacijskog gibanja motora u pravocrtno gibanje klipa sisaljke i klipnih šipki. Komponente njihalice su balansna greda, glava njihalice („konjska glava“) koja je povezana s glatkom šipkom čeličnim užetom, protutezi kojima se postiže uravnoteženje njihalice i ručica njihalice kojoj je omogućeno pomicanje. Reduktor, koji je dio motora, služi za pretvaranje velikog broja okretaja motora i malog zakretnog momenta u mali broj okretaja i veliki zakretni moment.

**Glatka šipka** predstavlja jednu od najvažnijih komponenti proizvodne opreme, spoj između njihalice na površini i niza klipnih šipki u bušotini. Izložena je najvećim opterećenjima i preuzima najveću nosivost jer se nalazi na najvišoj poziciji čitavog sklopa (opterećena je težinom klipnih šipki i sisaljke, težinom stupca fluida iznad sisaljke te inercijskim i vibracijskim silama prilikom rada) te je izložena i trenju u brtvenom sustavu (brtvenice), koji je čvrsto i usko postavljen radi sprečavanja prodora plina ili kapljevine oko glatke šipke. Najčešćeg je promjera od 32 mm (1 ¼ in.) ili 38 mm (1 ½ in.). Izrađena je od najfinijeg čelika, dorađena je do visokog sjaja i stoga se ponekad naziva polirana šipka.

**Klipne šipke** su šipke punog profila izrađene od vrlo kvalitetnog čelika i koriste se za prijenos snage s njihalice na površini do sisaljke na dnu bušotine. API (engl. *American Petroleum Institute*) je predstavio standarde promjera prema kojima se izrađuju klipne šipke, a oni su: 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) i 28,58 mm (1 1/8 in). Duljina im se kreće od 7,6 do 9,1 metra, s ojačanim muškim navojima na kraju i dijelom kvadratnog oblika radi zahvata ključevima pri navrtanju i odvrtanju. Pri projektiranju i postavljanju klipnih šipki koriste se kombinacije različitih promjera radi smanjenja opterećenja na glavi njihalice. Zbog ogromnih opterećenja i štetne sredine kojom su okružene (soli, kiseline, korozivna sredstva), važno je da se niz klipnih šipki pravilno odabere kako bi odgovarao uvjetima i potrebama bušotine (Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson, 1993).

**Sidreni paker**, tzv. anker se ugrađuje na dnu niza tubinga (ispod sisaljke) te sprečava savijanje niza tubinga pri podizanju kapljevine u dubokim bušotinama. Također, sprečava trošenje tubinga zbog trenja spojnica klipnih šipki o unutarnju stijenku tubinga. Plinska i pješčana sidra bit će objašnjena kasnije u radu.

**Dubinske sisaljke** su proizvodna oprema koji se postavlja na dubinu na kojoj će ostati uronjene u kapljevinu tijekom njenog rada u bušotini. Stoga, proračun dubine ugradnje je iznimno bitan za daljnji proces proizvodnje. Dijelovi dubinske sisaljke su: cilindar, klip, tlačni i vlačni ventil. Prema načinu ugradnje, dubinske sisaljke s klipnim šipkama dijelimo na usadne, tubing i casing sisaljke. Usadne (insert) sisaljke su najčešće korištene i suvremenije konstrukcije koje se ugrađuju na nizu klipnih šipki u sjedište sisaljke, a samo sjedište ugrađeno je na nizu tubinga. Primjenjuju se pri manjim dobavama fluida i u dubljim bušotinama. Tubing sisaljke se razlikuju od usadnih zbog toga što se najprije na nizu tubinga ugrađuje cilindar sisaljke s usisnim ventilom, a zatim se zajedno s nizom klipnih šipki ugrađuje klip s tlačnim ventilom. Konstrukcija tubing sisaljki je jednostavnija i jeftinija za izradu. Casing sisaljke se mogu izravno ugraditi u zaštitne cijevi (engl. *casing*) uz pomoć pakera ili sidra te se one koriste u relativno plitkim bušotinama i u bušotinama s velikim indeksima proizvodnosti.

Prije ugradnje dubinskih sisaljki s kompletnom pratećom nadzemnom i podzemnom opremom, potrebno je pripremiti građevinsko zemljište, odnosno teren za izgradnju sklopa. Potrebno je izbetonirati betonsko postolje s čvrstim nosačima koji moraju biti izrađeni na način da izdrže minimalno dvostruko veće opterećenje od zadanog, odnosno od predviđenog radnog opterećenja kroz čitav radni vijek bušotine opremljene ovakvim sustavom. Na betonsko postolje postavlja se njihalica s pogonskim motorom te se preko konjske glave, užadi i glatke šipke, strojni mehanizam povezuje s klipnim šipkama i s dubinskom sisaljkom na kraju.

### **2.3. Ciklusi crpljenja dubinske sisaljke**

Kao što je već naglašeno, dubinska sisaljka se puni ležišnim fluidom i prenosi proizvedeni fluid uzlaznim nizom cijevi do površine i priključnog naftovoda. Potrebno je objasniti način rada, odnosno cikluse crpljenja dubinske sisaljke kako bi se što lakše razumjelo daljnje obrađivanje teme, odnosno utjecaj neželjenih medija (pijesak, plin) na punjenje, trošenje i djelotvornost dubinskih sisaljki, a samim time i čitavog sklopa. Razdiobom dubinske sisaljke na elementarne strojarske komponente, promatra se rad najvažnijih dijelova sisaljke.

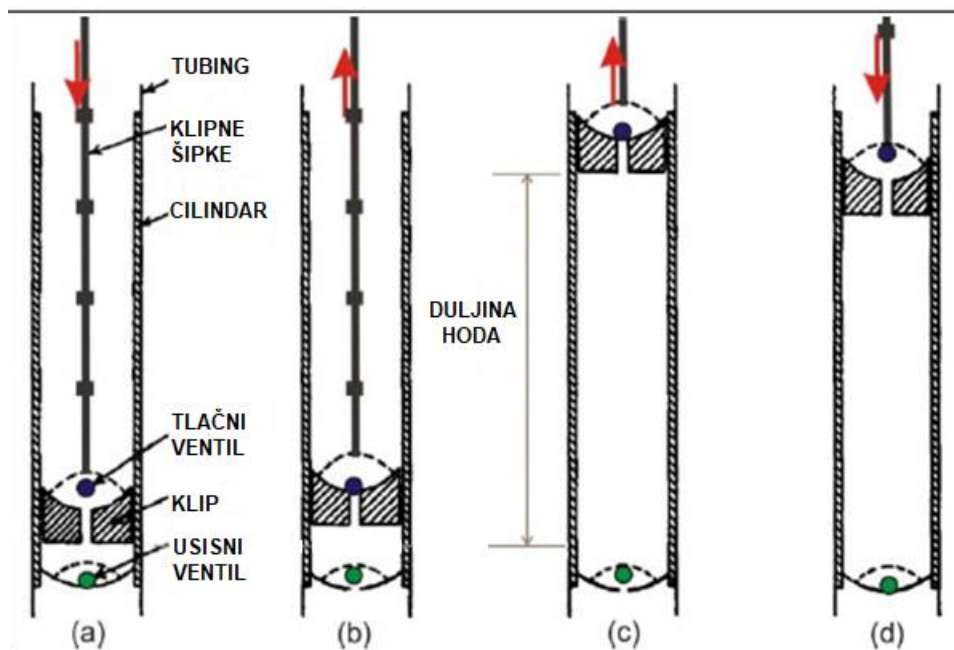
Usisni ventil (protupovratni) radi na principu kuglice i sjedišta, a sam ventil ugrađuje se na kraju cilindra. Pri punjenju cilindra fluidom, tj. pri hodu klipa prema gore, ventil dopušta ulazak fluida i zaustavlja njegov izlazak iz cilindra tijekom hoda klipa prema dolje. Kuglica i sjedište izrađeni

su od veoma kvalitetnog čelika kako bi dolazilo do što manjeg oštećenja koje bi dovelo do propuštanja. Tlačni ventil se ugrađuje na peti klipa, a djelovanje mu je identično usisnom ventilu, princip kuglice i sjedišta. Kada klip krene prema dolje, kuglica se podiže i dopušta utok kapljevine u klip i dalje u tubing, a pri pomicanju klipa prema gore, ne dopušta povratni tok fluida.

Klipovi dubinskih sisaljki najčešće su duljine 1200 mm i debljine stjenke 5-10 mm. Izrađuju se od odgovarajućih čeličnih cijevi čije se površine glačaju, kromiraju i poliraju. Prilikom izrade klipa i obrade površine klipa želi se postići minimalna hrapavost (0,2-0,4  $\mu\text{m}$ ), no površina također može biti izrađena s kanalima varirajućeg oblika kako bi bili djelotvorni u podizanju kapljevine s udjelom pijeska i drugih nečistoća u nafti. Klip se pomoću klipnjače spaja na niz klipnih šipki.

Postupak crpljenja kapljevine dubinskim sisaljka (slika 2-2.) može se razdvojiti na četiri glavne faze koje su detaljno objasnili autori Zelić i Čikeš. U ciklusu crpljenja dolazi do punjenja i pražnjenja cilindra, a punjenje započinje kretanjem klipa sisaljke prema dolje (a) pri čemu dolazi do otvaranja tlačnog ventila (engl. *travelling valve*) koje omogućava utok fluida iz cilindra sisaljke u tubing, dok se istodobno, u početku kretanja klipa prema dolje zatvara usisni ventil (engl. *stationary valve*) na koji u tom trenutku djeluje čitav hidrostatski stupac fluida, odnosno nafte u tubing. U drugoj fazi, kada klip sisaljke dosegne dno cilindra, dolazi do zatvaranja tlačnog i otvaranja usisnog ventila (b). Usisni ventil tako propušta utok ležišnog fluida u cilindar, dok se tlačni ventil nalazi u položaju najvećeg opterećenja koje preuzima zbog stupca fluida u tubing. U sljedećoj fazi (c), klip se kreće prema gore i potiskuje proizvedeni fluid tubingom prema površini u količini približno sličnoj volumenu cilindra, tzv. obrok nafte. Tijekom tog vremena, cilindar se puni novim fluidom, a tlačni ventil služi kao protupovratni ventil. U posljednjoj fazi, koja započinje nakon dosezanja vrha cilindra, otvara se tlačni ventil dopuštajući ulaz fluida iz cilindra u tubing (d). Istovremeno, zatvara se usisni ventil koji postaje protupovratni ventil kako bi spriječio istjecanje fluida iz cilindra. Dakako, potrebno je naglasiti da je analiza ciklusa crpljenja teoretska koja uzima u obzir par pretpostavki. Prva je ta da se usisni i tlačni ventili otvaraju istovremeno, odnosno kada se jedan zatvori, drugi se otvori. Također, ta pretpostavka podrazumijeva da se odsjedanje kuglice u kućište, u trenutku zaustavljanja klipa odvija trenutno i bez poteškoća. Nadalje, pretpostavlja se da je količina fluida

koja ulazi u prostor cilindra obujamski jednaka volumenu cilindra što u većini slučajeva nije izvedivo zbog nesavršenosti konstrukcije sisaljke, njenog rada i utjecaja ostalih čimbenika.



Slika 2 - 2. Faze crpljenja kapljevine (Brown, 1980.)

### 3. UTJECAJ PLINA NA RAD SISALJKI

#### 3.1. Podrijetlo plina

Ležišta ugljikovodika sastoje se od više fluida, tj. naftna ležišta u sebi sadrže plin, ležišnu vodu i mnoge nečistoće. Cilj svake naftne kompanije, odnosno operatera naftnog polja je činiti sve što je moguće kako bi se ležišni tlak što sporije smanjivao kako bi eruptivna proizvodnja bila što duža, odnosno kako bi se što optimalnije crpilo ležište. Početni tlak ležišta (engl. *pressure initially*) je tlak pod kojim je ležište otkriveno i prvotno pušteno u proizvodnju. Taj tlak je posljedica kompresije naslaga stijena iznad ležišta, matriksa (stijenske mase) ležišta kao i tlaka samog fluida u ležištu (nafta i voda). Puštanjem bušotine u proizvodnju, odnosno polja, početni tlak ležišta pada i nikada kasnije ne može biti ponovno dosegnut. Padanjem tlaka ležišta, dolazi do otapanja topljivih frakcija nafte u samoj nafti čime se povećava obujamski koeficijent nafte,

$B_o$  (engl. *oil formation volume factor*), odnos obujma nafte (i u njoj otopljenog plina) pri ležišnom tlaku i temperaturi prema obujmu nafte u standardnim uvjetima. Povećanjem obujamskog koeficijenta,  $B_o$ , povećava se i obujam nafte zbog izotermne ekspanzije sve dok se ne dosegne tlak zasićenja,  $p_b$  - točka ključanja (engl. *boiling point*), kada je obujam nafte maksimalan. Nakon tlaka zasićenja, tlak ležišta i obujamski koeficijent se smanjuju po određenim jednadžbama. Nadalje, padom tlaka dolazi do oslobađanja plina otopljenog u nafti, ležište djeluje kao smjesa kapljevine i plina, koji je kasnije prisutan u svim segmentima crpljenja nafte. Pri proizvodnji dubinskim sisaljka, taj oslobođeni plin može stvarati određene probleme u procesu crpljenja nafte, a problemi se najviše manifestiraju u tome što utječu na volumetrijsku djelotvornost dubinske sisaljke.

### **3.2. Volumetrijska djelotvornost sisaljke**

Prisutnost slobodnog plina kao komponente smjese kapljevine i plina unutar dijelova konstrukcije dubinske sisaljke smanjuje njenu djelotvornost. Stoga, potrebno je u razini samog ležišta, tj. na dnu bušotine izvesti određene tehnološke zahvate i ugraditi opremu kako bi se što veća količina slobodnog plina izdvojila prije ulaska u sisaljku. Slobodan plin u nafti utječe na volumetrijsku djelotvornost dubinske sisaljke na dva načina (Zelić i Čikeš, 2006) :

- zauzimajući dio prostora u sisaljki na račun kapljevine pri hodu klipa prema gore i
- usisni ventil se ne otvara istodobno s kretanjem klipa prema gore sve dotle dok slojni tlak ne nadvlada tlak unutar sisaljke.

Također, prisutnost slobodnog plina unutar cilindra sisaljke dovodi do dodatnih neželjenih pojava kao što su hidraulički udar te plinski čep.

Kolika će količina slobodnog plina biti prisutna ovisi o više čimbenika: količini otopljenog plina u nafti (karakteristika ležišta), dubini ugradnje sisaljke, odnosno o tlaku koji vlada ispod nje, tj. na ulazu fluida u sisaljku i efikasnosti dubinskog odvajača plina.

Prije objašnjenja kako i na koji način riješiti problem ulaska plina u sisaljku, potrebno je objasniti pojam obujamskog protoka sisaljke. Obujamski protok dubinske klipne sisaljke predstavlja količinu kapljevine koju zauzima nafta unutar cilindra i koju je klip sposoban iznijeti



u jednom hodu prema gore (jedan obrok nafte). Teoretski kapacitet sisaljke ovisi o promjeru klipa, duljini hoda klipa te o broju hodova u minuti.

Jednadžba koja predstavlja teoretski kapacitet je sljedeća (Zelić i Čikeš, 2006):

$$q_t = 1440A_p S_p N \quad (3-1)$$

Gdje su:

$q_t$  – teoretski kapacitet sisaljke, m<sup>3</sup>/d

$A_p$  – površina poprečnog presjeka klipa, m<sup>2</sup>

$S_p$  – duljina hoda klipa, m

$N$  – broj hodova klipa u minuti

Naravno, priložena jednadžba primjenjiva je u savršenim uvjetima, odnosno u uvjetima stopostotne efikasnosti sisaljke. Stvarni kapacitet sisaljke dobija se ako se gornji izraz pomnoži volumetrijskim koeficijentom korisnog učinka sisaljke ( $\eta$ ). Modificirana jednadžba onda glasi:

$$q_t = 1440A_p S_p N \eta \quad (3-2)$$

Gdje je:

$\eta$  – koeficijent korisnog učinka/volumetrijska djelotvornost sisaljke

Spomenuti koeficijent varira u širokom rasponu, predstavlja postotak djelotvornosti sisaljke i na njega uvelike utječe količina slobodnog plina. U uvjetima punjenja sisaljke isključivo kapljevnom, volumetrijska djelotvornost sisaljke funkcija je obujamskog koeficijenta nafte ( $B_o$ ) i obujamskog koeficijenta vode ( $B_w$ ), koja je u većini slučajeva prisutna u proizvodnji nafte.

$$\eta = \frac{q_o + q_w}{q_o B_o + q_w B_w} \quad (3-3)$$

Gdje su:

$q_o$  – proizvodnja nafte, m<sup>3</sup>/d

$q_w$  – proizvodnja vode, m<sup>3</sup>/d

$B_o$  – volumetrijski faktor nafte, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

$B_w$  – volumetrijski faktor vode, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Dakle, kada plin ne prolazi kroz sisaljku, volumetrijska djelotvornost povećava se uslijed povećanja ulaznog tlaka sve do trenutka postizanja tlaka zasićenja kada je čitav plin otopljen u nafti. Jasno, promatraju se slučajevi kada je plin prisutan, odnosno uvjete ispod tlaka zasićenja. Volumetrijska djelotvornost pri uvjetima ispod tlaka zasićenja može se izračunati po sljedećem obrascu:

$$\eta = \frac{q_o + q_w}{q_o B_o + q_w B_w + (R_p - R_s) q_o B_g} \quad (3-4)$$

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,  $m^3/m^3$ , pri čemu je za 1 standardni  $m^3$  plina:

$$B_g = \frac{p_0}{T_0} \frac{ZT}{p} = 0,00351 \frac{ZT}{p} \quad (3-5)$$

Z – faktor stlačivosti, popravni faktor plina

$T_0$  – standardna temperatura ( $T_0 = 288,15$  K)

T – temperatura plina, K

$p_0$  – standardni tlak ( $p_0 = 1,01325$ )

p – apsolutni tlak plina, bar

Iz navedene jednadžbe može se primijetiti utjecaj odnosa slobodnog plina i nafte, tj. plinskog faktora ( $R_s$ ) koji je obrnuto proporcionalan volumetrijskoj djelotvornosti sisaljke pri određenom ulaznom tlaku. Povećanje volumetrijske djelotvornosti postizemo ugradnjom plinskih sidra ispod dubinskih sisaljki i određenim tehnološkim zahvatima čime dolazi do odvajanja slobodnog plina iz kapljevine i usmjeravanja plina s vanjske strane sisaljki u prstenasti prostor bušotine. Kao i sve strojarske konstrukcije, plinska sidra imaju svoju djelotvornost i najvažniji su čimbenik pri ugradnji određenog plinskog sidra:

$$\eta_{sid} = \frac{1}{1 + R_p} \quad (3-6)$$

Gdje je:

$\eta_{\text{sid}}$  – koeficijent korisnog učinka sidra

$R_p$ , proizvodni plinski faktor, predstavlja količinu plina po jedinici ( $\text{m}^3$  prema  $\text{m}^3$ ) obujma nafte pri određenom bušotinskom tlaku i izračunava se prema sljedećem obrascu:

$$R_p = C_e p^{2/3} v_{sl}^{1/2} \quad (3-7)$$

Gdje su:

$p$  – ulazni tlak, odnosno tlak ispod sisaljke, bar

$v_{sl}$  – brzina protoka kapljevina kroz prstenasti prostor sidra svedeno na puni presjek prstenastog prostora sidra bez plina, m/s

$C_e$  – empirijska konstanta, koja iznosi:

$C_e \approx 0,304$  za manžetni tip (engl. *cup type*) plinskog sidra

$C_e \approx 0,391$  za brtveni tip (engl. *packer type*)

$C_e \approx 1,085$  za modificirano plinsko sidro s uronjenom cijevi

Empirijska konstanta,  $c$ , izvedena je iz mnogih eksperimenata i predstavlja konstantu za pojedinu vrstu i izvedbu sidra.

Pri pretpostavci da je  $R_s = 0$ , volumetrijska djelotvornost sisaljke izračunava se u funkciji volumetrijskog faktora nafte i djelotvornosti plinskog sidra prema jednadžbi:

$$\eta = \frac{q_o + q_w}{q_o B_o + q_o B_w + C_e p^{2/3} v_{sl}^{1/2} q_o B_g} \quad (3-8)$$

pri čemu je:

$$v_{sl} = \frac{q_o B_o + q_w B_w}{86400 A_{ps}} \quad (3-9)$$

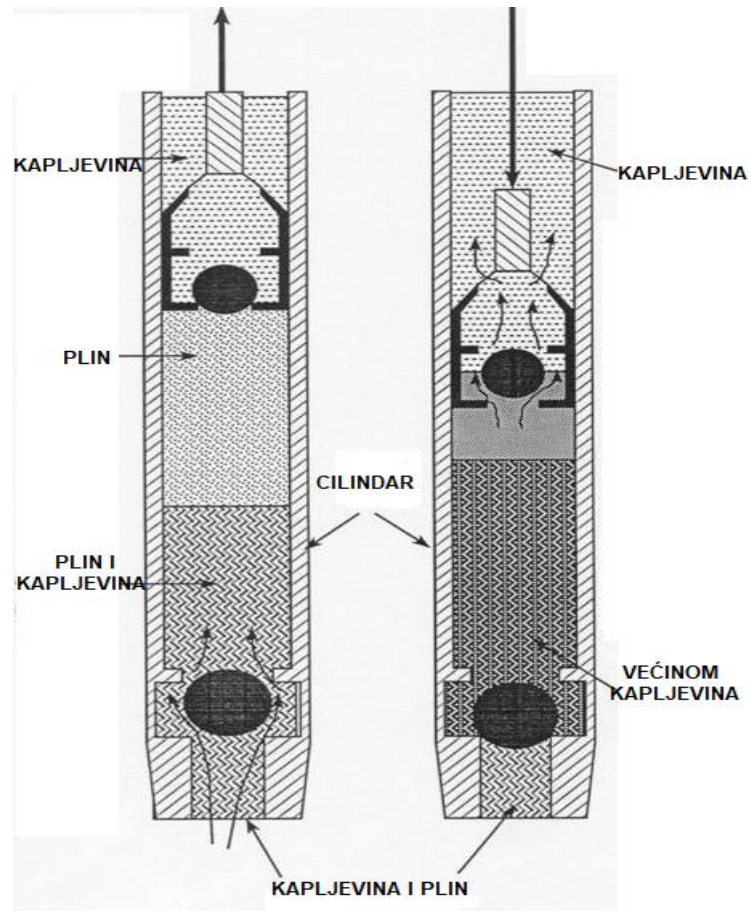
Gdje je:

$A_{ps}$  – površina poprečnog presjeka prstenastog prostora u sidru kroz koje protječe kapljevina,  $\text{m}^2$

Zazor sisaljki, odnosno prostor između klipa i košuljice cilindra, također predstavlja bitnu ulogu s obzirom na to da tijekom crpljenja dolazi do gubljenja kapljevine kroz zazor. Zazori se kreću od 0,0254 do 0,127 mm (0,001 do 0,005 in.) te je važno odabrati optimalan zazor s obzirom na gustoću i viskoznost nafte kako bi gubici pri crpljenju bili minimalni. Upotrebljavaju se klipovi s metalnim i gumenim brtvljenjem te je značajno naglasiti da se povećanjem zazora od recimo, 0,05 na 0,2 mm, tj. za 4 puta, gubitak kapljevine povećava za 64 puta što bitno utječe na djelotvornost sisaljke (Zelić i Čikeš, 2006).

### 3.3. Hidraulički udar

Hidraulički udar kao pojava prisutan je u većini strojarskih konstrukcija koje služe za prijenos određene vrste kapljevine. Do hidrauličkog udara dolazi zbog nepotpunog punjenja sisaljke kapljevino (engl. *pumped off*), odnosno pri hodu klipa prema dolje kada se unutar cilindra nalazi smjesa plina i kapljevine. Na slici 3-1. prikazan je shematski prikaz hidrauličkog udara. Iznad kapljevine, u prostoru između usisnog i tlačnog ventila, stvara se prostor ispunjen plinom (zbog manje gustoće). Kada klip krene prema dolje, dolazi do kompresije plina, no tlak unutar cilindra ne otvara tlačni ventil sve dok ventil ne dosegne granicu plina i kapljevine, odnosno dok ne udari u kapljevino. Napokon, kada se otvori tlačni ventil, opterećenje na nizu klipnih šipki može drastično pasti u djeliću sekunde. Ovakvi događaji u procesu proizvodnje ne smiju se dešavati, tj. treba ih svesti na minimum zbog toga što, pri ponavljanju hidrauličkog udara prilikom svakog ciklusa crpljenja u određenom vremenskom razdoblju mogu dovesti do enormnih naprezanja unutar opreme što može rezultirati preuranjenim oštećenjem podzemne i površinske opreme. Neka od oštećenja su: oštećenje zubi u reduktoru brzina u pogonskom sustavu, oštećenje potporne strukture njihalice, zamor materijala i pucanje klipnih šipki zbog nepotrebnog produljivanja ili izvijanja (habanje), ubrzano trošenje i lom ventila (kuglice i sjedišta) (slika 3-2.) i klipa te oštećenja na navojnim spojevima na spojnicama tubinga. Važno je ponovno naglasiti kako do hidrauličkog udara ne mora doći samo uslijed djelovanja slobodnog plina iz ležišta, već i zbog nedovoljnog punjenja sisaljke zbog nemogućnosti ležišta da proizvede količinu kapljevine za iznošenje na površinu kao i zbog fizičkih zapreka (čepljenja) na ulazu u sisaljku gdje, uslijed velikih brzina protjecanja kapljevine kroz suženi prostor, dolazi do oslobađanja značajne količine plina.



Slika 3 - 1. Prikaz hidrauličkog udara (Bohorquez, 2006 )



Slika 3 - 2. Lom sjedišta usisnog ventila (Maher, 2016)

### **3.4. Plinski čep**

Plinski čep, odnosno začepljenje plinom (engl. *gas lock*) jest negativno djelovanje plina u cilindru dubinske klipne sisaljke. Prisutnost slobodnog plina, slojnog ili iz nafte isplinjenog, između dva ventila utječe na njihovo otvaranje i zatvaranje, sprečavanje usisa kapljevine kao i na djelovanje čitave sisaljke. Pri hodu klipa prema gore, unutar cilindra pojavljuje se plin. Nakon što klip krene prema dolje, tlak u cilindru cjelokupno ispunjenim plinom ne može doseći vrijednost potrebnu za otvaranje tlačnog ventila. Nakon što klip krene prema gore, tlak u cilindru ne smanjuje se dovoljno za otvaranje usisnog ventila i ulaz kapljevine u sisaljku je spriječen. Zbog stvorenog plinskog čepa sisaljka prestaje crpiti fluid, odnosno sisaljka je zaključana te je potrebno ispuhati zarobljeni plin. Plinski čep ne utječe na trošenje dijelova sisaljke, no uz njegovu pojavu, rad sisaljke je nekoristan. Uz takvo smanjenje, odnosno nepostojanje iscrpka, primjećuje se povećanje tlaka na dnu bušotine kao i povećanje razine fluida u prstenastom prostoru. U većini slučajeva začepljenja plinom, to povećanje tlaka na dnu može nadvladati tlak unutar cilindra (tlak plina) i određena količina fluida može ući u sisaljku. Nakon nekoliko hodova klipa, dovoljna količina fluida ulazi u sisaljku, začepljenje plinom je uklonjeno i sisaljka ponovno normalno funkcionira.

### **3.5. Rješenja za sprečavanje utjecaja plina na djelotvornost rada sisaljke**

Kako bi što bolje otklonili utjecaj plina unutar sisaljki, primjenjuju se razna operativna, kao i tehnička rješenja. Govoreći o operativnim zahvatima, ponekad je potrebno smanjiti brzinu iznošenja kapljevine, tj. preko pogonskih motora i reduktora u cijelosti smanjiti brzinu kretanja čitavog podzemnog i površinskog sklopa. Također, smanjivanje duljine hoda klipa može djelotvorno utjecati na efikasnije punjenje cilindra dubinske sisaljke. Smanjenje udaljenosti između tlačnog i usisnog ventila (na kraju kretanja prema dolje) je jedno od efikasnih načina rješavanja problema vezanih uz zapunjenje plinom. Rješenje koje se koristi jest izbjegavanje nepotpunog punjenja sisaljke koristeći mjerne pretvornike koji prepoznaju kada bušotina, odnosno ležište ne puni u potpunosti sisaljku (engl. *pumped off controller*). Tada, pretvornici gase sisaljku, tj. čitavi sklop dubinske sisaljke na određeno vremensko razdoblje dok se ponovno ne dosegne optimalno stanje punjenja sisaljke. Nadalje, ako je pogonski sklop električni, na konstrukciju njihalice postavlja se vremenski regulator (engl. *timer*) koji također gasi sklop i

ponovno ga pokreće nakon određenog vremenskog razdoblja, kada je dosegnuto djelotvorno punjenje sisaljke kapljevnom.

### *3.5.1. Tehnička rješenja-plinska sidra*

Primjenjuju se rješenja za fizičko otklanjanje plina u vidu dodatne dubinske opreme koja će ograničiti ulazak plina u radnu komoru i povećati njenu volumetrijsku djelotvornost. Takvu opremu predstavljaju dubinski separatori plina, tzv. plinska sidra.

Prije razmatranja dubinskih separatora plina, potrebno je spomenuti dva tehnička rješenja u kojima se ne koriste plinska sidra. Jedno od takvih rješenja je zamjena trenutne dubinske sisaljke te ugradnja nove, manje sisaljke gdje je površina poprečnog presjeka klipa, a samim time i obujam cilindra, manji od prvotno ugrađenog. Tako neće doći do nedovoljnog punjenja sisaljke unatoč slabijem davanju ležišta. Drugo rješenje, koje predlažu neke servisne tvrtke u svojim katalozima, zahtijeva ugradnju specijalnih dvostupanjskih dubinskih sisaljki. Takva sisaljka, koja se sastoji od cilindra s dvostrukom komorom i dvostrukog klipa, omogućuje maksimalnu kompresiju smjese kapljevine i plina zbog predimenzioniranog donjeg usisnog ventila. Nadalje, gornji tlačni ventil je također predimenzioniran da izdrži stupac fluida u tubing u čime omogućava da se donji tlačni ventil lakše otvori i tako smanjuje utjecaj plina.

Dubinski separatori plina, odnosno tzv. plinska sidra su uređaji za separaciju nafte i plina i usmjeravanje plina u prstenasti prostor bušotine s dubinskim sisaljka. Primjenjuju se kako bi se spriječilo ulaženje plina u sisaljku i tako povećala djelotvornost sisaljke. Autori Matanović i Moslavac šturo i u naftaškom smislu govore da plinska sidra predstavljaju dio opreme koji se sastoji od jednog ili dva komada tubinga obješena ispod radne komore, zatvorene s donjeg kraja, s jednim ili više otvora blizu gornjeg kraja kroz koje može ulaziti nafta (Matanović i Moslavac, 2011). Konstrukcija i djelovanje plinskih sidra je sljedeća: otvori na gornjem kraju tubinga predstavljaju graničnu razinu do koje se može nafta spustiti tijekom proizvodnje, a nafta ulazi kroz manji koncentrični tubing koji se nalazi unutar vanjskog tubinga. Sjedište usisnog ventila nalazi se iznad razine fluida u vanjskom tubing u. Prisiljavanjem nafte da teče kroz prstenasti prostor dolazi do odjeljivanja plina. Kretnom prema dolje, djelovanjem gravitacijske sile dolazi do padanja kapljevine, dok se plin izdvaja zbog manje gustoće te odlazi prema površini kroz prstenasti prostor između proizvodnog niza zaštitnih cijevi i uzlaznog niza. Na površini, plin se skuplja ispod glave bušotine gdje se kroz vod za ispuh odvodi u željenom smjeru.

Govoreći o plinskim sidrima, neophodno je analizirati i definirati koeficijent separacije koji se izražava odnosom separirane i ukupne količine plina u nafti (Zelić i Čikeš, 2006), kao i niz ostalih jednadžbi:

$$k_c = \frac{(q_g)_{sep}}{q_g} \quad (3-10)$$

Gdje su:

$k_c$  – koeficijent separacije

$(q_g)_{sep}$  – separirana (slobodna) količina plina,  $m^3/d$

$q_g$  – ukupna količina plina u nafti (slobodni + otopljeni),  $m^3/d$

Nadalje, koeficijent punjenja sisaljke izgleda ovako:

$$\eta = \frac{q_L}{q_L + q_{gp}} \quad (3-11)$$

Gdje su:

$\eta$  – koeficijent punjenja sisaljke

$q_L$  – količina kapljevine koja ulazi u sisaljku,  $m^3/d$

$q_{gp}$  – količina slobodnog plina koji ulazi u sisaljku,  $m^3/d$

Količina otopljenog plina pri tlaku koji se ostvaruje dubinom uranjanja sisaljke je:

$$q_{gs} = q_L R_s \quad (3-12)$$

Gdje je:

$q_{gs}$  – količina otopljenog plina pri tlaku na dubini uranjanja,  $m^3/d$

Kako je  $R_s$  je faktor otopljenog plina u nafti,  $m^3/m^3$ , količina slobodnog plina koji ulazi u sisaljku je:



$$q_{gpp} = (1 - k_c)q_{gs} \quad (3-13)$$

Gdje je:

$q_{gpp}$  – količina slobodnog plina koji ulazi u sisaljku nakon separacije, m<sup>3</sup>/d

Uvrštavanjem prethodnih dviju jednadžbi u jednadžbu za koeficijent punjenja sisaljke, dobivamo zaključni izraz za koeficijent punjenja sisaljke:

$$\eta = \frac{1}{1+(1-k_c)R_s} \quad (3-14)$$

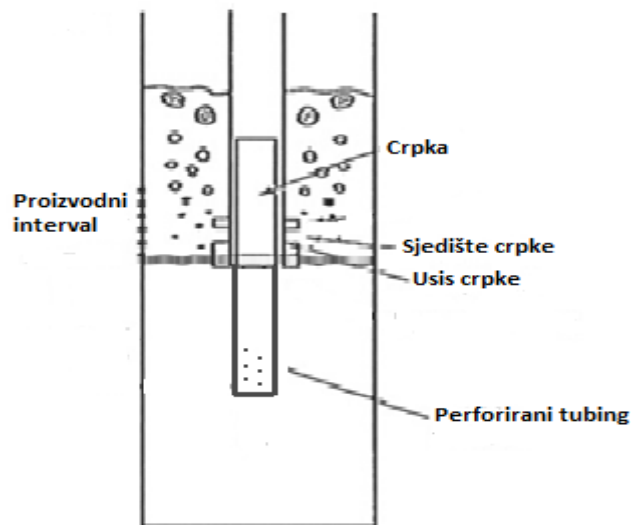
Neki od plinskih sidra koji se koriste u industriji su:

- prirodno ili uronjeno plinsko sidro
- plinsko sidro s pakerom
- jednodijelno (modificirano) plinsko sidro
- tanjurasto plinsko sidro
- vijčasto plinsko sidro

Svako od navedenih sidra ima svoje prednosti i nedostatke te primjena pojedinog sidra ovisi o jedinstvenim uvjetima crpljenja pojedine bušotine i ležišta.

### 3.5.2. Prirodno ili uronjeno plinsko sidro

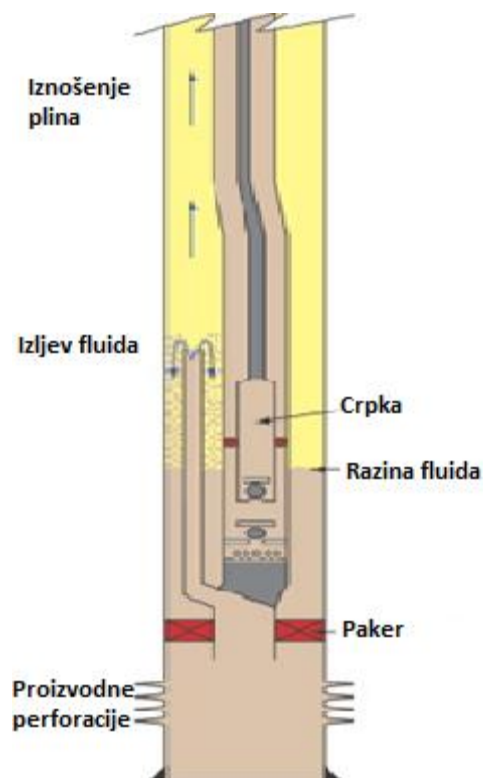
Prirodno ili uronjeno plinsko sidro (engl. *natural gas anchor*) (slika 3-3.) koristi se prirodnim uvjetima crpljenja za odvajanje plina iz smjese nafte i plina. Razlog tomu je prvotna ugradnja sisaljke i prikladnog perforiranog tubinga ispod proizvodnih propucanih intervala. Djelovanjem gravitacijske sile kao i zbog razlike gustoća fluida, pri izlasku smjese kapljevine i plina iz proizvodnih naslaga, kapljevina se kreće prema dolje gdje dolazi do usisa sisaljke, a plin odlazi prema gore u prstenasti prostor bušotine. Takva separacija je relativno jednostavna i jeftino izvediva te je k tome, zbog gravitacije, relativno djelotvorna. Poteškoće u ovakvoj metodi se javljaju pri pojavi kamenca i pijeska te ponekad može doći do nepotpunog odvajanja plina iz nafte koji tako prolazi kroz sisaljku i smanjuje joj efikasnost. Zaključno, metoda nije primjenjiva ako ne postoji dovoljno prostora u bušotini ispod perforacija.



Slika 3 - 2. Prirodno ili uronjeno plinsko sidro (McCoy, 2012)

### 3.5.3. Sidro s pakerom

Govoreći o efikasnosti, plinsko sidro s pakerom (engl. *packer type*) (slika 3-4.) nalazi se uz bok uronjenom plinskom sidru te se koristi onda kada nije moguće koristiti uronjeno plinsko sidro (Mitra, 2012). Ovakvo sidro ugrađuje se, u odnosu na dubinsku sisaljku, ispod usisnog dijela, a iznad proizvodnih perforacija. Sastoji se pakera s brtvećim dijelom i cijevi manjeg promjera koja se proteže usporedno s uzlaznim nizom i završava iznad razine sisaljke. Ležišni fluid se kroz ulaznu cijev sidra usmjerava u prstenasti prostor zaštitnih cijevi i uzlaznog niza na dostatnu udaljenost od usisa. Ulaskom u veći prostor, dolazi do efikasne separacije plina iz kapljevine. Djelovanjem gravitacijske sile, kapljevina pada prema dnu i ulazi u usis sisaljke, dok se plin, zbog svoje male gustoće, nastavlja podizati prstenastim prostorom do ušća bušotine. Separacija je iznimno djelotvorna zbog toga što se ona odvija u području nižeg tlaka. Ipak, konstrukcija ovakvih sidra zahtijeva veća ulaganja kao i, zbog prisutnosti brtvećeg pakera, složenost radova prilikom takve vrste opremanja je veća te se takva sidra limitirana na posebne kategorije bušotina.



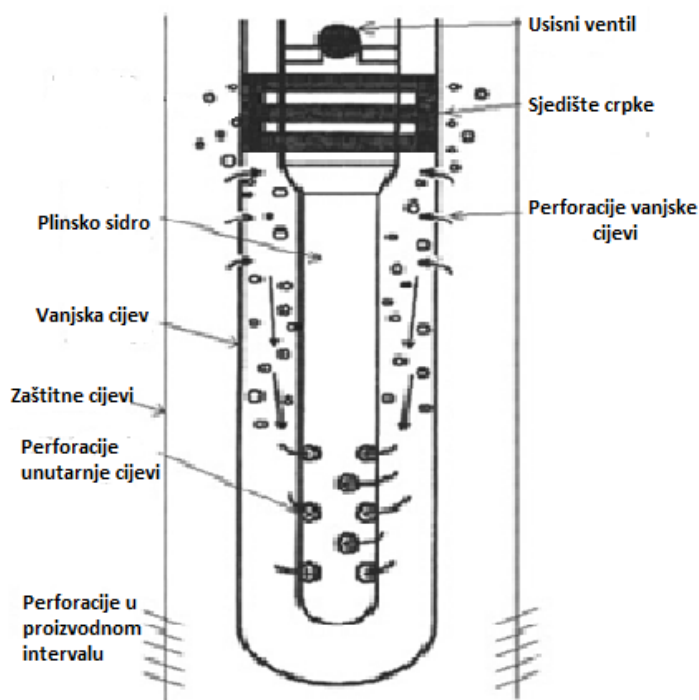
Slika 3 - 3. Sidro s pakerom

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376736108002069>)

#### 3.5.4. Jednodijelno plinsko sidro

Ovakva vrsta sidra (engl. *poor boy*) (slika 3-5.) koristi se rjeđe od sidara s pakerom i sastoji se od cijevi većeg promjera unutar koje se nalazi cijev manjeg promjera kroz koju se usisava kapljevina. Obje cijevi su perforirane; veća s gornje, manja s donje strane, a paker se ugrađuje neposredno ispod sisaljke kako bi usis sisaljke bio što bliže unutarnjoj cijevi. Kapljevina prolazi kroz prostor između zaštitnih cijevi i sidra gdje dolazi do prvotnog odvajanja plina, nakon čega ulazi kroz nize perforacije sidra. Prolaskom kroz sidro prema dolje, dolazi do gravitacijskog odvajanja plina i kapljevine nakon čega kapljevina ulazi kroz perforacije unutarnje cijevi, a oslobođeni plin odlazi kroz gornje perforacije sidra prema površini. Iz unutarnje cijevi, kapljevina odlazi na usis sisaljke. Na djelotvornost utječu unutarnji promjer tijela sidra, duljina hidrauličkog dijela i duljina perforacija te je potrebno posebno obratiti pozornost na pravilno određivanje veličine pojedine komponente sidra. Koeficijent separacije ovakve vrste sidra

povećava se povećanjem promjera sidra od 8,89 do 11,43 mm (3 ½ do 4 ½ in.) kao i povećanjem duljine hidrauličkog dijela sidra (ne manje od 0,5 m). Također, duljina perforacija mora biti optimalna (20-25 cm), odnosno mala duljina perforacija smanjuje učinkovitost, dok prevelika duljina ne djeluje značajno na povećanje učinkovitosti (Zelić i Čikeš, 2006). Često ugrađivane usisne cijevi su promjera ne veće od 25,4 mm (1 in.), a pogodnost ugradnje ovakvog plinskog sidra jest jednostavna i jeftina ugradnja te bolje izdvajanje plina zbog mogućnosti fluida da dođe u područje niskog tlaka. S druge strane, ovakva sidra ograničena su na bušotine s manjim davanjima (mala površina poprečnog presjeka) te, zbog smanjenja tlaka, ne dolazi do povećanja brzine protoka na ulazu u perforacije.



Slika 3 - 4. Jednodijelno plinsko sidro (Ranjan, 2009)

Postoji i modificirana verzija jednodijelnog sidra, te je takva izvedba sidra identična običnom jednodijelnom plinskom sidru, uz tu razliku što je promjer sidra drastično veći čime se postiže veća djelotvornost separacije. Kod njih je moguće podesiti promjere unutarnje i vanjske cijevi, ovisno o davanju bušotine, no kod takvih verzija moguć je ulaz plina u cilindar sisaljke te je pojava pijeska nepoželjna.

### 3.5.5. Tanjurasto plinsko sidro

Konstrukcija ovakvog sidra (engl. *cup type*) (slika 3-6.) koncipirana je na temelju niza tanjura koji se nalazi u sklopu tijela sidra i uronjene perforirane cijevi koja mora biti minimalno 400 mm udaljena od zadnjeg tanjura. Tanjuri su udaljeni odgovarajućim udaljenostima te se između svakog tanjura nalazi različit broj perforacija zbog različite količine fluida koja prilazi unutarnjoj cijevi. Njima se postiže visok koeficijent separacije, no nedostatak su složenost izvedbe i smanjenje učinkovitosti pri pojavi pijeska (Zelić i Čikeš, 2006).

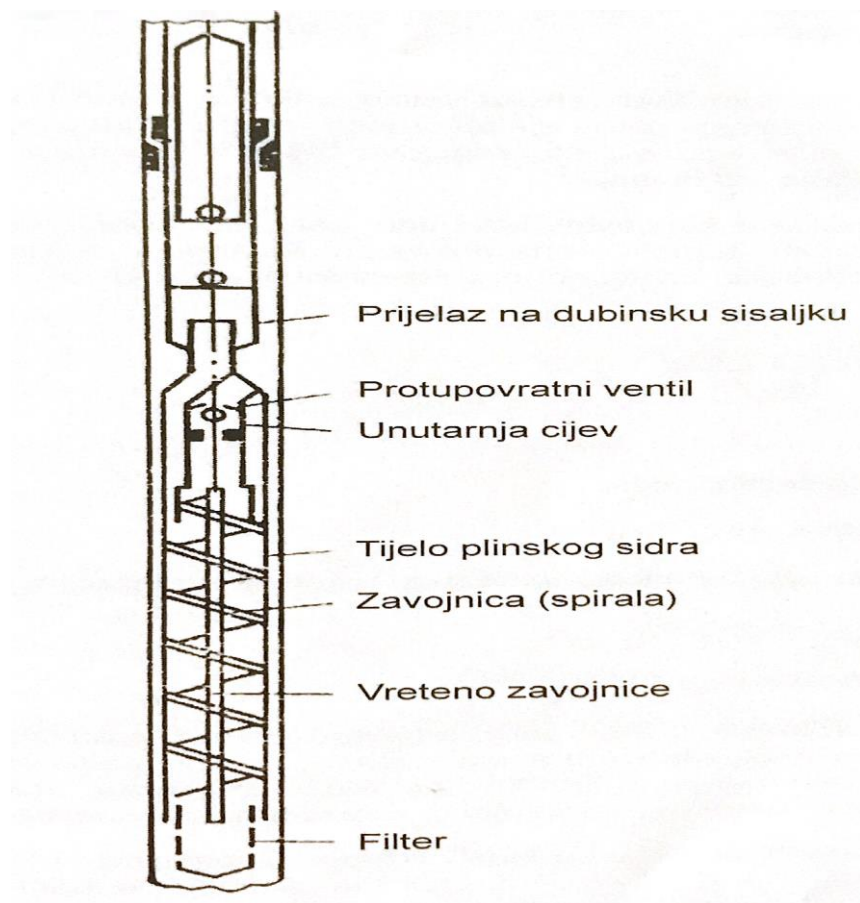


Slika 3 - 5. Tanjurasto plinsko sidro (<http://www.petroleum-machinery-china.com/api-5ct-downhole-tools/api-cup-type-gas-anchors.html>)

### 3.5.6. Vijčasto plinsko sidro

Autori Zelić i Čikeš spominju i posebnu verziju plinskih sidara, vijčasto plinska sidra (slika 3-7.), koja su autori objasnili u sljedećem tekstu. Takva sidra koriste se u uvjetima velikog davanja bušotina viskozne nafte, s malim sadržajem plina koji je raspršen u nafti. U takvim uvjetima, djelovanje gravitacijske sile, na kojem se temelje prethodno opisana sidra, nije djelotvorno. Sidro se sastoji od tijela unutar kojeg se nalazi spirala s vretenom. Na gornjem dijelu sidra nalazi se kraća cijev s protupovratnim ventilom koji vodi plin u prstenasti prostor bušotine te sprječava povrat kapljevine u usisnu cijev sisaljke. Ulaskom smjese kapljevine i plina u tijelo sidra, dolazi do separacije kapljevine uslijed djelovanja centrifugalne sile te se kapljevina kreće prema gore

na usis sisaljke, dok se istovremeno, odvojeni plin kreće sredinom sidra uz vreteno do ispušne cijevi. Manji promjeri ovakvih sidara su efikasniji (koeficijent separacije veći) zbog toga što je djelovanje centrifugalne sile na odvajanje faza jače kod konstrukcija manjeg promjera (Zelić i Čikeš, 2006).



Slika 3 - 6. Vijčasto plinsko sidro (Zelić i Čikeš, 2006)

#### 4. UTJECAJ PIJESKA NA RAD SISALJKI

U naftnoj industriji, zbog niskih cijena ugljikovodika, kao i zbog sve većih troškova održavanja, velika važnost pridodaje se načinu opremanju bušotine kako bi se ostvarila maksimalna proizvodnost i trajnost opreme. Jedna od neželjenih pojava u segmentu proizvodnje nafte predstavlja dotjecanje pijeska u kanal bušotine, koji utječe na djelotvornost rada ugrađene opreme. Pijesak u bušotinu proizlazi ponajviše iz nekonsolidiranih geoloških formacija nositelja ugljikovodika, u većini slučajeva, iz nekonsolidiranih (nevezanih) pješčenjaka. Mehanizam proizvodnje pijeska iznimno je složen i uzrokovan je mnogim čimbenicima od početnog razrušavanja dlijetom, opremanja, ostvarivanje proizvodnje, do injektiranja i slično (Matanović i Moslavac, 2007). Pijesak predstavlja neželjenu pojavu i nastoji ga se u što većoj mogućnosti ukloniti ili onemogućiti mu pristup ulaska u bušotinu i pripadnu opremu bušotine jer može doći do začepjenja bušotine, erodiranja opreme te smanjenja proizvodnosti bušotine, čime utječe na ukupnu ekonomičnost bušotine (odlaganje).

Kako se u ovom radu obrađuje utjecaj pijeska na rad dubinske sisaljke, on se očituje u smanjenju djelotvornosti sisaljke, abrazijskog trošenja dubinske i površinske opreme (sisaljka, tubing, sapnice, erupcijski uređaj) te samim time i radnog vijeka sisaljke. Sve se to očituje u češćim remontnim zahvatima, odnosno povećanjem troškova održavanja, tzv. OPEX (engl. *operating expenses*).

U većini proizvodnje nafte eruptivnim načinom, cilj je ili spriječiti ulaz pijeska u bušotinu ili iznijeti ga na površinu na način da što manje ošteti uzlazni niz cijevi, pripadajuću podzemnu opremu te površinski sklop s erupcijskim uređajem, u cilju da ne dođe do njegovog taloženja na dnu bušotine što dovodi do niza problema prilikom proizvodnje (prekrivanje dijela proizvodnih intervala). Ako je brzina iznošenja kapljevine nedovoljna da iznese čestice pijeska do površine, početak će se nakupljati unutar zaštitnih cijevi. Kasnije, proizvodni interval može biti začepjen istaloženim pijeskom čime će doći do postupnog smanjivanja proizvodnje sve dok se interval u potpunosti ne zasiti/začepi pijeskom (engl. *sanded up*) čime prestaje proizvodnja fluida i pristupa se čišćenju bušotine. U situaciji kada je brzina kapljevine dovoljna za iznošenje čestica na površinu, pijesak se taloži u površinskom sklopu kao i u pripadnom separatoru i priključnom naftovodu. Pri značajnom čepjenju u jednom od tih dijelova, također dolazi do značajnog

smanjenja proizvodnosti. Potrebno je ugušiti bušotinu, otvoriti površinsku opremu i pristupiti ručnom čišćenju pijeska te kasnije ponovno pustiti bušotinu u proizvodnju. Nakupljanje pijeska predstavlja dodatan trošak koji se manifestira kao trošak samog čišćenja kao i trošak gubitka proizvodnje kapljevine. Kako bi se osigurala neometana i stalna proizvodnja dozvoljenih količina fluida, potrebno je kontrolirati taloženje pijeska.

U primarnoj proizvodnji nafte, to se najčešće rješava nekom od sljedećih metoda (Matanović i Moslavac, 2007):

- smanjenjem proizvodnje slojnog fluida, čime se smanjuje utok pijeska (neekonomično);
- povećanjem proizvodnje slojnog fluida, čime se ubrzava kretanje fluida u uzlaznim cijevima i smanjuje taloženje pijeska (primjena uzlaznog niza manjeg promjera ili privremeno podizanje kapljevine plinom) i
- povećanjem brzine protjecanja slojnog fluida uz preusmjerenje dijela toka slojnog fluida natrag u bušotinu.

U proizvodnji nafte dubinskim sisaljka, pri pojavi pijeska, ne pristupa se problemu na način da se uneseni pijesak iznosi na površinu, već ga se nastoji odvojiti prije ulaska u sisaljku primjenom pješčanih sidra, koja će biti objašnjena u daljnjem dijelu rada. Ako je problematika pijeska takva da ga je potrebno iznositi zajedno s kapljevnom, potrebno je ugraditi specijalnu sisaljku koja će biti objašnjena u radu.

#### **4.1. Podrijetlo pijeska**

Dotok slojnog pijeska prisutan je u proizvodnji nafte od samih početaka naftne industrije. Usvojena oprema i alati, kao i tehnološki zahvati koriste se već dugo vremena, no primjena u praksi je bila loša zbog neodgovarajućeg korištenja. Zrnca pijeska stabilizirana su tlačnim silama zbog djelovanja geostatičkog tlaka (opterećenje krovinskim naslagama), kapilarnim silama i vezivom među zrnima pijeska. Stoga, razlozi za proizvodnju slojnog pijeska povezuju se sa (Matanović i Moslavac, 2007):

- povlačenjem čestica zbog trenja sa slojnim fluidom koji protječe, što se povećava s brzinom protjecanja i viskoznošću fluida;
- smanjenjem čvrstoće stijena, koje se povezuje s proizvodnjom vode koja otapa vezivo među zrnima ili povećanjem zasićenja vodom dolazi do smanjenja kapilarnih sila;



- smanjenjem relativne propusnosti stijene za naftu s povećanjem zasićenja stijene vodom, uz istovremeno povećanje pada tlaka pri protjecanju za istu ostvarenu proizvodnju nafte i  
-smanjenjem tlaka u ležištu zbog čega dolazi do većeg slijeganja ležišta čime može biti razrušeno vezivo među zrnima.

Kao što je već rečeno, najčešći izvor pijeska predstavljaju nevezani, odnosno nekonsolidirani slojevi pješčenjaka.

#### 4.2. Zakonitost sedimentiranja čestice pijeska

Kretanje pijeska u proizvedenoj kapljevini, odnosno kretanje čestica u bilo kojoj kapljevini općenito, objašnjeno je zakonitošću sedimentiranja okruglih čestica u kapljevini, koja se temelji na Stokesovu zakonu. Stokesov zakon govori kretanju čestice kroz realni fluid, odnosno on glasi: pri gibanju čestice kroz realni fluid sila otpora sredstva razmjerna je brzini gibanja, polumjeru čestice i viskoznosti fluida (Brkić, 2018).

$$F_d = 6\pi\mu Rv \quad (4-1)$$

Gdje su:

$F_d$  – sila trenja, N

$\mu$  - dinamička viskoznost fluida, Pas

$R$  – radijus čestice, m

$v$  – brzina čestice, m/s

Za laminarni protok, odnosno pri maloj vrijednosti Reynoldsovog broja, brzina sedimentacije čestica glasi:

$$v_{\xi} = \frac{gd_{\xi}^2(\rho_{\xi} - \rho_l)}{18\mu_l} \quad (4-2)$$

Gdje su:

$v_{\xi}$  – brzina sedimentacije čestica, m/s

$d_{\xi}$  – srednji promjer čestice, m

$\rho_{\xi}, \rho_1$  – gustoća pijeska, odnosno kapljevine, pod uvjetima separacije,  $\text{kg/m}^3$

$g$  – ubrzanje sile teže ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$\mu_1$  – dinamička viskoznost kapljevine, Pas

U primarnoj proizvodnji kapljevine, uneseni pijesak potrebno je iznijeti na površinu. Kako bi se to ostvarilo, odnosno iznosile s proizvodnim fluidom, brzina kretanja proizvedene nafte, tj. kapljevine mora biti veća od spomenute brzine taloženja (sedimentiranja) čestica pijeska. Stoga, ako je brzina fluida manja od brzine čestica, dolazi do taloženja i stvaranja pješčanog čepa te dolazi do osjetnog smanjenja proizvodnosti. Granica, odnosno razdjelnica koja govori hoće li se čestice pijeska taložiti ili kretati s fluidom iznosi 2,5, tj. omjer brzine kapljevine i brzine sedimentacije pijeska treba biti  $v_1 / v_{\xi} \approx 2,5$ . Zato, ako je odnos  $v_1 / v_{\xi}$  manji od 2,5, tada će se pijesak taložiti, a kada je  $v_1 / v_{\xi}$  veći od 2,5, čestice pijeska kreću se u struji kapljevine (Zelić i Čikeš, 2006). Eksperimentima kojima je donesen zaključak o razdjelnici omjera brzina temelji se na prosječnoj gustoći pijeska od oko  $2600 \text{ kg/m}^3$  i na promjer čestice pijeska do 0,6 mm.

### 4.3. Djelovanje pijeska na rad dubinskih sisaljki

Prilikom proizvodnje kapljevine s pijeskom dubinskim sisaljka kroz uzlazni niz cijevi, dolazi do gravitacijske separacije. Tada, teže i abrazivnije čestice pijeska, će se vratiti na dno niza klipnih šipki, odnosno odsjedat će na vrh sisaljke. Manje i slabije abrazivnije čestice pijeska ostat će suspendirane u kapljevini i iznešene na površinu. Teže čestice pijeska koje dolaze natrag u sisaljku se usitnjuju u manje čestice te ulaze u prostor između klipa i cilindra. Čestice koje uđu u taj međuprostor cilindra i klipa abrazijski djeluju na metalnu površinu dijelova sisaljke te ga troše, odnosno smanjuju mu debljinu, tj. površinski presjek elementa. Pri bušotinama s unosom pijeska (engl. *sand cut wells*), pijesak djeluje tako da se povećava zazor i dolazi do povećanja isticanja kapljevine iz klipa, čime se smanjuje obrok kapljevine iznesen na površinu. Na slici 4-1. je prikazan istrošeni klip sisaljke abrazijskim djelovanjem pijeska.



Slika 4 - 1. Istrošena metalna površina klipa sisaljke (Maher, 2016)

Što se tiče uzlaznog niza cijevi, pijesak stvara oštećenja u obliku erodiranih rupa, dok pijesak koji se nakuplja u spojnica cijevi svojim djelovanjem dovodi do izvijanja niza. Kako se unutar uzlaznog niza cijevi nalazi i niz klipnih šipki, dugotrajnim prolaskom suspendiranog pijeska dolazi i do sporog, ali kontinuiranog oštećivanja površina klipnih šipki (slika 4-2.)



Slika 4 - 2. Oštećenje klipne šipke (Maher, 2016)

#### 4.4. Pješčana sidra i specijalne sisaljke

Kao što je rečeno, proizvodnja pijeska je neželjena pojava te se ju nastoji ili spriječiti ili osigurati da proizvodnja pijeska bude unutar prihvatljivih operativnih i ekonomskih granica. Da bi kontrolirali proizvodnju pijeska, autori Zelić i Čikeš navode tri generalna načina:

- sprječavanjem dotoka pijeska iz ležišta u bušotinu bilo smanjenjem depresije na sloj, bilo konsolidacijom pribušotinske zone kemijskim sredstvima ili ugradnjom odgovarajućih pješčanih zasipa nasuprot perforiranoj zoni;
- stvaranjem uvjeta iznošenja pijeska na površinu i
- separacijom pijeska prije ulaza fluida u sisaljke pješčanim sidrima

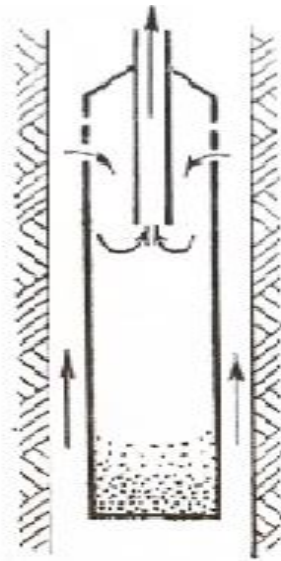
Prve dvije navedene metode ponajviše se odnose na primarnu proizvodnje kapljevine, odnosno na eruptivni način proizvodnje. Takve metode su uvelike raširene i postoji niz tehnika i materijala koje se primjenjuju kako bi se utjecaj pijeska minimalizirao. One se svakodnevno primjenjuju i zahtijevaju ozbiljan i opširan pristup problemu kako bi rješenje bilo što ekonomičnije i lakše izvedivo.

Prilikom proizvodnje kapljevine dubinskim sisaljka, kontrola unešenog pijeska izvodi se trećom navedenom metodom, odnosno separacijom pijeska prije ulaza fluida u sisaljku pješčanim sidrima. Već je napomenuto da se kod dubinskih sisaljki nastoji unešeni pijesak odvojiti i pokušati ga istaložiti, odnosno ne iznositi ga na površinu. Ako ga se ne uspije odvojiti, pristupa se ugradnji posebnih sisaljki za kvalitetno iznošenje na površinu. Autori Zelić i Čikeš navode dvije jednostavne konstrukcije pješčanih sidra:

- izravna (neposredna) konstrukcija i
- neizravna.

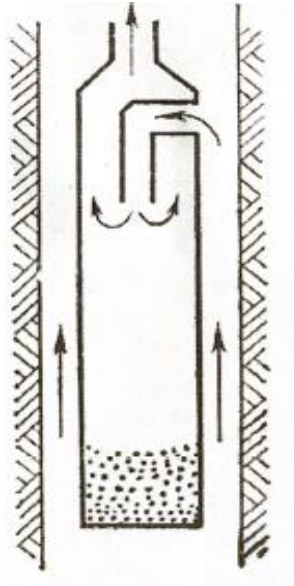
Pješčana sidra, kao i plinska sidra, predstavljaju metalne konstrukcije koje su ugrađene ispod sustava dubinske sisaljke, odnosno na dno bušotine. Ugrubo, sidro je cijevna alatka s zatvorenim dnom i otvorima po tijelu koje služe za ulaz fluida s pijeskom. Cilj sidra je, kada fluid s pijeskom uđe u njegovu konstrukciju, da dođe do odvajanja kapljevine i pijeska koji se nakuplja na zatvorenom dnu sidra. Kako s vremenom nakupljene količine pijeska budu velike, mora se pristupiti operacijama čišćenja pijeska kako ne bi utjecao na dubinsku sisaljku, kao i da ne dođe do zatrpavanja bušotine.

Izravna pješčana sidra sastoje se od uronjene usisne cijevi spojene sa sisaljkom i tijela sidra koje je većeg promjera. Takvo sidro, shematski prikazano na slici 4-3. ima otvore u gornjem dijelu tijela te kapljevina s pijeskom prolazi prstenastim prostorom između proizvodnog niza zaštitnih cijevi i tijela sidra i kroz perforacije ulazi u tijelo sidra. Tada se fluid kreće prema dolje prstenastim prostorom između uronjene usisne cijevi i tijela sidra. Uslijed promjene smjera kretanja fluida, dolazi do gravitacijskog odvajanja i taloženja čestica pijeska, a kapljevina se usmjerava na usis sisaljke.



Slika 4 - 3. Izravno pješčano sidro (Zelić i Čikeš, 2006)

Kod neizravnog pješčanog sidra (slika 4-4.), konstrukcija je izvedena od tijela povezanog sa sisaljkom i pripadajuće uronjene cijevi. U takvoj izvedbi, kapljevina s pijeskom iz ležišta također odlazi prema gore i ulazi u uronjenu cijev sidra, gdje se tada kreće prema dolje. Prilikom izlaska iz cijevi, kapljevina se kreće prstenastim prostorom tijela i ulazi u usis sisaljke, dok se teške čestice pijeska talože na dno pješčanog sidra. Naravno, da bi konstrukcija pješčanih sidra bila djelotvorna, u obe izvedbe mora biti zadovoljen uvjet omjera brzina kapljevine i brzine taloženja čestica, odnosno  $v_1 / v_c < 2,5$ . Praksa je pokazala da neizravno pješčano sidro, jednakih dimenzija kao izravno, ima bolje parametre separacije.



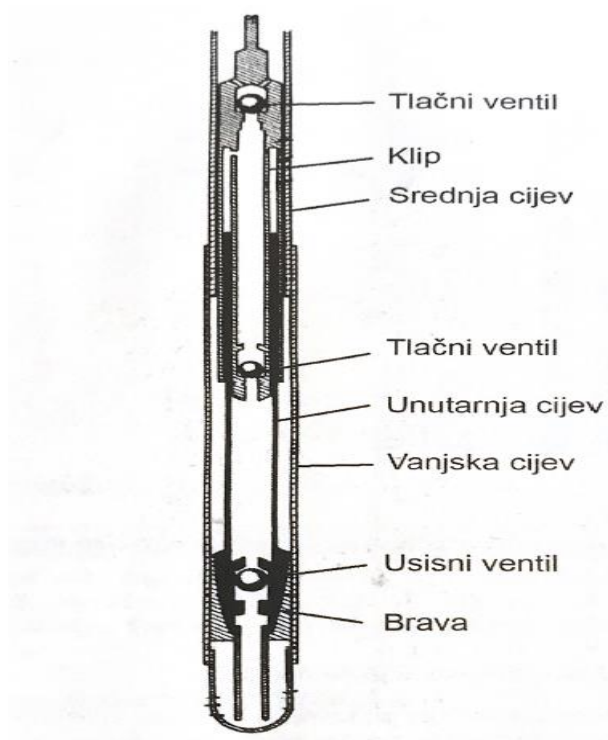
Slika 4 - 4. Neizravno pješčano sidro (Zelić i Čikeš, 2006)

Potrebno je napomenuti kako hidraulička duljina pješčanog sidra ne igra veliku ulogu na djelotvornost separacije, odnosno razmak između donjih perforacija na tijelu sidra i kraja usisne cijevi ne mora biti veći od 1 metra (Zelić i Čikeš, 2006).

Nadalje, u proizvodnji kapljevine s pijeskom, primjenjuje se i niz dubinskih sisaljki specijalne izvedbe. U nastavku će biti kratko pojašnjene tri izvedbe ovih specijalnih sisaljku s njihovom prednostima i nedostacima.

Dubinska sisaljka s prstenastim ventilom (engl. *Ring Valve Pump*) je vrsta sisaljke s dodatnim pomičnim sigurnosnim ventilom iznad tlačnog ventila. Prstenasti ventil kreće se usporedno s tijelom ventila te služi da se, prilikom hoda prema dolje, on zatvori čime smanjuje opterećenje fluida u tubingu na tlačni ventil. Prilikom proizvodnje pijeska, kod običnih sisaljki teži pijesak pada na vrh sisaljke i ulazi u prostor između klipa i cilindra. Prstenasta sisaljka omogućava da se pijesak taloži na vrhu prstenastog ventila i odlazi u prstenasti dio bušotine, a i time sprječava ulaz pijeska u sisaljku i trošenje dijelova. Također, kako neće doći do ulaska pijeska u sisaljku, prilikom ponovnog pokretanja sisaljke neće doći do značajnog povećanja sile trenja i mogućeg loma sisaljke (Mitra, 2012).

Sisaljka s tri cijevi (engl. *Three-Tube Pump*) je prikladna za primjenu u bušotinama s relativno velikim količinama pijeska i drugih nečistoća (Zelić i Čikeš, 2006). Unutarnja cijev sisaljke je fiksna i učvršćena za bravu, dok druge dvije prelaze preko srednje cijevi te su učvršćene za klipne šipke, jedna izvana, druga iznutra. Razlog zašto se koriste prilikom neželjene proizvodnje pijeska je taj što su zazori između dijelova (klip, cilindar) do tri puta veći nego kod konvencionalnih sisaljki, odnosno puno su šire spojeni. Unutarnja cijev služi kao klip i sadrži dodatni tlačni ventil, te, iako dolazi do propuštanja kapljevine uslijed velikog zazora, korištenje ovakve vrste sisaljke rezultira u puno manjem trošenju pokretnih dijelova i u isto vrijeme stvara dovoljno turbulencija koje izbacuju pijesak iz sisaljke i sprječavaju njegovo taloženje. Sisaljka s tri cijevi prikazana je na slici 4-5.



Slika 4 - 5. Sisaljka s tri cijevi (Zelić i Čikeš, 2006)

Sisaljka sa šupljom cijevi (engl. *Pump with Hollow Valve Rod*) je vrlo slična dvostupanjskoj dubinskoj sisaljci. Ova sisaljka omogućava dobru djelotvornost u bušotinama s problemima unosa pijeska, kao i s problemima unosa plina, kao što je prijašnje rečeno u radu. Zbog višestrukog prijenosa fluida kroz sisaljku (međukomore, dodatni tlačni ventili), omogućava se prijenos pijeska prema površini tijekom crpljenja, no ne sprečava se taloženje između uzlaznog niza cijevi i cilindra.

## 5. ZAKLJUČAK

Podizanje kapljevine iz bušotine je moguće eruptivnim načinom ili jednom od mehaničkih metoda podizanja. Primarna proizvodnja kapljevine podrazumijeva crpljenje ležišnom energijom i energijom akumuliranom u stlačenom plinu. Kada ležišna energija postane nedovoljna za svladavanje svih padova tlakova pri protjecanju ili ako je proizvedena količina kapljevine manja od željene, potrebno je bušotinu opremiti na drugačiji način, tj. ugraditi opremu za mehaničko podizanje kapljevine.

Najstarija te i najkorištenija metoda mehaničkog podizanja kapljevine, kako u Hrvatskoj, tako i u svijetu, jest proizvodnja pomoću dubinskih sisaljki s klipnim šipkama. Sama metoda je primjenjiva na većini naftnih ležišta, te je inženjerski iznimno prihvaćena zbog svoje tehničko-tehnološke jednostavnosti i relativno jednostavnih remontnih zahvata. Iz tehničke perspektive, čitava konstrukcija sastoji se od nadzemne opreme od čega najveći dio čini njihalica, dok podzemnu opremu obuhvaćaju klipne šipke koje su povezane sa sklopom dubinske sisaljke.

Ovaj završni rad obuhvatio je utjecaj plina i pijeska na rad dubinskih sisaljki, odnosno utjecaj tih neželjenih medija na sastavne dijelove dubinskih sisaljki. Plin koji nastaje uslijed pada ležišnog tlaka (otopljen u nafti) predstavlja neželjen fluid unutar dubinskih sisaljki ponajviše djelujući na volumetrijsku djelotvornost sisaljke i posljedično na kapacitet sisaljke. Nadalje, pojavom plina unutar sisaljke može doći do pojave hidrauličkog udara čime dolazi do izvijanja niza klipnih šipki i oštećenja dijelova sisaljke i nadzemne opreme te do pojave plinskog čepa gdje određeni prostor unutar cilindra sisaljke zauzme plin čime dolazi do neusklađenosti otvaranja usisnog i tlačnog ventila kao i do mogućeg nepostojanja iscrpka. Za rješavanje problema utoka plina primjenjuju se razna rješenja od čega prednjače ugradnja i izvedba raznih plinskih sidara čime se nastoji odvojiti plin prije ulaza na usis sisaljke i njegovo odvođenje kroz prstenasti prostor. Najlakša i djelotvorna izvedba plinskog sidra jest prirodno ili uronjeno plinsko sidro gdje se dubinska sisaljka postavlja ispod propucanih proizvodnih intervala gdje razlikama u gustoći fluida dolazi do djelotvornog odvajanja plina iz kapljevine. Također, plinsko sidro s pakerom spada u djelotvornije izvedbe sidara gdje se gravitacijskom separacijom sprječava ulaz plina u sisaljku.



Glede pijeska, on najviše utječe na erozijsko trošenje i vijek trajanja opreme kao i na moguće začepljenje bušotine. Pijesak unutar bušotine proizlazi najviše iz nekonsolidiranih pješčenjaka gdje uslijed djelovanja raznih sila i pojava, ponajviše zbog smanjenja čvrstoće, tlaka i propusnosti dolazi do njegovog pokretanja i ulaska u bušotinu. U proizvodnji dubinskim sisaljka, cilj je proizvedeni pijesak istaložiti na dno bušotine te ga kasnije ukloniti. Ako je pijesak već ušao u prostor sisaljke, nastoji ga se dovoljnom brzinom iznošenja kapljevine iznijeti na površinu kako ne bi došlo do njegovog taloženja (zakonitost sedimentiranja) na vrhu i unutar sisaljke. Pijesak se odvaja korištenjem izravnih i neizravnih izvedbi pješćanih sidara, gdje je iskustveno potvrđeno da je ono neizravno djelotvornije. Također, za smanjenje utjecaja pijeska koristi se niz specijalnih izvedbi sisaljki kako bi se ili spriječio ulaz pijeska u vrh sisaljke ili kvalitetno pijesak iznio na površinu.

Zaključno, utjecaj plina i pijeska na djelotvornost dubinske sisaljke rezultira ponajviše smanjenjem volumetrijske djelotvornosti sisaljki te uranjenim i intenzivnim trošenjem površinske i podzemne opreme. Kako bi se njihov utjecaj smanjio, potrebno je stalno pratiti rad bušotine i proizvodne parametre pri čemu je bitna optimalna depresija na sloj rad ostvarenja zadane proizvodnje i sprečavanja većeg utoka pijeska u kanal bušotine. Sukladno tome, potrebno je izbjeći veće kapitalne troškove, no u većini slučajeva kvalitetno opremanje bušotine dovodi do smanjenja učestalosti i troškova remontnih radova.

## 6. 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. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B. (2011.): Opremanje i održavanje bušotina, izd. Zagreb: AREA d.o.o.
4. MITRA, N. K. (2012): Principles of Artificial Lift, izd. New Delhi, India: Allied Publishers
5. Priručnik za dubinske sisaljke-Axelson (1993.), izd. Zagreb: INA-NAFTAPLIN
6. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M. (2006.): Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama, izd. Zagreb: INA d.d.

### INTERNET IZVORI:

1. BELLARBY, J. (2009): Well completion design. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376736108002069>, (18.6.2020.)
2. BOHORQUEZ, R. (2006): Improved downhole gas separators in SRP systems. URL: <http://docplayer.net/58945125-Improved-downhole-gas-separators-in-srp-systems.html>, (31.7.2020.)
3. MAHER, R. (2016): Managing Downhole Failures in a Rod Pumped Well. URL: <https://www.slideshare.net/RamezMaher/managing-downhole-failures-in-a-rod-pumped-well>, (20.7.2020.)
4. MCCOY, J. (2012): Diverter Gas Separator. URL: <https://pdfslide.net/documents/diverter-gas-separator-4-gas-separator-liquid-diameter-separator.html>, (12.8.2020.)
5. PETROLEUM MACHINERY CHINA, API Cup Type Gas Anchors. URL: <http://www.petroleum-machinery-china.com/api-5ct-downhole-tools/api-cup-type-gas-anchors.html>, (20.6.2020.)
6. RANJAN, S. (2019): Production Optimization of SRP wells using PROSPER software. URL: <https://www.slideshare.net/RonakPandya10/production-optimization-of-srp-wells-using-prosper-software>, (1.8.2020.)

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom “ Utjecaj plina i pijeska na djelotvornost rada dubinskih sisaljki ” izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Ante Radišić



KLASA: 402-04/20-01/166  
URBROJ: 251-70-03-20-3  
U Zagrebu, 04.09.2020.

**Ante Radišić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/166, UR.BROJ: 251-70-12-20-1 od 13.05.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### UTJECAJ PLINA I PIJESKA NA DJELOTVORNOST RADA DUBINSKIH SISALJKI

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)