Istodobna metoda gušenja bušotine i usporedba s inženjerskom metodom

Erceg, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:919800

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

ISTODOBNA METODA GUŠENJA BUŠOTINE I USPOREDBA S INŽENJERSKOM METODOM

Diplomski rad

Davor Erceg

N 163

Zagreb, 2017

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ISTODOBNA METODA GUŠENJA BUŠOTINE I USPOREDBA S INŽENJERSKOM METODOM

DAVOR ERCEG

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Primarna kontrola tlaka u bušotini vrši se putem hidrostatičkog tlaka stupca fluida u kanalu bušotine. Ako je hidrostatički tlak manji od slojnog tlaka, vrlo će vjerojatno doći do dotoka slojnog fluida u kanal bušotine. Tada se pristupa gušenju bušotine. Tema ovog diplomskog rada je istodobna metoda gušenja bušotine i usporedba iste s inženjerskom metodom. U radu su slikovito prikazani koraci provođenja istodobne metode i, u svrhu boljeg razumijevanja, koraci provođenja inženjerske metode. Provedeni proračun razvoja tlaka na bušaćim šipkama i na ušću bušotine, s istim ulaznim podacima o bušotini, dotoku i svojstvima sloja, prikazuje osnovne razlike između dvije navedene metode. Razvoj tlaka prilikom provođenja obje navedene metode prikazan je na dijagramima koji prikazuju ponašanje tlaka na bušaćim šipkama i tlaka na ušću bušotine u ovisnosti o broju hodova pumpe.

Ključne riječi: kontrola tlaka, istodobna metoda, tlak na bušaćim šipkama, tlak na ušću
Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 1 tablicu, 21 sliku i 8 referenci
Jezik izvornika: hrvatski
Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentor: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNf-a
Ocjenjivači: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNf-a
Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNf-a
Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a

Datum obrane: 17.02.2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
And Petroleum Engineering

Master's Thesis

CONCURRENT METHOD OF WELL KILLING AND COMPARISON TO WAIT AND WEIGHT METHOD

DAVOR ERCEG

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Petroleum Engineering Department
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

Hidrostatic pressure, which is result of the mud held in the annular space of well, is declarated as the primary well control. If the hidrostatic pressure is lower than formation pressure kick will probably occur. Next step , if this happen, is well killing. The main subject of this thesis is concurrent method of well killing and comparison to wait and weight method. Main steps of concurrent and wait and weight method are shown and compared to each other. The calculation of drill pipe pressure and casing pressure, within same well, kick and formation characteristics, shows main differencies between concurrent and wait and weight method. Pressure behaviour is drawn on charts which show drill pipe and casing pressure related to volume pumped into the well.

Keywords: well control, concurrent method, drill pipe pressure, annular pressure

Thesis contains: 39 pages, 1 table, 21 figures and 8 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroelum Engineering, Pierottieva 6

Supervisor: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

Reviewers: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: February 17, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Sadržaj

Popis slika ..... **I**

Popis tablica ..... **II**

Popis korištenih oznaka i jedinica ..... **III**

1. UVOD **1**

2. TLAKOVI PRILIKOM GUŠENJA BUŠOTINE **4**

3. INŽENJERSKA METODA GUŠENJA BUŠOTINE **6**

4. ISTODOBNA METODA GUŠENJA BUŠOTINE **12**

5. RAZVOJ TLAKA KOD PROVOĐENJA ISTODOBNE METODE I USPOREDBA S REZULTATIMA PRILIKOM PROVOĐENJA INŽENJERSKE METODE **20**

5.1. Uvodni podaci za proračun razvoja tlakova **20**

5.2. Tlak na bušaćim šipkama **24**

5.3. Tlak na ušću bušotine **28**

6. ZAKLJUČAK **38**

7. LITERATURA **39**

Popis slika

Slika 3-1. Stanje u bušotini prije početka gušenja bušotine…….……..7
Slika 3-2. Otežana isplaka dosegnula dlijeto…….…….....7
Slika 3-3. Otežana isplaka u području prstenastog prostora…….……..8
Slika 3-4. Plin u području ušća, najveći tlak očitan na ušću bušotine……...…..9
Slika 3-5. Bušotina je ugušena…….10
Slika 3-6. Prikaz razvoja tlakova kod gušenja bušotine inženjerskom metodom……....11
Slika 4-1. Prikaz stanja u bušotini kada je bušotina zatvorena……13
Slika 4-2. Početni dio istodobne metode u kojem se cirkulira postojećom isplakom……..14
Slika 4-3. Isplaka povećane gustoće (ρ_1) dosegnula dlijeto…….……15
Slika 4-4. Isplaka povećane gustoće (ρ_1) ušla u prstenasti prostor dok se isplaka još veće gustoće (ρ_2) utiskuje u bušaći alat i dosegnula je dlijeto……..15
Slika 4-5. Prikaz stanja u bušotini kada su tri isplake različitih gustoća prisutne u kanalu bušotine i tlak na ušću bušotine na maksimalnoj vrijednosti……...……16
Slika 4-6. Dotok u potpunosti istisnut iz kanala bušotine koji je sada ispunjen trima isplakama različitih gustoća…….……..……..17
Slika 4-7. Kanal bušotine u potpunosti ispunjen otežanom isplakom i bušotina je ugušena…….……18
Slika 4-8. Tlak na bušaćim šipkama i tlak na ušću bušotine su jednaki nuli i bušotina je ugušena…….…….…….…..19
Slika 5-1. Prikaz bušotine za koju je izrađen proračun razvoja tlakova kod izvođenja istodobne metode gušenja bušotine…….……..…21
Slika 5-2. Prikaz razvoja tlaka na bušaćim šipkama prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine…….……..……25
Slika 5-3. Razvoj tlaka na bušaćim šipkama prilikom provođenja inženjerske metode gušenja bušotine…….……..……27
Slika 5-4. Prikaz stanja u bušotini za navedeni proračun u trenutku nakon 12800 hodova pumpe……...31
Slika 5-5. Prikaz jednadžbe za tlak na ušću bušotine……..31
Slika 5-6. Razvoj tlaka na ušću bušotine prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine…….……...33
Slika 5-7. Prikaz razvoja tlaka na ušću bušotine prilikom izvođenja inženjerske metode gušenja bušotine…….……..35

Popis tablica

Tablica 5-1. Usporedba vrijednosti tlaka na ušću bušotine za istodobnu i inženjersku metodu gušenja bušotine……...37

Popis korištenih oznaka i jedinica

Oznaka	Značenje	Jedinica
g	-ubrzanje sile teže	[m/s^2]
$H_{BŠOK}$	-duljina bušaćih šipki u otvorenom kanalu	[m]
H_d	-visina dotoka	[m]
$H_{TŠ}$	-duljina teških šipki	[m]
n	-broj hodova pumpe	hod
P_H	-hidrostatički tlak u bušotini	[Pa]
P_{hd}	-hidrostatički tlak stupca dotoka fluida	[Pa]
P_{HPP}	-hidrostatički tlak u prstenastom prostoru	[Pa]
P_i	-početni tlak na dno bušotine	[Pa]
P_{sl}	-slojni tlak	[Pa]
$P_{TBŠZ}$	-tlak na bušaćim šipkama	[Pa]
P_{TCK}	-konačni tlak cirkulacije	[Pa]
P_{TCP}	-početni tlak cirkulacije	[Pa]
P_{TCS}	-smanjeni tlak cirkulacije	[Pa]
P_{TUBZ}	-tlak na ušću bušotine (u prstenastom prostoru)	[Pa]
ρ_1	-gustoća "međuisplake"	[kg/m^3]
ρ_i	-gustoća isplake za bušenje	[kg/m^3]
ρ_g	-gustoća isplake za gušenje	[kg/m^3]
TVD	-vertikalna dubina kanala bušotine	[m]
TVD_d	-dubina sredine stupca dotoka fluida	[m]
V'_P	-jedinični volumen unutar bušaćeg alata	[dm^3/m']
V'_{pp}	-jedinični volumen prstenastog prostora	[dm^3/m']

1. UVOD

Slojni fluid (nafta, prirodni plin, slojna voda) se u ležištu nalazi pod tlakom i pod tim tlakom ima tendenciju kretanja prema površini. Ukoliko se taj tlak i potencijalno kretanje slojnog fluida prema površini ne bi kontrolirali postojala bi realna opasnost za opremu i okoliš, a ponajviše, i najvažnije, za ljude. Primarna kontrola tlaka vrši se putem hidrostatičkog tlaka stupca fluida (isplake) u bušotini. Isplaka mora biti dovoljne gustoće kako bi nadmašila slojni tlak pod kojim se slojni fluid nalazi u ležištu. Isto tako gustoća isplake ne smije premašiti tlak frakturiranja stijena. Posljedica prevelike gustoće isplake, odnosno prevelikog hidrostatičkog tlaka u kanalu bušotine je gubitak cirkulacije. Gubitak cirkulacije izravno znači smanjenje visine stupca isplake u kanalu bušotine, a samim time i hidrostatičkog tlaka koji je protuteža slojnom tlaku. Ukoliko isplaka, odnosno njena gustoća, ne zadovoljava jedan od navedenih uvjeta postoji velika vjerojatnost da će doći do dotoka slojnog fluida u bušotinu koji može rezultirati erupcijom. Erupcija fluida iz kanala bušotine može završiti katastrofalno u svakom aspektu, a navedeni problemi su izraženiji u trenucima kada nema cirkulacije fluida u kanalu bušotine. Cirkulacija fluida u prstenastom prostoru odvija se prema površini najčešće brzinama između 25 i 60 m/min, ovisno o promjerima šipki i kanala bušotine (CROSCO d.o.o., 2014). Kako fluid teče prema gore tako su otpori protjecanju usmjereni prema dolje što rezultira većim tlakom na sloj od onog kojeg ostvaruje isplaka u kanalu bušotine u statičkim uvjetima. Značajan broj dotoka fluida u kanal bušotine događa se prilikom mirovanja bušotine, odnosno u trenucima kada nema cirkulacije (Schlumberger, 1999).

Još jedan od problema koji se može pojaviti prilikom manevriranja alatkama u kanalu bušotine je pojava tlaka klipovanja (*engl. swab pressure*) i tlaka pulziranja (*engl. surge pressure*). Do efekta klipovanja dolazi kod izvlačenja alatki iz kanala bušotine. Ako se alatke izvlači na neadekvatan način tlak fluida ispod dlijeta može pasti ispod vrijednosti slojnog tlaka što može rezultirati dotokom slojnog fluida u kanal bušotine. Suprotno ovoj pojavi je pojava tlaka pulziranja koji se još naziva hidrauličkim udarom. Tlak pulziranja se pojavljuje prilikom spuštanja alatki u bušotini. Ukoliko se spuštanje vrši na neadekvatan način tlak ispod dlijeta može porasti do vrijednosti iznad tlaka frakturiranja što može rezultirati frakturiranjem stijena o čemu je već bilo riječi.

Parametri na koje treba paziti kako bi se izbjegle navedene pojave su (CROSCO d.o.o., 2014):

- brzina kojom se manevrira alatkama (brzina spuštanja i izvlačenja alatki) jer smanjenje brzine izvlačenja/spuštanja alatki na polovicu vrijednosti može rezultirati smanjenjem vrijednosti tlaka klipovanja na vrijednost nekoliko puta manju,
- promjeri alatki kojima se manevrira i promjer samog kanala bušotine, te
- svojstva isplake (viskoznost, gustoća, svojstva gela isplake).

Jedan od uzroka dotoka slojnog fluida u kanal bušotine je neadekvatno dopunjavanje kanala bušotine isplakom prilikom vađenja alata. Svaka alatka ima svoj volumen koji se mora nadomjestiti istom količinom isplake (ovisno o tome radi li se o mokrom ili suhom vađenju) kako ne bi došlo do pada nivoa isplake u kanalu bušotine. Pad nivoa isplake znači manji hidrostatički tlak u kanalu bušotine, a već je navedeno kakve posljedice to može imati.

Dodatni problem može se pojaviti tijekom bušenja kroz slojeve sa znatno povišenim tlakom, što također može uzrokovati velike probleme. Hoće li u ovoj situaciji doći do dotoka ili ne ponajviše ovisi o poroznosti i propusnosti same stijene.

Sekundarna kontrola tlaka služi za sprječavanje erupcije ako je došlo do dotoka slojnog fluida u kanal bušotine, odnosno ako primarna kontrola tlaka nije bila na zadovoljavajućoj razini. Sekundarnu kontrolu tlaka predstavljaju prvenstveno preventeri koji svojim zatvaranjem brtve prostor oko/unutar alatki u kanalu bušotine ili, ukoliko postoji potreba za tim, zatvaraju cijeli promjer kanala bušotine. Ostala oprema bitna za sprječavanje erupcije i gušenje same bušotine je (CROSCO d.o.o., 2014):

- hidraulička jedinica za upravljanje preventerskim sklopom,
- podesiva sapnica (*engl. choke*),
- uvodna prirubnica (*engl. casing bowl*),
- bušaća prirubnica (*engl. drilling spool*),
- vod za gušenje *(engl. kill line*),
- vod za prigušivanje (*engl. choke line*),
- vod za punjenje (*engl. hole fill line*) i
- razvodnik (*engl. choke manifold*).

Kada je bušotina zatvorena i prisutan je dotok slojnog fluida u kanal bušotine pristupa se gušenju bušotine. Gušenje bušotine je postupak vraćanja primarne kontrole tlaka u bušotini.

Postoji više različitih metoda gušenja bušotine (CROSCO d.o.o., 2014):

- bušaća metoda,

- inženjerska metoda,
- istodobna metoda,
- volumetrijska metoda,
- ¨top kill¨ metoda,
- metoda malog tlaka na sapnici.

Tema ovog diplomskog rada je istodobna metoda gušenja bušotine (*engl. concurrent method*). Pod pojmom "istodobna metoda" podrazumijeva se istodobno istiskivanje dotoka slojnog fluida i otežavanje isplake kojom se istiskivanje obavlja. U radu će se prikazati sami postupak provođenja istodobne metode, provesti proračun potreban za izvođenje navedene metode te usporediti dobiveni rezultati s rezultatima dobivenim prilikom izvođenja inženjerske metode za iste početne uvjete.

2. TLAKOVI PRILIKOM GUŠENJA BUŠOTINE

Zajedničko svim metodama gušenja bušotine je to da se kod svake od metoda tlak na dno bušotine održava jednakim ili većim od slojnog tlaka kako bi se spriječio novi dotok slojnog fluida prilikom samog gušenja bušotine.

Tlakovi na ušću bušotine prilikom ugušivanja bušotine biti će direktno ovisni o volumenu dotoka slojnog fluida. Što je veći dotok u kanal bušotine, to će biti veći tlak očitan na ušću bušotine, što se posebno odnosi na dotok plina (kretanjem prema površini plin ekspandira pa se samim time i povećava tlak na ušću bušotine).

Postoji više očitanja tlaka na površini koja se moraju razmotriti i sustavno pratiti za pravilno i točno provođenje određenog postupka gušenja bušotine. Jedno od navedenih očitanja je tlak na bušaćim šipkama nakon zatvaranja bušotine ($P_{TBŠZ}$). To je tlak koji zapravo prikazuje razliku između slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka stupca fluida unutar alatki koje se nalaze u kanalu bušotine. Drugi očitani tlak je tlak na ušću bušotine (P_{TUBZ}) koji prikazuje razliku između slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka stupca fluida u prstenastom prostoru. Vrijednost tlaka na ušću bušotine uvijek je veća od vrijednosti tlaka na bušaćim šipkama. Razlog tomu je taj što se u prstenastom prostoru uz korištenu isplaku nalazi i dotekli fluid manje gustoće od gustoće isplake što smanjuje hidrostatički tlak na dno bušotine. Navedena konstatacija ne vrijedi u slučajevima kada je gustoća isplake povećana zbog velike količine nabušenog materijala i za dugačke horizontalne kanale bušotine.

Tlak koji se pojavljuje kod samog gušenja bušotine uz smanjeni broj hodova pumpe naziva se smanjeni tlak cirkulacije (P_{TCS}). Kao što mu i samo ime kaže, vrijednost tlaka cirkulacije je smanjena i za to postoji više razloga. Smanjeni tlak cirkulacije omogućava razvijanje manjih otpora protjecanju u prstenastom prostoru, osigurava više vremena za lakše otežavanje isplake te olakšava rukovanje sapnicom što smanjuje mogućnost oštećenja same sapnice. Smanjeni tlak cirkulacije je direktno ovisan o broju hodova pumpi. Ukoliko se broj hodova pumpi smanji na polovicu vrijednosti, smanjeni tlak cirkulacije smanjiti će se na četvrtinu vrijednosti prijašnjeg tlaka cirkulacije.

Prilikom čišćenja kanala bušotine tlak cirkulacije koji se pojavljuje i kojim se provodi cirkulacija naziva se početni tlak cirkulacije (p_{TCP}). Početni tlak cirkulacije dobije se zbrojem smanjenog tlaka cirkulacije i tlaka očitanog na bušaćim šipkama.

$$P_{TCP} = p_{TCS} + p_{TBšZ} \ [bar] \tag{2.1}$$

Tlak koji se pojavljuje prilikom gušenja bušotine, odnosno kod zamjene postojeće isplake otežanom isplakom naziva se konačni tlak cirkulacije (p_{TCK}).

3. INŽENJERSKA METODA GUŠENJA BUŠOTINE

Radi lakšeg razumijevanja samog postupka ugušivanja bušotine i lakše usporedbe rezultata najprije će biti objašnjena inženjerska metoda gušenja bušotine.

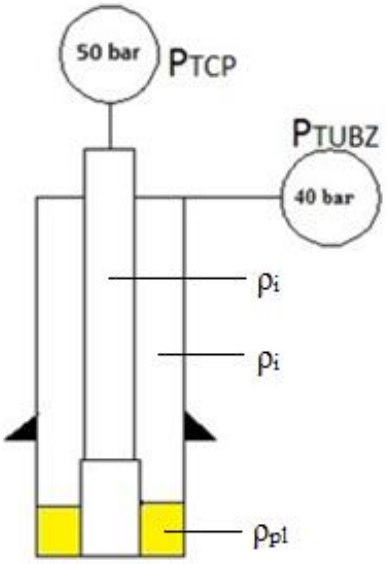
Inženjerska metoda (*engl. wait and weight method*) se odvija u jednoj cirkulaciji. U toj jednoj cirkulaciji se istiskuje dotok uz istovremeno gušenje bušotine. Karakteristično za inženjersku metodu je da određeni volumen otežane isplake kojom se guši bušotina mora biti na raspolaganju kako bi se moglo započeti sa samim procesom gušenja (Noble Drilling Services, 2012). U praksi to može značiti pripremu otežane isplake za vrijeme ispunjavanja radnog lista za ugušivanje (*engl. kill sheet*), ali i da je određeni volumen otežane isplake već ranije pripremljen (Aberdeen Drilling Schools & Well Control Training Centre, 2002). U nastavku je prikazan postupak provedbe inženjerske metode.

Trena napomenuti kako su na slikama koje slijede u tekstu (od slike 3-1 do slike 4-8, izuzevši sliku 3-6) vrijednosti tlakova na ušću i bušaćim šipkama odabrane proizvoljno kako bi se čim zornije predočio postupak provođenja svake od metoda. Vrijednosti tlakova, odnosno njihov međusobni odnos (povećanje i smanjenje tlaka u odnosu na prethodnu i sljedeću sliku, odnosno stanje u bušotini) predstavljaju stvarni odnos tlakova u bušotini i kao takvi služe svrsi lakšeg predočenja stanja u bušotini. Proračun stvarnog stanja u bušotini za istodobnu metodu sa stvarnim vrijednostima tlakova bit će obrađen i pojašnjen u nastavku ovoga rada. Prikaz na slici 3-6 se odnosi na primjer koji se po numeričkim vrijednostima tlakova razlikuje od vrijednosti tlakova na slikama 3-1 do 3-5 i kao takav se ne može uspoređivati s navedenim slikama.

<u>Postupak:</u>

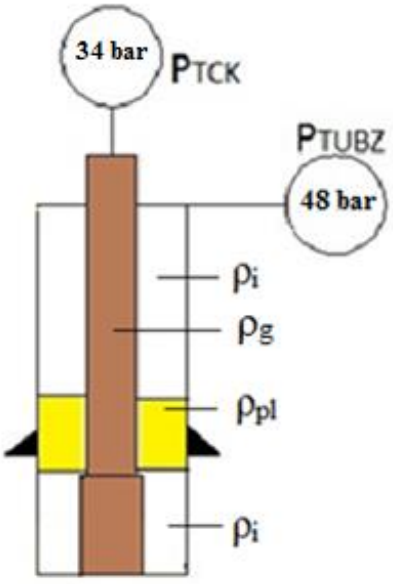
1. Nakon što se utvrdi dotok slojnog fluida potrebno je zatvoriti bušotinu i očitati vrijednosti.
   tlakova na bušaćim šipkama i ušću bušotine te ustanoviti volumen dotoka,
2. Nakon prikupljanja svih podataka potrebnih za proračun pristupa se ispunjavanju radnog lista za ugušivanje i izradi otežane isplake potrebne za ugušivanje bušotine.
3. Nakon što je radni list za ugušivanje ispunjen i kada je otežana isplaka pripremljena, pristupa se gušenju bušotine. Pumpa se polagano dovodi na smanjeni broj hodova, odnosno na početni tlak cirkulacije (slika 3-1) uz istovremeno održavanje tlaka na

dno bušotine konstantnim, jednako kao i tlak na dno bušotine (Maersk Training Centre A/S).



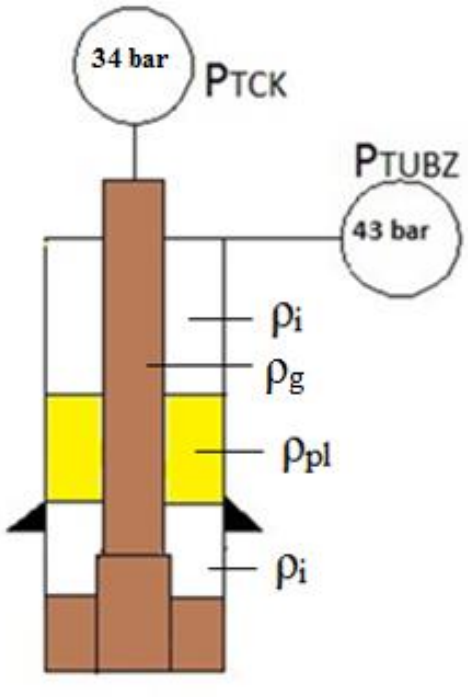
Slika 3-1. Stanje u bušotini prije početka gušenja bušotine

4. Prilikom punjenja bušaćeg alata otežanom isplakom tlak na bušaćim šipkama će padati s vrijednosti početnog tlaka cirkulacije (p_{TCP} – u ovom slučaju 50 bar) na vrijednost konačnog tlaka cirkulacije (p_{TCK} – 35 bar). Konačni tlak cirkulacije se očitava kada otežana isplaka dosegne dlijeto.



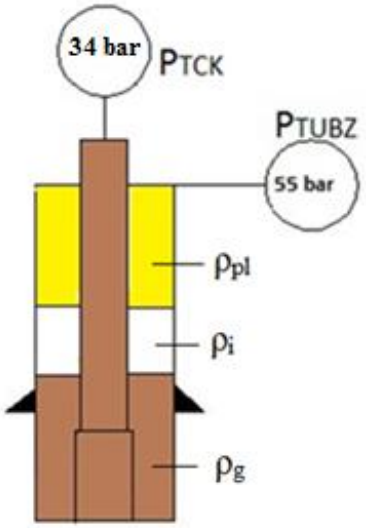
Slika 3-2. Otežana isplaka dosegnula dlijeto

5. Kada otežana isplaka dođe u područje prstenastog prostora tada se tlak na ušću bušotine počne smanjivati zbog pozitivnog utjecaja veće gustoće otežane isplake (slika 3-3). Za ovo područje se može reći da pozitivan utjecaj veće gustoće isplake za ugušivanje bušotine nadmašuje negativan utjecaj ekspanzije plina.



Slika 3-3. Otežana isplaka u području prstenastog prostora

6. Kako dalje otežana isplaka ispunjava prstenasti prostor stvara se obrnuta slika; negativan utjecaj ekspanzije plina uslijed kretanja prema površini nadmašuje pozitivan utjecaj otežane isplake i tlak na ušću bušotine počinje rasti i najveći je u zoni ušća bušotine jer je u tom dijelu prstenastog prostora plin maksimalno ekspandirao (slika 3-4).

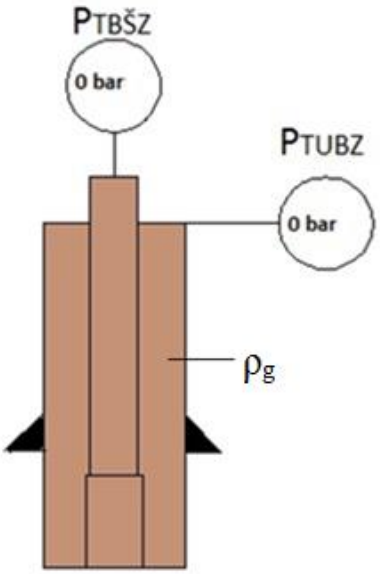


Slika 3-4. Plin u području ušća, najveći tlak očitan na ušću bušotine

Tijekom izlaska plina iz kanala bušotine, tlak na ušću bušotine se smanjuje sve dok kompletan dotok plina nije istisnut iz kanala bušotine i najmanji je (jednak nuli) kada se otežana isplaka pojavljuje na površini.

Cijelo vrijeme dok otežana isplaka napreduje kroz prstenasti prostor i istiskuje postojeću, lakšu isplaku, treba paziti na tlak na bušaćim šipkama. Tlak na bušaćim šipkama potrebno je održavati konstantnim na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije (p_{TCK} = 34 bar) kako bi se spriječio novi dotok slojnog fluida u kanal bušotine.

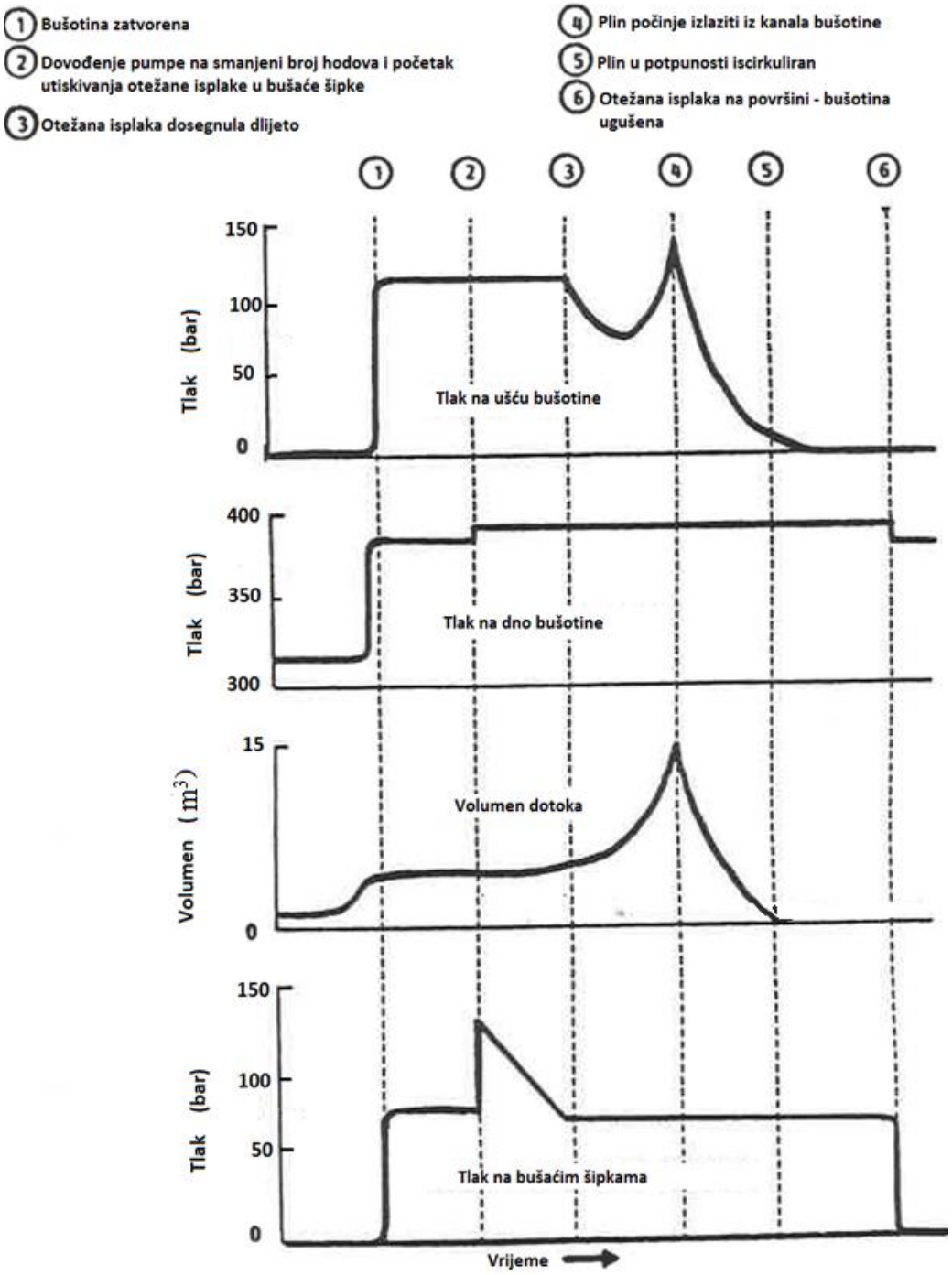
7. Nakon što se otežana isplaka pojavila na površini treba zaustaviti pumpu i zatvoriti bušotinu. Nakon 5 do 15 min čekanja (CROSCO d.o.o., 2014) očitavaju se tlakovi na bušaćim šipkama i na ušću bušotine te postoje 3 mogućnosti:
   - $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} = 0$ → bušotina je u potpunosti ugušena i spremna za daljnje radove (Slika 3-5),



Slika 3-5. Bušotina je ugušena

- $P_{TBŠZ} \neq p_{TUBZ}$ → dotok još uvijek nije u potpunosti istisnut i određena količina slojnog fluida (u ovom slučaju plina) još uvijek se nalazi u kanalu bušotine. Uzrok tomu može biti ili da cirkulacija nije u potpunosti gotova ili je tijekom zamjene isplake došlo do novog ulaska slojnog fluida u kanal bušotine. U ovom slučaju treba nastaviti s cirkulacijom dok se u potpunosti ne istisne slojni fluid iz kanala bušotine.
- $P_{TBŠZ} = p_{TUBZ} > 0$ → otežana isplaka nije dovoljne gustoće kako bi se ugušila bušotina te je potrebno dodatno otežati isplaku i ponoviti cijeli proces.

Prikaz razvoja tlakova prilikom provedbe inženjerske metode prikazan je na slici 3-6. Kao što je ranije navedeno, slika 3-6 nije usko vezana za slike 3-1 do 3-5 i vrijednosti tlakova na ušću i bušaćim šipkama ne mogu se uspoređivati s vrijednostima tlakova na navedenim slikama.



Slika 3-6. Prikaz razvoja tlakova kod gušenja bušotine inženjerskom metodom (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001)

Na drugoj krivulji na slici 3-6. koja prikazuje ponašanje tlaka na dno bušotine može se primijetiti da u točki 6 tlak na dno naglo padne za određenu vrijednost. To smanjenje vrijednosti tlaka na dno je posljedica prestanka cirkulacije. Prestankom cirkulacije nestaju otpori protjecanju koji se javljaju u prstenastom prostoru i djeluju prema dolje, odnosno prema dnu bušotine što rezultira smanjenjem vrijednosti tlaka na dno.

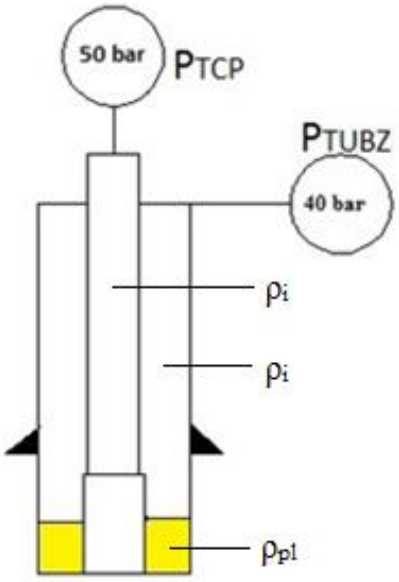
4. ISTODOBNA METODA GUŠENJA BUŠOTINE

Istodobna metoda gušenja bušotine (*engl. concurrent method*) je jedna od najrjeđe korištenih metoda za gušenje bušotine. Razlog tomu u najvećoj mjeri je kompliciraniji proračun i kompliciranija izvedba samog gušenja bušotine. Za istodobnu metodu gušenja bušotine se može reći da se prema karakteristikama provedbe nalazi negdje između bušaće i inženjerske metode. Ono što je zajedničko istodobnoj i bušaćoj metodi je to što se gušenju bušotine pristupa praktički odmah kada je registriran dotok. S druge strane, zajedničko istodobnoj i inženjerskoj metodi je da se dotok ne istiskuje s postojećom isplakom, nego se postepeno otežava isplaka prilikom samog istiskivanja dotoka. Istodobna metoda, isto kao i inženjerska, provodi se u "jednoj" cirkulaciji. Pritom se misli da ne postoje dvije odvojene cirkulacije svaka sa svojom svrhom, već da jedna cirkulacija ima svrhu i za istiskivanje dotoka i za gušenje bušotine. To ne znači da je gušenje bušotine gotovo kada prvi obrok otežane stigne na ušće bušotine. Gušenje je gotovo u onom trenutku kada se zadnji obrok otežane isplake, onaj koji je potreban za gušenje bušotine (ima najveću gustoću), pojavi na površini. Tada je cijela bušotina ispunjena otežanom isplakom potrebne gustoće za ugušivanje i bušotina je ugušena. To znači da je za istodobnu metodu, u odnosu na inženjersku metodu, potreban veći broj hodova pumpe za uspješno gušenje bušotine. Vrijeme potrebno za provođenje istodobne metode, odnosno broj hodova potreban za gušenje bušotine ovisi i o sposobnostima kopnenog ili odobalnog postrojenja, odnosno o opremi i njenim mogućnostima. Tu se prvenstveno misli na zapremninu bazena u kojima se priprema otežana isplaka. Što je njihova zapremnina veća, to se veća količina otežane isplake može pripremiti u njima, što smanjuje broj promjena u cijelom sustavu. Pod promjenama u sustavu se smatra promjena gustoće isplake koja se upumpava u bušotinu. Ovisno o kapacitetima opreme, taj broj može biti vrlo mali (npr. 2 promjene gustoće prilikom gušenja bušotine), ali i dosta veći od navedenog (Goins i Sheffield, 1983; Grace, 2003).

U nastavku će biti prikazan postupak provedbe istodobne metode:

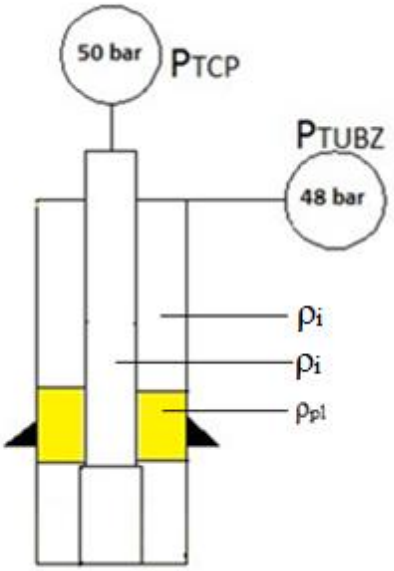
Postupak

1. Zatvoriti bušotinu.
2. Očitati vrijednosti tlakova na bušaćim šipkama i ušću bušotine (slika 4-1), volumen dotoka i izračunati potrebnu gustoću otežane isplake za gušenje bušotine.



Slika 4-1. Prikaz stanja u bušotini kada je bušotina zatvorena

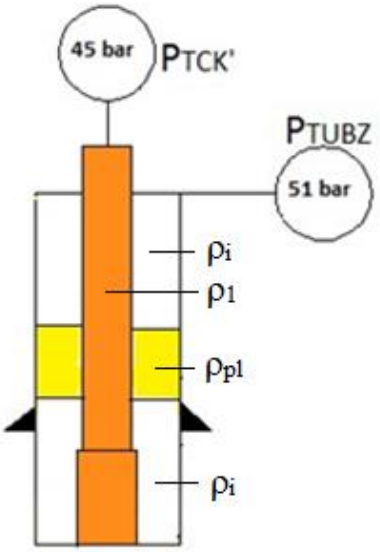
3. Smanjiti broj hodova pumpe uz održavanje tlaka na ušću bušotine konstantnim. Nakon toga provjeriti vrijednost tlaka na bušaćim šipkama. Vrijednost tlaka na šipkama treba biti jednaka zbroju smanjenog tlaka cirkulacije (u ovom slučaju 30 bar) i očitanog tlaka na šipkama (20 bar) prije pokretanja cirkulacije.
4. Prvi dio gušenja bušotine istodobnom metodom podrazumijeva istiskivanje doteklog slojnog fluida postojećom isplakom za gušenje (ρ_i) sve dok se ne pripremi isplaka povećane gustoće (ρ_1) (slika 4-2) (Maersk Drilling Services A/S). U ovom primjeru provođenja gušenja bušotine istodobnom metodom bit će dva povećanja gustoće isplake prije nego se dosegne konačna gustoća otežane isplake (ρ_g).



Slika 4-2. Početni dio istodobne metode u kojem se cirkulira postojećom isplakom (ρ_i)

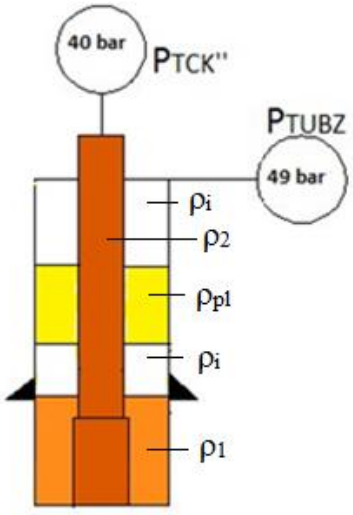
5. Nakon što je određeni volumen slojnog fluida istisnut iz prstenastog prostora s postojećom isplakom, slijedi cirkulacija s otežanom isplakom (ρ_1) nešto veće gustoće od postojeće (ρ_i), no još uvijek nedovoljnom za gušenje bušotine (slika 4-3.).

   Na slici možemo vidjeti kako se utiskivanjem isplake povećane gustoće (ρ_1) smanjuje tlak na šipkama (P_{TCK}' predstavlja tlak cirkulacije koji se smanjio sa početnog tlaka cirkulacije (P_{TCP} = 50 bar) na navedeni tlak (P_{TCK}' = 45 bar) koji još uvijek nije na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije (P_{TCK})). Tlak na ušću bušotine raste zbog ekspanzije plina u prstenastom prostoru (s 48 bar na 51 bar).



Slika 4-3. Isplaka povećane gustoće (ρ_1) dosegnula dlijeto

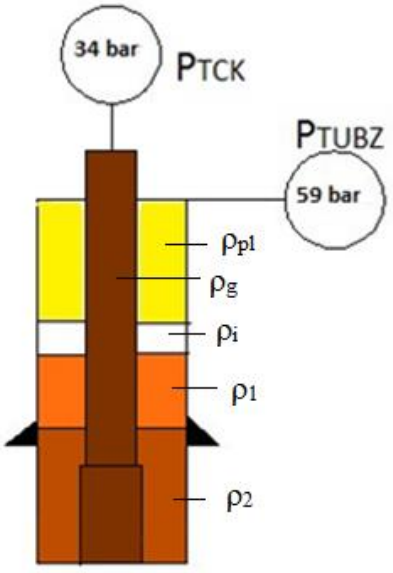
6. Tijekom cirkulacije djelomično otežanom isplakom pripremljena je isplaka još veće gustoće (ρ_2) koja se sad utiskuje u bušaći alat (Slika 4-4.). Ta je isplaka, odnosno njena gustoća, posljednji korak prije utiskivanja otežane isplake gustoće potrebne za gušenje bušotine (ρ_g);



Slika 4-4. Isplaka povećane gustoće (ρ_1) ušla u prstenasti prostor dok se isplaka još veće gustoće (ρ_2) utiskuje u bušaći alat i dosegnula je dlijeto

Na prethodnoj slici se vidi kako je negativan utjecaj ekspanzije plina nadmašen od strane pozitivnog utjecaja otežane isplake i da se vrijednost tlaka na ušću bušotine smanjila na vrijednost 49 bar. Tlak na bušaćim šipkama se također smanjuje do vrijednosti p_{TCK}" (40 bar), no to još uvijek nije konačna vrijednost konačnog tlaka cirkulacije p_{TCK} (34 bar) koji će biti registriran kada se otežana isplake konačne gustoće (ρ_g) utisne u bušaći alat. Valja napomenuti da se svaki put kada isplaka povećane gustoće uđe u prstenasti prostor to treba javiti operateru na sapnici koji onda radi korekciju, odnosno podešava sapnicu na nove uvjete kako bi se tlak na dno bušotine održao konstantnim. U jednom od primjera iz literature koji nije obrazložen u radu ta korekcija iznosi 0,023 bar za povećanje gustoće isplake od 10 kg/m^3 (Well Control School, 2002). Ako se otvor na sapnici ne bi korigirao (u ovom slučaju povećao) tlak na dno ne bi bio konstantan već bi postajao sve veći i moglo bi doći do frakturiranja stijena i gubitka isplake.

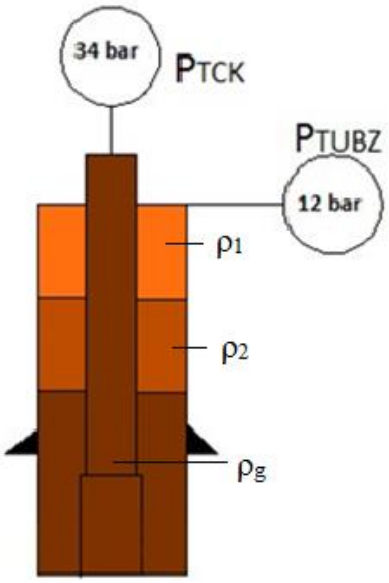
7. Sljedeći korak kod istodobne metode gušenja bušotine je utiskivanje isplake još veće gustoće, u ovom slučaju, isplake konačne gustoće potrebne za ugušivanje bušotine (slika 4-5).



Slika 4-5. Prikaz stanja u bušotini kada su tri isplake različitih gustoća prisutne u kanalu bušotine i tlak na ušću bušotine na maksimalnoj vrijednosti

Na prethodnoj slici može se vidjeti kako je tlak na bušaćim šipkama pao na vrijednost konačnog tlaka cirkulacije (p_{TCK}) kad je isplaka konačne gustoće (ρ_g) dosegnula dlijeto. Tlak na ušću bušotine je u ovom trenutku na maksimalnoj vrijednosti zbog maksimalne ekspanzije plina koja je nadmašila pozitivan utjecaj hidrostatičkog tlaka kojeg ostvaruje stupac isplake povećane gustoće.

8. Od ovog trenutka nadalje tlak u prstenastom prostoru će se smanjivati, prvo zbog istiskivanja dotoka (plina) iz kanala bušotine, a zatim i zbog progresivnog povećanja hidrodinamičkog tlaka u prstenastom prostoru koji je posljedica veće gustoće isplake. Tlak na bušaćim šipkama održava se konstantnim na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije (p_{TCK}).

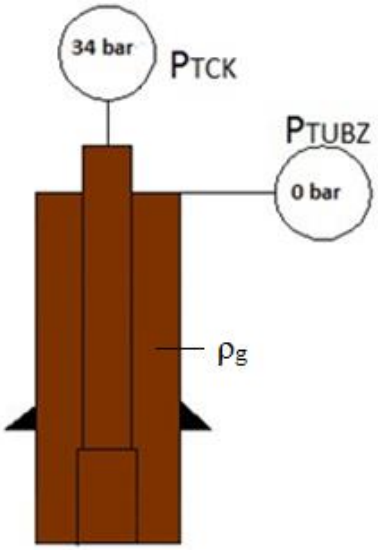


Slika 4-6. Dotok u potpunosti istisnut iz kanala bušotine koji je sada ispunjen trima isplakama različitih gustoća

Na slici 4-6 je uočljivo kako se, nakon što je dotok istisnut iz kanala bušotine, a obrok prvotno otežane isplake dosegnuo ušće bušotine, tlak na ušću bušotine drastično smanjio na vrijednost 12 bar. Vrijednost tlaka na ušću još uvijek nije jednaka nuli iz razloga što isplaka konačne gustoće za gušenje (ρ_g) još uvijek nije u potpunosti ispunila prstenasti prostor što znači da je slojni tlak (P_{sl}) još uvijek veći od tlaka koji djeluje na

dno bušotine. Daljnjom cirkulacijom tlak na ušću bušotine sve će više padati kako isplaka najveće gustoće od tri prisutne (ρ_g) sve više ispunjava prstenasti prostor.

Kada otežana isplaka za gušenje bušotine (ρ_g) u potpunosti ispuni kanal bušotine tlak na ušću bušotine (p_{TUBZ}) trebao bi pasti na nulu ukoliko je sve odrađeno i izračunato na optimalan način (Slika 4-7). Tlak na bušaćim šipkama iznosi 34 bar što je vrijednost konačnog tlaka cirkulacije (P_{TCK}).

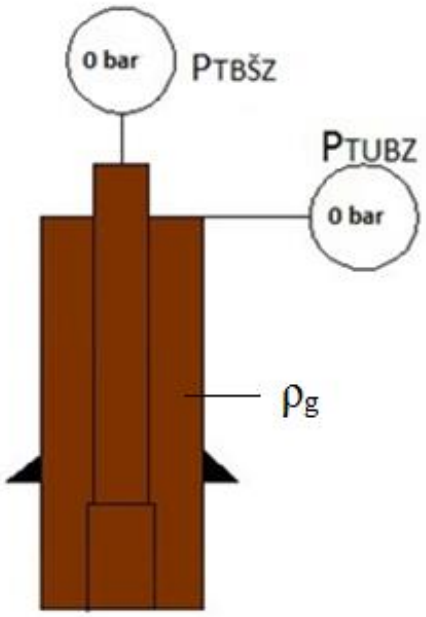


Slika 4-7. Kanal bušotine u potpunosti ispunjen otežanom isplakom (ρ_g) i bušotina je ugušena

9. Nakon što se otežana isplaka konačne gustoće (ρ_g) pojavila na površini treba zaustaviti pumpu, zatvoriti bušotinu i očitati vrijednosti tlakova na ušću bušotine (p_{TUBZ}) i tlaka na bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$).

   Postoje tri mogućnosti očitanja tlakova:

   - $P_{TUBZ} = P_{TBŠZ} = 0$, bušotina je ugušena i može se pristupiti daljnjim radovima prema projektu. To je ono čemu se teži i što je cilj dobiti kao rezultat provođenja postupka gušenja bušotine (slika 4-8);



Slika 4-8. Tlak na bušaćim šipkama i tlak na ušću bušotine su jednaki nuli i bušotina je ugušena

- $P_{TUBZ} \neq P_{TBŠZ}$, dotok nije u potpunosti istisnut i treba nastaviti s daljnjom cirkulacijom ili je u tijeku gušenja došlo do novog dotoka slojnog fluida u kanal bušotine;
- $P_{TUBZ} = P_{TBŠZ} > 0$, isplaka za gušenje nije dovoljne gustoće, treba povećati gustoću isplake i ponoviti postupak.

5. RAZVOJ TLAKA KOD PROVOĐENJA ISTODOBNE METODE I USPOREDBA S REZULTATIMA PRILIKOM PROVOĐENJA INŽENJERSKE METODE

Za proračun tlakova prilikom izvođenja istodobne metode koristit će se isti ulazni podaci kao i za proračun tlakova kod izvođenja inženjerske metode u svrhu lakše usporedbe tlakova koji se pojavljuju prilikom provođenja svake od pojedinih metoda.

Usporedba će se raditi između tlakova na ušću bušotine i tlakova na bušaćim šipkama prilikom izvođenja svake od metoda.

5.1. Uvodni podaci za proračun razvoja tlakova

Podaci o ispitivanju sloja:

- površinski tlak primanja (*engl. Leak Off Test*, LOT): 90 bar,

- gustoća isplake tijekom testa primanja sloja: 1300 kg/m^3.

Podaci o dotoku:

- povećanje volumena u bazenima: 3 m^3,

- tlak na bušaćim šipkama ($P_{TBŠZ}$): 30 bar,

- tlak na ušću bušotine (P_{TUBZ}): 37 bar.

Podaci o bušotini (slika 5-1):

- gustoća isplake za bušenje (ρ_i): 1500 kg/m^3,

- zaštitne cijevi: D_{zc} = 0,3397 m (13 $^3/_8$ in), 795 N/m (54,50 lb/ft), d_{zc} = 0,3204 m,

- mjerena dubina pete kolone: 1550 m,

- vertikalna dubina pete kolone: 1550 m,

- promjer bušotine: 0,311 m (12 $^1/_4$ in),

- mjerena dubina bušotine: 3800 m,

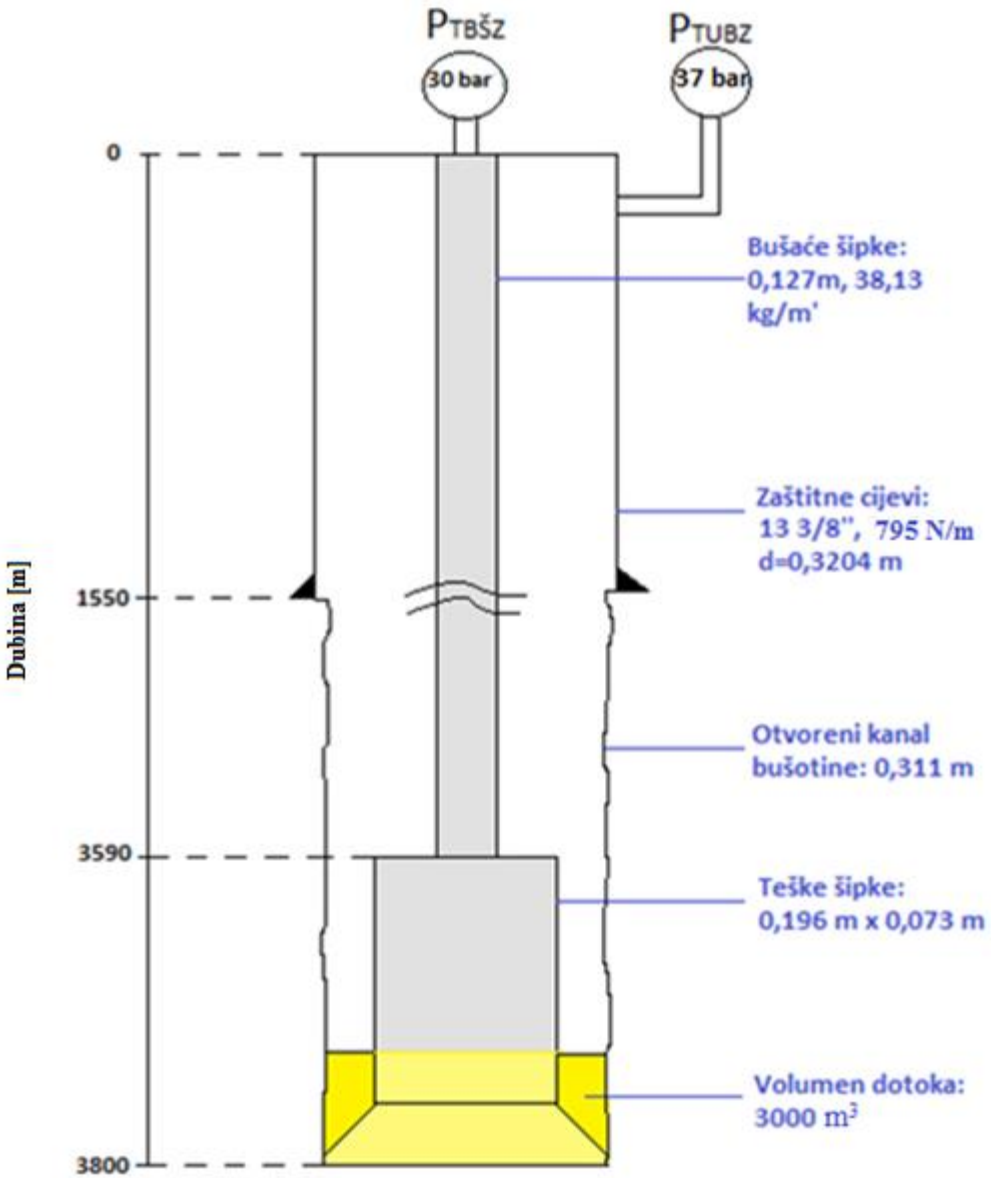
- vertikalna dubina bušotine (*engl. True Vertical Depth* - TVD): 3800m,

- bušaće šipke: 0,127 m (5 in), 38,13 kg/m (25,60 lb/ft),

- teške šipke: 0,196 m ($7\,^{3}/_{4}$ in) x 0,073 m ($2\,^{7}/_{8}$ in),

- duljina teških šipki: 210 m.

- tlak na dno bušotine: P_i = (1500 x 9,80665 x 3800) x 10^{-5} = 558,98 bar



Slika 5-1. Prikaz bušotine za koju je izrađen proračun razvoja tlakova kod izvođenja istodobne metode gušenja bušotine

Podaci za ugušivanje:

Smanjeni broj hodova pumpe: 30 hod/min, 16 L/hod

Smanjeni tlak cirkulacije (P_{TCS}): 44 bar

- Slojni tlak: $P_{sl} = P_i + P_{TBŠZ} = 558{,}98 + 30 =$ 588,98 bar

- Gustoća isplake za ugušivanje (ρ_{KMW}): 1580 kg/m^3,

$$\rho_g = \frac{P_{TBŠZ}}{TVD\ x\ g} + \rho_i = \frac{30\ x\ 10^5}{3800\ x\ 9{,}80665} + 1500 = 1580 \text{ kg/m}^3$$

Kada isplaka gustoće 1580 kg/m^3 u potpunosti ispuni kanal bušotine u bušotini će biti prisutno ravnotežno stanje ($P_H = P_{Sl}$), odnosno isplaka za gušenje neće ostvarivati nadtlak u odnosu na slojni tlak.

- Početni tlak cirkulacije (P_{TCP}): 74 bar,

$$P_{TCP} = P_{TCS} + P_{TBŠZ} = 44 + 30 = 74 \text{ bar}$$

- Konačni tlak cirkulacije (P_{TCK}): 46,35 bar,

$$P_{TCK} = P_{TCS}\ \text{x}\ \frac{\rho_g}{\rho_i} = 44\ \text{x}\ \frac{1580}{1500} = 46{,}35 \text{ bar}$$

Za proračun razvoja tlakova prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine korišten je tablični kalkulator (Microsoft Excel 2010). Tlak na bušaćim šipkama i na ušću bušotine prikazan je u ovisnosti o broju hodova pumpe. Pomoću broja hodova pumpe lako se prikaže vrijeme koje je proteklo od početka do kraja procesa gušenja bušotine i položaj dotoka i isplake u kanalu bušotine.

Radi lakšeg i jednostavnijeg proračuna i lakše usporedbe dobivenih rezultata postoje određene pretpostavke za idealni model:

- bušotina je u statičkim uvjetima, nema cirkulacije u kanalu bušotine (u svakoj točki kanala bušotine u onom trenutku kada se računaju tlakovi vladaju statički uvjeti),
- dlijeto se nalazi na dnu bušotine,
- tlak na dno bušotine je konstantan tijekom cijelog procesa gušenja bušotine,
- temperatura je konstantna duž cijelog kanala bušotine,
- nema migracije plina prema površini, odnosno, migracija je uzrokovana jedino radom pumpi,
- ekspanzija plina uzrokovana je jedino smanjenjem tlaka,
- kanal bušotine je pravilnog, kružnog poprečnog presjeka,
- hidrostatički tlak na dubini na kojoj se nalazi sredina stupca dotoka plina računat je po idealnom modelu u kojem je sredina stupca plina predstavljena kao točka na određenoj dubini,
- kod proračuna jediničnog volumena prstenastog prostora oko bušaćih šipki zanemaren utjecaj spojnica.

U praksi, naravno, ne postoji idealni model bušotine u kojemu su prisutni navedeni parametri. Stvarna bušotina opisana je realnim modelom kod kojeg je proračun višestruko kompliciraniji i kao takav neće biti proveden u ovom diplomskom radu.

Kao što je ranije navedeno, specifičnost istodobne metode je progresivno povećavanje gustoće isplake do njene konačne vrijednosti (gustoća isplake za gušenje, u ovom slučaju 1580 kg/m^3). U ovom primjeru gušenja bušotine istodobnom metodom bit će jedno povećanje gustoće isplake prije povećanja na konačnu vrijednost isplake za gušenje bušotine. Ta gustoća isplake između početne i konačne gustoće iznosit će 1540 kg/m^3 i oznaka za tu gustoću je ρ_1.

5.2. Tlak na bušaćim šipkama

Postupak računanja tlaka na bušaćim šipkama:

Za n = 1400 hodova (broj hodova pumpe nakon što se počela utiskivati otežana isplaka (ρ_1)), ukupan broj hodova iznosi 3268 (1868 + 1400 = 3268 → 1868 je broj hodova potreban da isplaka dosegne dlijeto, u ovom slučaju postojeća isplaka gustoće ρ_i koja se prva utiskuje u bušotinu)(točka T na slici 5-2):

$$P_{TB\check{S}} = P_{TCS} + (P_{sl} - P_H) \quad (5.1)$$

$$P_{TB\check{S}} = 44 + (P_{sl} – ((\rho_i \times g \times (TVD - (1{,}975 \times n)) + \rho_1 \times g \times (1{,}975 \times n))) \times 10^{-5}$$

$$P_{TB\check{S}} = 44 + (588{,}98 \times 10^5 – ((1500 \times 9{,}80665 \times (3800 – 1{,}975 \times 1400)) + 1540 \times 9{,}80665 \times (1{,}975 \times 1400))) \times 10^{-5}$$

$P_{TB\check{S}}$ = 63,16 bar

Gdje su:

P_{sl} – slojni tlak (bar)

P_H – hidrostatski tlak unutar bušaćeg alata (bar)

ρ_i - isplaka za bušenje (kg/m^3)

TVD – stvarna dubina kanala bušotine (m)

n – broj hodova pumpe

Pojašnjenje korištenih vrijednosti:

- vrijednost 1,975 je konstanta koja pokazuje koliko metara unutar bušaćeg alata se napuni isplakom prilikom jednog hoda pumpe; razlikuje se za područje unutar bušaćih šipki i područje unutar teških šipki zbog različitih unutarnjih promjera alatki.

Za prikaz u jednadžbi 5.2 za vrijednost 1,975 korištena je oznaka "K".

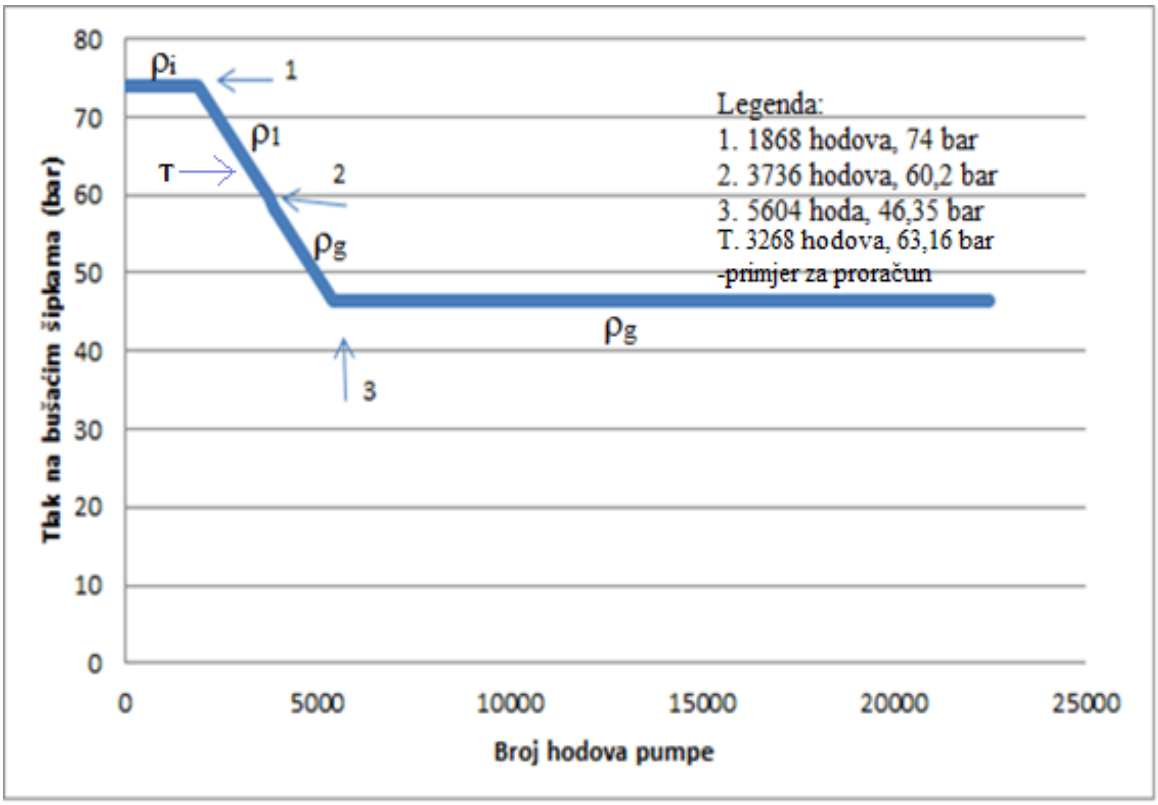
$$K = \frac{V'_n}{V'_{bšu}} = \frac{0{,}016}{\frac{0{,}1016^2 \, x \, \pi}{4}} = 1{,}975 \text{ m/hod} \qquad (5.2)$$

-V'_n – volumen jednog hoda pumpe [m^3]

- $V'_{bšu}$ – jedinični unutarnji volumen bušaćih šipki [m^3]

Istodobna metoda

Na slici 5-2. prikazana je ovisnost tlaka na bušaćim šipkama o broju hodova pumpe prilikom provođenja istodobne metode.



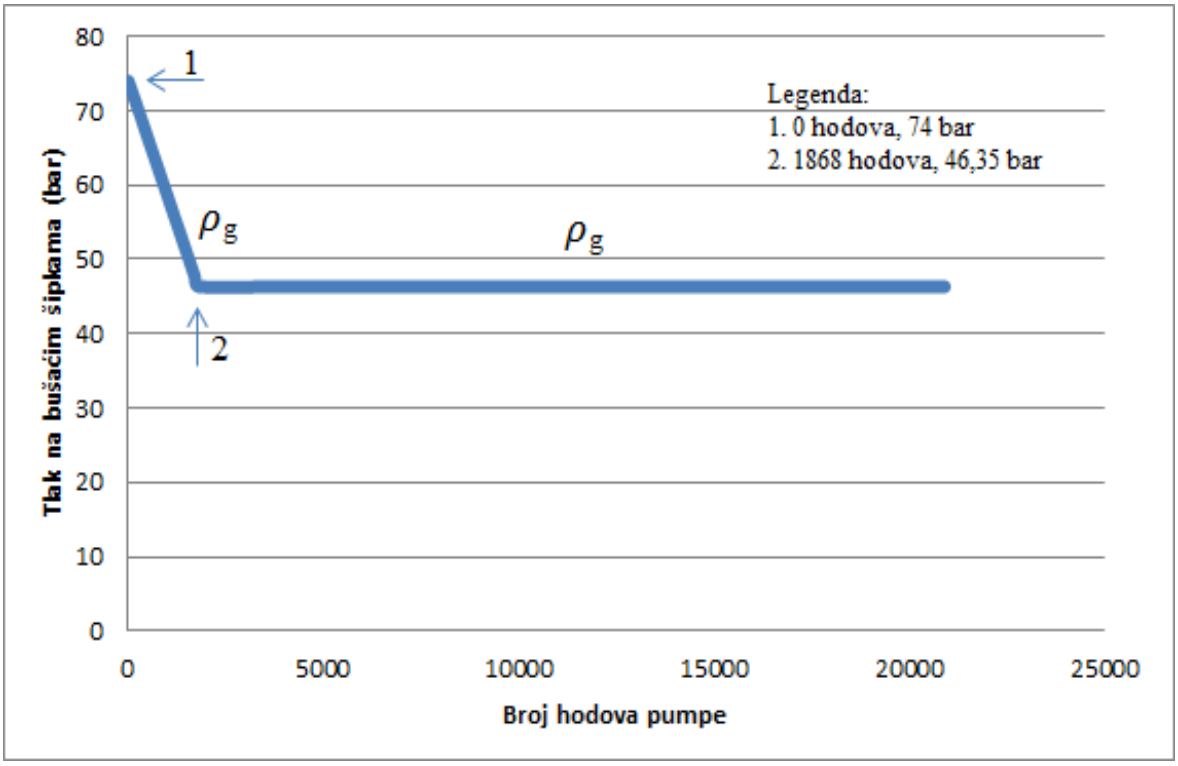
Slika 5-2. Prikaz razvoja tlaka na bušaćim šipkama prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine

Na dijelu pravca do točke 1 tlak na šipkama odgovara početnom tlaku cirkulacije (P_{TCP}). Razlog tomu je taj što se u tom razdoblju (od 0 do 1868 hodova, broj hodova potreban da isplaka dosegne dlijeto) cirkulira s isplakom početne gustoće (ρ_i) koja se već nalazila u bušotini što

znači da ne dolazi do pada tlaka na bušaćim šipkama. U tom razdoblju protiskivanja isplake početne gustoće u bazenima je pripremljena isplaka povećane gustoće (ρ_1). Nakon 1868 hodova počinje se s cirkuliranjem otežane isplake (točka 1). Na slici je vidljivo da se tlak na bušaćim šipkama počinje smanjivati onoga trenutka kada počinje cirkulacija otežane isplake. Razlog tomu je što stupac isplake veće gustoće daje sve veći hidrostatički tlak u bušaćem alatu zbog veće gustoće isplake i samim time se smanjuje razlika između slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka u bušaćem alatu što tlak na bušaćim šipkama ($P_{TBŠZ}$) zapravo i prikazuje. Nakon što je isplaka povećane gustoće dosegnula dlijeto (ponovno nakon 1868 hodova) tlak cirkulacije je pao sa početnog tlaka cirkulacije na tlak cirkulacije čija je vrijednost na polovici između početnog i konačnog tlaka cirkulacije (ranije označen kao P_{TCK}') i iznosi 60,2 bar. Razlog tomu je što je gustoća isplake povećana na vrijednost 1540 kg/m^3, odnosno za polovicu razlike vrijednosti između isplake početne gustoće (1500 kg/m^3) i isplake konačne gustoće za gušenje bušotine (1580 kg/m^3). Nakon 3736 hodova (odgovara broju hodova potrebnom da isplaka povećane gustoće dosegne dlijeto uvećanom za 1868 hodova koji su bili potrebni da isplaka početne gustoće dosegne dlijeto) počinje cirkulacija isplake konačne gustoće za ugušivanje bušotine (ρ_{KMW}) (točka 2). Tlak na bušaćim šipkama se i dalje smanjuje kako otežana isplaka napreduje kroz bušaći alat sve do trenutka kada otežana isplaka dosegne dlijeto (točka 3). U tom trenutku tlak na bušaćim šipkama smanjio se na vrijednost 46,35 bara koja odgovara konačnom tlaku cirkulacije (P_{TCK}). Nakon toga nastavlja se cirkulacija isplake konačne gustoće i samim time se tlak na šipkama ne mijenja i konstantan je na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije sve dok se otežana isplaka za gušenje ne pojavi na površini i kada je bušotina, ukoliko je sve prošlo kako treba, ugušena.

Inženjerska metoda

Na slici 5-3 prikazana je ovisnost tlaka na bušaćim šipkama u ovisnosti o broju hodova pumpe prilikom provođenja inženjerske metode.



Slika 5-3. Razvoj tlaka na bušaćim šipkama prilikom provođenja inženjerske metode gušenja bušotine

Što se tiče tlaka na bušaćim šipkama, osnovna razlika između istodobne i inženjerske metode gušenja bušotine je u tome da kod inženjerske metode tlak dosta prije padne s početnog tlaka cirkulacije na konačni tlak cirkulacije. Uzrok tomu je to što se kod inženjerske metode, na početku procesa gušenja bušotine, odmah kreće s utiskivanjem isplake konačne gustoće za gušenje bušotine (točka 1), dok se kod istodobne radi i određeni broj međukoraka s isplakama manjih gustoća od one za gušenje bušotine. U ovom slučaju, taj pad tlaka se događa u dvostruko kraćem vremenskom periodu. Razlog što se u ovom primjeru pad tlaka dogodio u dvostruko kraćem vremenu je taj što se za istodobnu metodu radio samo jedan međukorak između utiskivanja isplake za bušenje (ρ_i = 1500 kg/m^3) i utiskivanja konačne isplake za gušenje (ρ_g = 1580 kg/m^3), s isplakom gustoće 1540 kg/m^3 (ρ_1) i to u pravilnim intervalima. Nakon što je isplaka konačne gustoće za gušenje bušotine (ρ_g = 1580 kg/m^3) dosegnula dlijeto (točka 2), tlak dalje kroz postupak ostaje konstantan na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije, jednako kao i kod istodobne metode.

5.3. Tlak na ušću bušotine

Postupak računanja tlaka na ušću bušotine:

Za n = 12 800 hodova (ukupan broj hodova od početka procesa gušenja bušotine), dotok je istisnut u područje oko bušaćih šipki unutar zaštitnih cijevi.

$V'_{PPTŠOK}$ = 45,77 dm^3/m' → jedinični volumen oko teških šipki u području otvorenog kanala bušotine

$V'_{PPBŠOK}$ = 63,26 dm^3/m' → jedinični volumen oko bušaćih šipki u području otvorenog kanala bušotine

$V'_{PPBŠZC}$ = 67,93 dm^3/m' → jedinični volumen oko bušaćih šipku u području unutar zaštitnih cijevi

Dubina sredine dotoka:

$$TVD_d = TVD' - \frac{V'_p \, x \, n}{V'_{PP}} = 611{,}8 - \frac{16 \, x \, 255}{67{,}93} = 551{,}74 \text{ m} \qquad (5.3)$$

Gdje su:

TVD_d – dubina sredine dotoka [m]

V'_p – volumen jednog hoda pumpe [dm^3]

n – broj hodova pumpe od zadnje promjene u sustavu, pojašnjeno u nastavku rada

V'_{pp} – jedinični volumen prstenastog prostora [dm^3/m']

TVD' – dubina sredine dotoka kod posljednje promjene u sustavu [m]

Pojašnjenje korištenih vrijednosti:

- vrijednost 611,8 m predstavlja dubinu sredine visine stupca dotoka fluida kod posljednje promjene u sustavu (TVD') (prijelaz iz jednog jediničnog volumena prstenastog prostora u drugi, ne samo za dotok, nego i za sve tri isplake koje su u sustavu). Ova vrijednost se koristi

kako bi se pojednostavio proračun i eliminirale pogreške zbog navedenih promjena u sustavu. Vrijednosti dobivene za pojedini segment kasnije se zbrajaju.

- vrijednost 255 hodova također predstavlja broj hodova od zadnje promjene u sustavu (u tom trenutku kumulativni broj hodova iznosi navedenih 12 800 hodova)

Visina stupca doteklog fluida:

Za pravilan izračun visine stupca dotoka fluida u prstenastom prostoru ponašanje plina (ekspanzija plina) opisuje se Boyle – Mariotteovim zakonom:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \tag{5.4}$$

$$H_d = \frac{\frac{P_i}{P_{hd}} x\, V_i}{V'_{pp}} = \frac{\frac{558{,}98\ x\ 10^5}{81{,}16\ x\ 10^5} x\ 3000}{67{,}93} = \underline{304{,}17\ \text{m}} \tag{5.5}$$

H_d – visina stupca doteklog fluida [m]

P_i - hidrostatički tlak na dnu bušotine [Pa]

P_{hd} – hidrostatički tlak na dubini sredine dotoka [Pa]

V_i – volumen doteklog fluida [dm^3]

Pojašnjenje korištenih vrijednosti:

- vrijednosti 558,98 x 10^5 i 81,16 x 10^5 predstavljaju hidrostatički tlak na dnu bušotine i na dubini sredine stupca dotoka fluida kada je u bušotini samo isplaka za bušenje (ρ_i = 1500 kg/m^3)

- jedinični volumen prstenastog prostora se mijenja s kretanjem dotoka prema površini i nije konstantan, u ovom trenutku za koji se prikazuje proračun on iznosi 67,93 dm^3/m'

Tlak na ušću bušotine:

$$P_{TUBZ} = P_{sl} - Ph_{PP} \quad (5.6)$$

$$P_{TUB} = (P_{sl} - (TVD - H_d - H_{TŠ} - H_{BŠOK} - 0{,}23554 \times n) \times \rho_i \times g - \rho_{KMW} \times H_{TŠ} \times g - \rho_{KMW} \times g \times (1566{,}3 + 0{,}25293 \times n) - \rho_1 \times g \times (473{,}71 - 0{,}25293 \times n) - \rho_1 \times g \times 0{,}23354 \times n - 1{,}78 \times 10^5) \times 10^{-5}$$

ρ_{KMW} – gustoća isplake za gušenje bušotine [kg/m^3], korištena i oznaka ρ_g

$H_{TŠ}$ – duljina teških šipki [m]

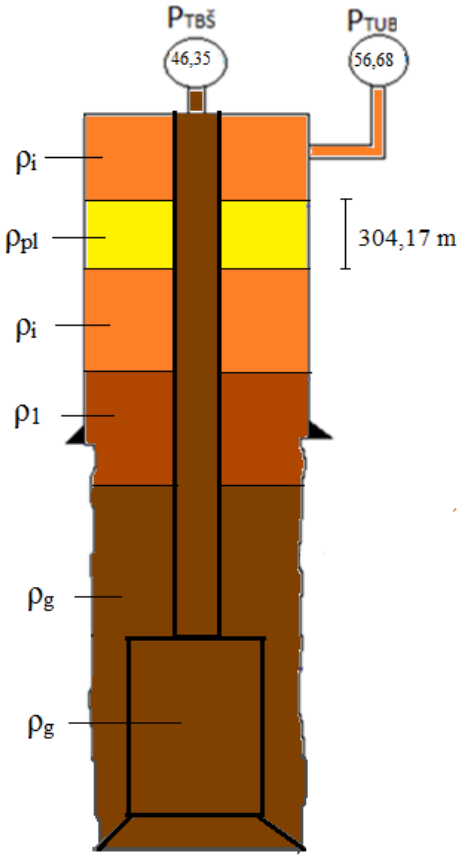
$H_{BŠOK}$ – duljina bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine [m]

ρ_1 – gustoća "međuisplake" koja se utiskuje prije isplake za gušenje [kg/m^3]

$$P_{TUB} = (588{,}98 \times 10^5 - (3800 - 304{,}17 - 210 - 2040 - 0{,}23554 \times 255) \times 1500 \times 9{,}80665 - 1580 \times 210 \times 9{,}80665 - 1580 \times 9{,}80665 \times (1566{,}3 + 0{,}25293 \times 255) - 1540 \times 9{,}80665 \times (473{,}71 - 0{,}25293 \times 255) - 1540 \times 9{,}80665 \times 0{,}23354 \times 255 - 1{,}78 \times 10^5) \times 10^{-5}$$

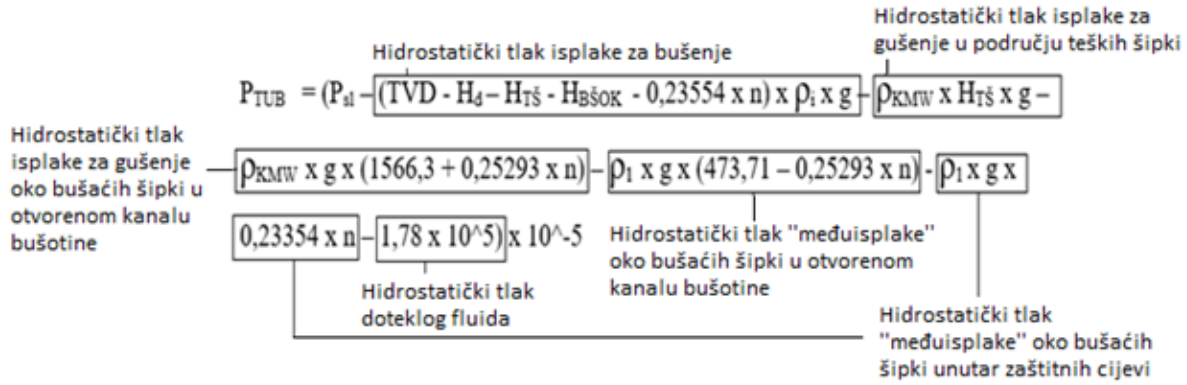
P_{TUB} = 56,68 bar

Stanje u bušotini za koje je proračun napravljen, radi lakšeg i boljeg razumijevanja navedenog proračuna, prikazano je na slici 5-4.



Slika 5-4. Prikaz stanja u bušotini za navedeni proračun u trenutku nakon 12800 hodova pumpe

Slika 5-5 prikazuje jednadžbu 5.6 s uvrštenim vrijednostima i pojašnjenjem svakog segmenta jednadžbe.



Slika 5-5. Prikaz jednadžbe za tlak na ušću bušotine

Pojašnjenje korištenih vrijednosti:

- vrijednost 0,23554 (m) predstavlja broj metara koji u prstenastom prostoru oko bušaćih šipki u području zaštitnih cijevi ispuni fluid nakon jednog hoda pumpe. U jednadžbi 5.7 oznaka korištena za prikaz vrijednosti 0,23554 je "K_1",

$$K_1 = \frac{V'_n}{V'_{PPBŠZC}} = \frac{16\ (dm^3)}{67{,}93\ (\frac{dm^3}{m'})} = \underline{0{,}23554\ \text{m}} \qquad (5.7)$$

- vrijednost 0,25293 (m) predstavlja broj metara koji u prstenastom prostoru oko bušaćih šipki u području otvorenog kanala bušotine ispuni fluid nakon jednog hoda pumpe. U jednadžbi 5.8 oznaka korištena za prikaz vrijednosti 0,25293 je "K_2",

$$K_2 = \frac{V'_n}{V'_{PPBŠOK}} = \frac{16\ (dm^3)}{63{,}26\ (\frac{dm^3}{m'})} = \underline{0{,}25293\ \text{m}} \qquad (5.8)$$

- vrijednost 2040 (m) predstavlja duljinu bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine,

- vrijednost 210 (m) predstavlja duljinu teških šipki u kanalu bušotine

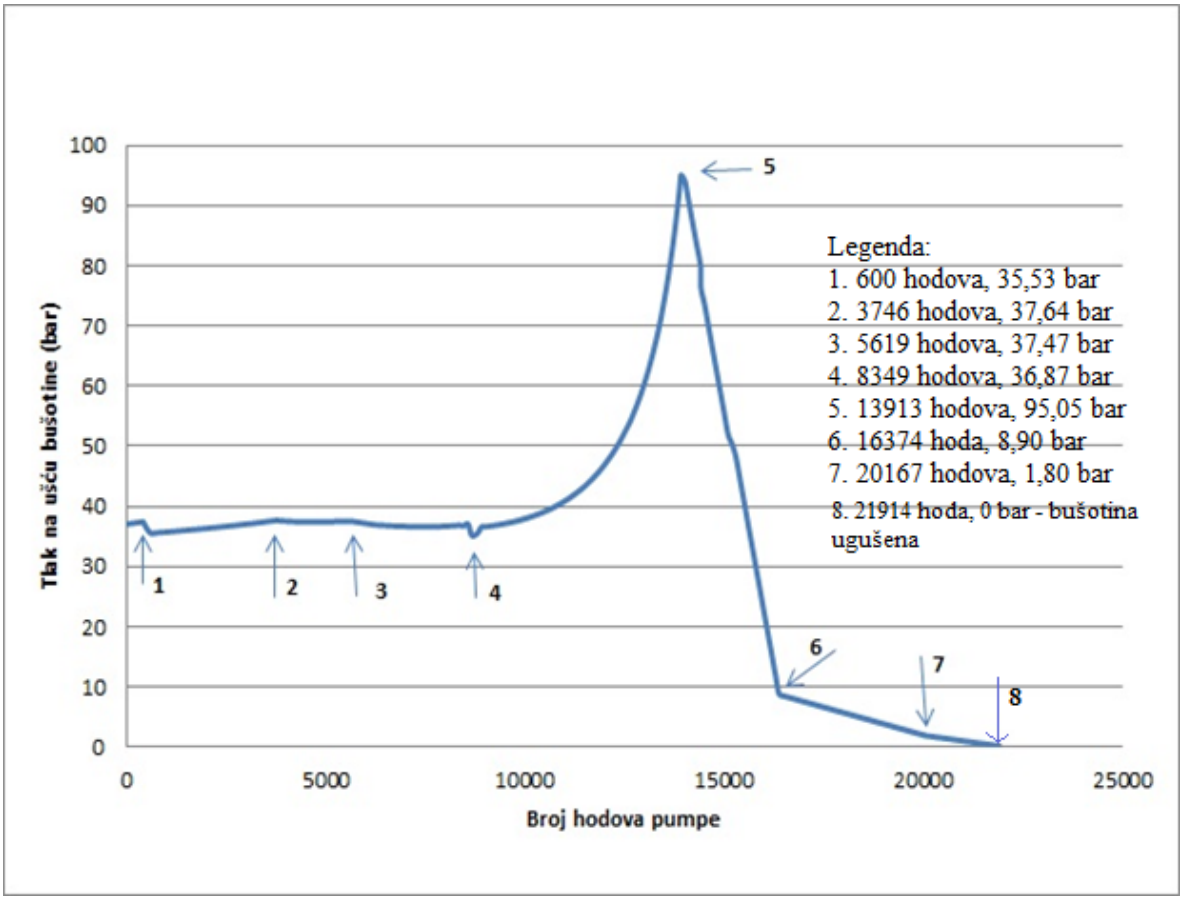
- vrijednost 1566,3 (m) predstavlja visinu isplake za gušenje u prstenastom prostoru oko bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine prilikom zadnje promjene u sustavu,

- vrijednost 473,71 (m) predstavlja visinu koju zauzima isplaka "međugustoće" u prstenastom prostoru oko bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine,

- vrijednost 1,78 x 10^5 (Pa) predstavlja hidrostatički tlak stupca dotoka (plina) u trenutku za koji se prikazuje postupak proračuna.

Istodobna metoda gušenja bušotine

Na slici 5-5 prikazan je razvoj tlaka na ušću bušotine prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine s istaknutim točkama u kojima je došlo do određene promjene u sustavu kao što su promjene jediničnih volumena, početak cirkulacije otežane isplake i izlazak plina iz kanala bušotine.



Slika 5-6. Razvoj tlaka na ušću bušotine prilikom izvođenja istodobne metode gušenja bušotine

Očitanje na manometru tlaka na ušću bušotine kada je bušotina zatvorena iznosilo je 37 bara što se može vidjeti na samom početku krivulje. U početnom stadiju gušenja bušotine utiskuje se isplaka za bušenje, a plin se kreće prema površini u prstenastom prostoru oko teških šipki i polagano ekspandira sa smanjenjem tlaka. Na krivulji se može primijetiti lagani porast tlaka što je izravna posljedica ekspanzije plina u navedenom području gdje je, zbog manjeg jediničnog volumena prstenastog prostora, porast visine dotoka nešto izraženiji nego u širem području prstenastog prostora. Točka 1 prikazuje trenutke u kojima dotok prelazi iz prstenastog prostora oko teških šipki u prstenasti prostor oko bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine. Posljedica toga je smanjenje visine stupca plina što rezultira smanjenjem vrijednosti tlaka na ušću bušotine. Do smanjenja tlaka dolazi zbog toga što se smanjio stupac plina čija je gustoća puno manja od gustoće isplake pa se hidrostatički tlak u prstenastom prostoru povećao. Daljnjom cirkulacijom može se primijetiti kako tlak na ušću postepeno raste zbog daljnje ekspanzije plina. U međuvremenu se počela utiskivati "međuisplaka" i trenutak kada ta isplaka ulazi u prstenasti prostor može se vidjeti na točki 2. Kako isplaka veće gustoće napreduje kroz

prstenasti prostor tako se i tlak na ušću bušotine smanjuje jer povećanje hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru uzrokovano isplakom veće gustoće nadmašuje utjecaj ekspanzije plina koja se još uvijek događa dosta sporo. U trenucima dok se cirkulira s isplakom povećane gustoće priprema se isplaka za gušenje gustoće 1,58 kg/m^3 i započinje se njeno utiskivanje u kanal bušotine. Trenutak u kojem isplaka za gušenje ulazi u kanal bušotine prikazan je u točki 3. Može se primijetiti kako se iza točke 3 vrijednost tlaka na ušću još više smanjuje iz istog razloga kao i kod ulaza "međuisplake" u prstenasti prostor, zbog povećanja hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru, odnosno smanjenjem razlike između slojnog i hidrostatičkog tlaka. Otprilike nakon 7500 hodova pumpe može se primijetiti kako negativan utjecaj ekspanzije plina nadmašuje pozitivan utjecaj isplake za gušenje i tlak na ušću počinje rasti.

Točka 4 prikazuje trenutke u kojima dotok prelazi iz područja prstenastog prostora oko bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine u područje prstenastog prostora oko bušaćih šipki unutar zaštitnih cijevi. Unutarnji promjer zaštitnih cijevi je veći od promjera dlijeta i stoga se i jedinični volumen ovog područja povećava što znači da se, uvjetno rečeno, smanjuje visina stupca plina u prstenastom prostoru (visina stupca plina još uvijek raste zbog ekspanzije plina, ali ne u tolikoj mjeri kao u području manjeg jediničnog volumena prstenastog prostora).

Nakon što kompletan stupac plina dođe u područje unutar zaštitnih cijevi više nema nikakvih padova tlaka iz razloga što je jedinični volumen prstenastog prostora jednak sve do ušća bušotine. Kao što se može vidjeti na krivulji, vrijednost tlaka na ušću u ovim trenucima raste u puno većoj mjeri nego u dubljim dijelovima kanala bušotine. Razlog tomu je pojačana ekspanzija plina koja eksponencijalno raste tijekom kretanja stupca plina prema površini.

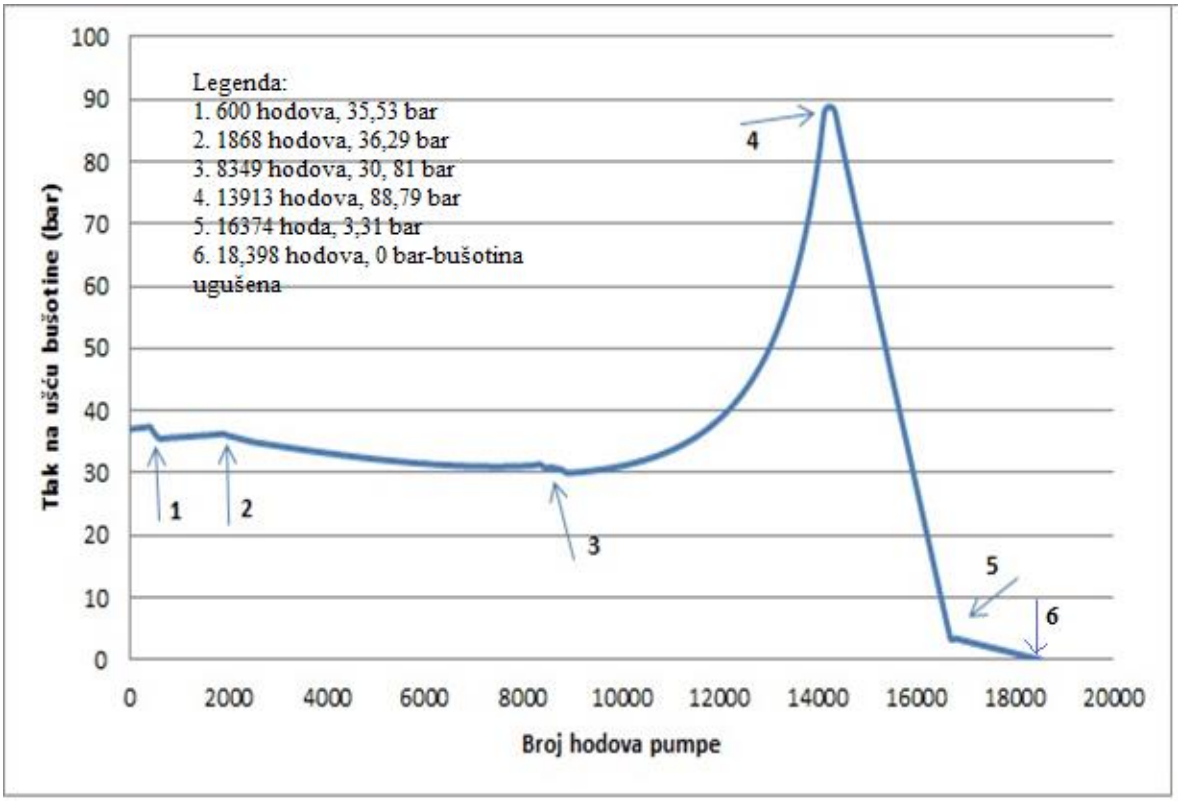
Vrijednost tlaka na ušću bušotine eksponencijalno raste sve do trenutka kada plin počinje izlaziti iz kanala bušotine (točka 5) što se u ovom primjeru događa nakon nešto više od 14 000 hodova pumpe. U trenucima kada je vrh stupca plina došao na ušće bušotine, a plin počeo izlaziti iz kanala bušotine visina stupca plina iznosila je gotovo 580 m i zauzimala volumen od gotovo 39,4 m^3. To je znatno povećanje volumena plina u odnosu na početnih 3 m^3. Krivulja pokazuje znatan pad vrijednosti tlaka na ušću kako sve veće količine plina izlaze iz bušotine, a isplaka za gušenje sve više ispunjava prstenasti prostor. Od trenutka kada je vrh stupca plina došao na ušće do trenutka kada je kompletan dotok istisnut iz kanala bušotine prošlo je 2300 hodova pumpe.

Nakon što je kompletan plin istisnut iz kanala bušotine vrijednost tlaka na ušću iznosila je 8,9 bar (točka 6). Tlak još uvijek nije pao na vrijednost 0 iz razloga što bušotina još uvijek

nije ispunjena isplakom za gušenje nego se u njoj nalaze tri isplake različitih gustoća koje ostvaruju manji tlak na dno od tlaka koji ostvaruje samo isplaka konačne gustoće za gušenje (ρ_g). Na području krivulje od točke 6 do točke 7 vrijednost tlaka na ušću sve više pada iz razloga što isplaka za bušenje gustoće 1500 kg/m^3 zauzima sve manje prostora u bušotini, a isplaka za gušenje gustoće 1580 kg/m^3 ga sve više ispunjava pa se i povećava hidrostatički tlak u kanalu bušotine (otpori protjecanju zanemareni, idealni model). Točka 7 prikazuje trenutak kada je isplaka za bušenje u potpunosti istisnuta iz bušotine i u kanalu se nalaze samo međuisplaka gustoće 1540 kg/m^3 i isplaka za gušenje gustoće 1580 kg/m^3. Daljnjom cirkulacijom i međuisplaka izlazi iz kanala bušotine i tlak na ušću, ako je sve izvedeno na pravilan način i nije bilo problema prilikom samog izvođenja procesa, pada na vrijednost 0 (točka 8) što znači da je bušotina ugušena i može se pristupiti daljnjim radovima predviđenim projektom.

Inženjerska metoda gušenja bušotine

Slika 5-6 prikazuje razvoj tlaka na ušću prilikom izvođenja inženjerske metode gušenja bušotine i poslužiti će za usporedbu dobivenih rezultata prilikom izvođenja istodobne metode.



Slika 5-7. Prikaz razvoja tlaka na ušću bušotine prilikom izvođenja inženjerske metode gušenja bušotine.

Kao i kod provođenja istodobne metode, na samom početku krivulje vrijednost tlaka na ušću jednaka je očitanoj vrijednosti kod zatvaranja bušotine. U prvim trenucima nakon početka cirkulacije vrijednost tlaka na ušću raste zbog ekspanzije plina prilikom kretanja prema površini. Točka 1, kao i u istodobnoj metodi, predstavlja pad vrijednosti tlaka na ušću zbog prelaska stupca plina iz područja teških šipki u područje bušaćih šipki u otvorenom kanalu bušotine, odnosno u područje većeg jediničnog volumena. Nakon toga tlak ponovno raste sve do trenutka kada u prstenasti prostor počne ulaziti otežana isplaka za gušenje (točka 2). Osnovna razlika između inženjerske i istodobne metode gušenja bušotine je u tome što ne postoji tzv. "međuisplaka", odnosno isplaka čija je gustoća povećana, ali ne na vrijednost potrebnu za gušenje bušotine. U inženjerskoj metodi, uvjetno rečeno, odmah se kreće na utiskivanje isplake za gušenje bušotine.

Ono što se ne vidi na slici je vrijeme potrebno za pripremanje dovoljne količine isplake za gušenje prije nego se može krenuti u sami proces gušenja. Kako isplaka za gušenje sve više napreduje kroz kanal bušotine tako se i vrijednost tlaka na ušću smanjuje sve do onoga trenutka kada utjecaj ekspanzije plina nadmašuje pozitivan utjecaj hidrostatičkog tlaka kojeg ostvaruje isplaka za gušenje (otprilike nakon 8000 hodova). Točka 3 prikazuje ponovnu promjenu u sustavu, odnosno ulazak dotoka u područje unutar zaštitnih cijevi te pad tlaka na ušću uzrokovan tom promjenom. Od točke 3 do točke 4 vidi se nagli porast vrijednosti tlaka na ušću uzrokovan sve bržom ekspanzijom plina kako stupac plina napreduje prema površini, odnosno kako se smanjuje tlak koji djeluje na stupac plina.

U trenutku kada je vrh stupca dotoka plina na ušću bušotine (točka 4), visina stupca dotoka plina iznosi 580 m, jednako kao kod istodobne bušotine zbog istih ulaznih podataka. Kako plin sve više izlazi iz kanala bušotine tako se i vrijednost tlaka na ušću sve više smanjuje. Točka 5 prikazuje trenutak kada je sav plin u potpunosti istisnut iz kanala bušotine i u bušotini se samo nalaze dvije isplake različitih gustoća. U trenutku kada je plin u potpunosti istisnut tlak na ušću ima vrijednost 3,5 bara. Vrijednost tlaka na ušću nije 0 iz razloga što isplaka za gušenje još uvijek nije u potpunosti ispunila kanal bušotine. Od točke 5 nadalje prikazan je pad tlaka zbog zamjene isplake za bušenje isplakom za gušenje bušotine i onoga trenutka kada je isplaka za gušenje bušotine u potpunosti ispunila bušotinu, ako nije bilo problema, vrijednost tlaka na ušću pada na vrijednost 0 i bušotina je ugušena (točka 6).

U tablici 5-1 dana je usporedba vrijednosti tlaka na ušću bušotine za određeni broj hodova.

Tablica 5-1. Usporedba vrijednosti tlaka na ušću bušotine za istodobnu i inženjersku metodu gušenja bušotine

Hodovi pumpe	Tlak na ušću bušotine [bar] *Istodobna metoda*	Tlak na ušću bušotine [bar] *Inženjerska metoda*
1000	35,7	35,7
4000	37,55	33,21
8000	36,70	31,12
12500	51,27	44,48
Trenutak kada dotok počinje izlaziti iz bušotine	95,05	88,8

Podaci istaknuti u tablici 5-1 pokazuju razlike u tlaku na ušću bušotine prilikom izvođenja navedenih metoda gušenja bušotine. Može se primijetiti da se kod izvođenja inženjerske metode razvijaju manji tlakovi na ušću nego kod izvođenja istodobne metode. Razlog tomu je što se kod inženjerske metode odmah počinje s utiskivanjem isplake za gušenje bušotine pa je i hidrostatički tlak u prstenastom prostoru veći nego kod istodobne metode gdje postepeno dolazi do utiskivanja isplake za gušenje.

Ono što treba napomenuti i jako je važno, a ide u korist istodobnoj metodi, je to što se istodobnoj metodi pristupa gotovo trenutačno kada je registriran dotok slojnog fluida. Počinje se s istiskivanjem doteklog slojnog fluida isplakom za bušenje dok se pripremaju obroci otežanih isplaka za daljnju cirkulaciju i konačno za ugušivanje bušotine. Za provođenje inženjerske metode potrebno je određeno vrijeme za pripremu dovoljne količine isplake za gušenje i za ispunjavanje radnog lista za ugušivanje bez kojega se ne počinje proces gušenja bušotine.

6. ZAKLJUČAK

Za istodobnu metodu gušenja možemo reći da je kompromis između bušaće i inženjerske metode gušenja bušotine. Istodobna metoda ima određene karakteristike obje navedene metode. Najbitnija zajednička značajka s bušaćom metodom je gotovo trenutačno pristupanje procesu gušenja bušotine. To je značajna prednost istodobne metode u odnosu na inženjersku iz razloga što se minimalizira mogućnost povećanja volumena plina kod držanja bušotine zatvorenom i pripremanja za proces gušenja. S druge strane, prednost inženjerske metode nad istodobnom metodom je razvijanje manjeg tlaka na ušću bušotine prilikom samog procesa gušenja bušotine što je prikazano ranije. To je važno iz razloga što je manja vjerojatnost da će doći do frakturiranja naslaga u području neposredno ispod pete prethodno ugrađene kolone koje je najkritičnije područje u cijelom kanalu bušotine.

Istodobna metoda gušenja bušotine, po dostupnim podacima, nikada nije provedena u Republici Hrvatskoj. Razlog tomu je što su bušaća i inženjerska metoda najrasprostranjenije i općeprihvaćene kao prva rješenja prilikom gušenja bušotine. Razlog tomu je taj što je istodobna metoda dosta kompliciranija za izvedbu od navedenih metoda. Kod izvođenja istodobne metode potrebno je vrlo stručno manevriranje sapnicom (kako bi se tlak na dno održao konstantnim) jer dolazi do čestih promjena u sustavu. Svaki put kad se počne s utiskivanjem isplake veće gustoće, mijenja se tlak u prstenastom prostoru zbog povećanja otpora protjecanju i povećanja hidrostatičkog tlaka. Posljedica toga je da se stalno mora korigirati otvor na sapnici kako ne bi došlo do novog dotoka ili do frakturiranja naslaga.

Iz tog razloga, istodobna metoda je kompliciranа i kao takva najčešće zanemarena prilikom izbora metode za gušenje bušotine, što je i razumljivo jer, ako se problem može riješiti jednostavnijom metodom, zašto koristiti kompliciraniju bez obzira na sve njene prednosti.

7. LITERATURA

1. Aberdeen Drilling Schools & Well Control Training Centre, 2002. „Well Control For The Man On The Rig“, Aberdeen.
2. CROSCO d.o.o., Centar za kontrolu tlaka u bušotini, 2014., Kontrola tlaka u bušotini, predavanja uz praktične vježbe na simulatoru, Zagreb.
3. Goins, W.C.Jr., Sheffield, R., 1983. Blowout Prevention, Houston: Gulf Professional Publishing.
4. Grace, R.D., 2003. Blowout and Well Control Handbook, Houston: Gulf Professional Publishing.
5. Maersk Training Centre A/S, Well Control Manual.
6. Noble Drilling Services , INC, 2012. Well Control Manual.
7. Schlumberger, 1999. Well Control Manual.
8. Well Control School, 2002. Guide To Blowout Prevention.

Izjava:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

_____

Davor Erceg