Tolerancija dotoka

Kvartuč, Marko

Master's thesis / Diplomski 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:169:278008

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

TOLERANCIJA DOTOKA

Diplomski rad

Marko Kvartuč

N297

Zagreb, 2020

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

TOLERANCIJA DOTOKA

MARKO KVARTUČ

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

Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada je opis tolerancije dotoka kao važnog segmenta projektiranja bušotina. Ukoliko dođe do dotoka plina u bušotinu, taj dotok je potrebno što ranije prepoznati. Nakon što se utvrdi radi li se o dotoku, potrebno je primijeniti najpovoljniju metodu ugušivanja bušotine. U ovom radu obrađene su različite s pretpostavkom da je alat spušten na dno bušotine. Tijekom ugušivanja potrebno je manipulacijom sapnicom na vodu za prigušivanje održavati tlak na dnu konstantnim kako bi se spriječilo daljnje pritjecanje slojnog fluida u bušotinu. Proračun tolerancije dotoka izvodi se prethodno bušenju kako bi se utvrdio najveći volumen plina koji smije ući u bušotinu, a da ga se može iscirkulirati bez opasnosti od loma naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi. Kompanije u današnje vrijeme imaju svoje upute i smjernice za proračunavanje tolerancije dotoka te za određene promjere otvorenog kanala bušotina definiraju najveći dozvoljeni dotok.

Ključne riječi: tolerancija dotoka, kontrola tlaka, gušenje bušotina, najveći dopušteni volumen dotoka plina, peta kolone zaštitnih cijevi, gustoća isplake, gradijent tlaka frakturiranja.

Diplomski rad sadrži: 46 stranica, 23 slike, 1 tablica i 14 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF
Pomoć pri izradi: Dr sc. Damir Zadravec

Ocjenjivači: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a
Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
Dr. sc. Borivoje Pašić, redoviti profesor RGNF-a

Datum obrane: 20. veljače 2020.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

KICK TOLERANCE

MARKO KVARTUČ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

The aim of this thesis was to describe the kick tolerance as a fundamental concept of a well design. If gas enters a wellbore it is necessary to detect it as soon as it is possible. Once the kick has been confirmed, a specific kill method must be applied. In this thesis, the bit is considered to be at the bottom of the well. Bottom hole pressure is being kept at the constant value to prevent additional influx by adjusting the choke at the surface and by bringing the pump to the kill rate. The kick tolerance is calculated prior to drilling to determine the maximum volume of gas influx that can be circulated out of the hole without the risk of fracturing the formation at the casing shoe level. Companies nowadays have instructions and guidelines for calculating the kick tolerance and have even set the maximum allowable kick for certain borehole diameters.

Keywords: kick tolerance, well control, well kill techniques, maximum allowed gas influx volume, casing shoe, drilling mud density, fracturing gradient.

Thesis contains: 46 pages, 23 figures, 1 table and 14 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD
Technical support and assistance: Damir Zadravec, PhD

Reviewers: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD
Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD
Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: February 20, 2020

Sadržaj

Popis slika ..... **i**
Popis tablica ..... **ii**
Popis korištenih oznaka i pripadajućih SI jedinica ..... **iii**
Popis kratica ..... **v**
1. UVOD **1**
2. OPERTIVNI GEOLOŠKI NADZOR BUŠENJA **3**
2.1 Aktivnosti LNB jedinice **5**
2.1.1 Kontrola bušaćih parametara **5**
2.1.2 Analiza pojava plina u isplaci **5**
2.1.3 Geološka kontrola – analiza krhotina stijena i bušotinskih fluida **5**
3. METODE GUŠENJA BUŠOTINA **6**
3.1 Inženjerska metoda gušenja bušotine **6**
3.1.1 Prednosti i nedostaci inženjerske metode **12**
3.2 Bušaća metoda gušenja bušotine **15**
3.2.1 Prva cirkulacija kod primjene bušaće metode **15**
3.2.2 Druga cirkulacija kod primjene bušaće metode **18**
3.2.3 Prednosti i nedostaci primjene bušaće metode gušenja bušotine **23**
3.3 Istodobna metoda gušenja bušotine **23**
3.3.1 Prednosti i nedostaci primjene istodobne metode gušenja bušotine **28**
4. TOLERANCIJA DOTOKA **29**
4.1 Određivanje dubine ugradnje kolona zaštitnih cijevi **30**
4.2 Migracija plina **31**
4.3 Ispitivanje integriteta naslaga **31**
4.4 Metoda proračuna **33**
4.5 Praktični primjer proračuna **38**
5. ZAKLJUČAK **45**
6. LITERATURA **46**

Popis slika

Slika 2-1. Neovisna mreža LNB senzora postavljenih na različitim mjestima na bušaćem postrojenju 4
Slika 3-1. Prikaz početnog stanja u bušotini nakon zatvaranja bušotine 8
Slika 3-2. Prikaz stanja u bušotini pri početku cirkulacije u bušotinu (lijevo) i prikaz trenutka kada se vrh stupca plina protiskuje do pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi (desno) 9
Slika 3-3. Prikaz stanja u bušotini tijekom izvođenja inženjerske metode i protiskivanja plina prema ušću.....10
Slika 3-4. Prikaz stanja u bušotini tijekom izvođenja inženjerske metode kada plin doseže ušće (lijevo) i prikaz trenutka kada je sav plin iscirkuliran izvan bušotine (desno).....11
Slika 3-5. Krajnja faza gušenja primjenom inženjerske metode kada hidrostatski tlak otežane isplake nadvlada slojni tlaka.....12
Slika 3-6. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom provođenja inženjerske metode gušenja bušotine.....14
Slika 3-7. Prikaz stanja u bušotini pri početku protiskivanja plina iz bušotine (lijevo) i prikaz trenutka kad vrh stupca plina migrira do pete kolone zaštitnih cijevi (desno).....16
Slika 3-8. Prikaz stanja u bušotini tijekom cirkulacije plina prvom cirkulacijom kod primjene bušaće metode.....17
Slika 3-9. Prikaz stanja u bušotini nakon prve cirkulacije kod primjene bušaće metode 18
Slika 3-10. Prikaz početnog stanja u bušotini za vrijeme druge cirkulacije bušaće metode (lijevo) te prikaz utiskivanja isplake za gušenje (desno). 19
Slika 3-11. Prikaz stanja u bušotini tijekom druge cirkulacije (lijevo) te prikaz krajnje faze gušenja (desno) 20
Slika 3-12. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom prve cirkulacije 21
Slika 3-13. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom druge cirkulacije 22
Slika 3-14. Početak cirkulacije isplakom za bušenje (lijevo) i već utisnut obrok isplake gustoće ρ_1 (desno) tijekom provođenja istodobne metode gušenja 24
Slika 3-15. Prikaz slučaja s tri različite gustoće isplake u bušotini (lijevo) i s četiri različite gustoće isplake u bušotini (desno) tijekom primjene istodobne metode gušenja.....25
Slika 3-16. Isplaka za gušenje istiskuje isplake manjih gustoća (lijevo) te bušotina ugušena istodobnom metodom (desno) 26
Slika 3-17. Razvoj tlaka na šipkama primjenom istodobne metode gušenja bušotine (Erceg, 2017).....27
Slika 3-18. Razvoj tlaka na ušću primjenom istodobne metode gušenja bušotine 27
Slika 4-1. Prikaz određivanja dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi standardnom metodologijom („bottom up“) 30
Slika 4-2. Graf ovisnosti tlaka o utisnutom volumenu pri izvođenju testa integriteta naslaga ili testa popuštanja naslaga.....32
Slika 4-3. Prikaz bušotine u trenutku kada vrh stupca plina dosegne petu prethodno ugrađene kolone 37
Slika 4-4. Litološki sastav, gradijenti tlaka frakturiranja i pornog tlaka te gradijent temperature za bušotinu Berak – 1 38

Popis tablica

Tablica 4-1 prikaz najvećih volumena dotoka na pojedinim dubinama bušotine Berak-1.....42

Popis korištenih oznaka i pripadajućih SI jedinica

Oznaka	Značenje	Jedinica
A	-površina prstenastog prostora otvorenog kanala	[m^2]
$D_{bš}$	-promjer bušaćih šipki	[m]
D_{dl}	-promjer dlijeta	[m]
g	-ubrzanje sile teže	[m/s^2]
G_f	-gradijent tlaka frakturiranja	[bar/m]
G_i	-gradijent hidrostatskog tlaka isplake	[bar/m]
G_p	-gradijent hidrostatskog tlaka dotoka	[bar/m]
G_{sl}	-gradijent pornog tlaka	
H_b	-vertikalna dubina kanala bušotine	[m]
H_i	-visina stupca isplake ispod pete posljednje ugrađene kolone zaštitnih cijevi	[m]
H_p	-visina stupca plina	[m]
H_{zc}	-dubina prethodne ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi	[m]
MDTUB	-najveći dozvoljeni tlak na ušću bušotine	[bar]
p_{FIT}	-tlak pri kojem naslaga zadržava integritet	[bar]
p_{LOT}	-tlak popuštanja naslage	[bar]
p_{psl}	-porni tlak na određenoj dubini	[bar]
$p_{TBŠ}$	-tlak na ušću bušotine na bušaćim šipkama	[bar]
$p_{TBŠZ}$	-tlak na ušću bušotine na bušaćim šipkama u slučaju zatvorene bušotine	[bar]
p_{TCK}	-konačni tlak cirkulacije	[bar]
p_{TCP}	-početni tlak cirkulacije	[bar]
p_{TCS}	-smanjeni tlak cirkulacije	[bar]
p_{TUB}	-tlak na ušću bušotine (u prstenastom prostoru)	[bar]
p_{TUBZ}	-tlak na ušću bušotine (u prstenastom prostoru) u slučaju zatvorene bušotine	[bar]
p_{vrh}	- tlak na dubini vrha doteklog plina	[bar]

p_{zc}	-tlak na razini prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi	[bar]
V_{psl}	-volumen dotoka na razini sloja	[m^3]
V_{pp}	-volumen dotoka na razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi	[m^3]
$\rho_{1,2}$	-gustoća „međuisplake"	[kg/m^3]
ρ_i	-gustoća isplake za bušenje	[kg/m^3]
ρ_p	-gustoća dotoka plina	[kg/m^3]
ρ_t	-gustoća isplake za gušenje	[kg/m^3]

Popis kratica

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

BOP – preventerski sklop (engl. *blow out preventer*)

FIT – test pri kojem formacija zadržava integritet (engl. *formation integrity test*)

LNB –laboratorij nadzora bušenja

LOT – test primanja formacije (engl. *leak off test*)

MDTUB – najveći dozvoljeni tlak na ušću bušotine (engl. *maximum allowable annular surface pressure, MAASP*

1. UVOD

Dotok je svako nepoželjno pritjecanje slojnog fluida (plina, nafte ili slojne vode) u bušotinu. Do pojave dotoka u bušotini dolazi ukoliko je hidrostatski tlak isplake manji od slojnog tlaka. Gustoća isplake za bušenje određuje se unutar granica tzv. područja za bušenje između veličina gradijenata pornog tlaka i tlaka raspucavanja stijena (*engl. safe mud window*) (Devereux, 1998.). Većina incidenata vezanih uz dotok se događa nenamjerno, na primjer, bušenjem naslaga s povišenim tlakom ili klipovanjem tijekom izvlačenja bušaćih alatki iz bušotine. Do dotoka može doći u bilo kojoj fazi izvođenja radova u bušotini stoga je u svrhu izbjegavanja izazivanja dotoka potreban stalan oprez i pripravnost.

Primarna kontrola tlaka u bušotini podrazumijeva održavanje gustoće isplake dovoljnom kako bi hidrostatski tlak stupca isplake spriječio ulazak slojnog fluida u bušotinu. Razlika između hidrostatskog tlaka stupca isplake i slojnog tlaka utječe i na brzinu napredovanja dlijeta tj. brzinu bušenja (*engl. rate of penetratrion*), veća razlika u tlakovima znači i manju brzinu napredovanja dlijeta. Iz tog razloga, gustoću isplake je optimalno održavati na vrijednosti kojom će hidrostatski tlak stupca isplake nadvladati vrijednost slojnog tlaka za najmanju praktičnu vrijednost i u isto vrijeme onemogućiti ulazak slojnog fluida (Noble Drilling Services, 2012).

Sekundarna kontrola tlaka u bušotini odnosi se na korištenje mehaničkog uređaja u slučaju da je stupac isplake u bušotini nedovoljne gustoće da nadvlada slojni tlak. U tom slučaju dolazi do dotoka slojnog fluida u kanal bušotine. Kada započne proces ulaska slojnog fluida u bušotinu, hirdrostatski tlak počinje dodatno padati, a ukoliko se taj proces ne zaustavi na vrijeme dolazi do erupcije. Taj proces se zaustavlja koristeći preventerski sklop za kontrolu tlaka u bušotini (*engl. blow out preveneter*, BOP) kako bi se zatvorila bušotina te spriječio daljnji dotok slojnog fluida u bušotinu. Rano prepoznavanje gubitka primarne kontrole nad slojnim tlakom i što ranije korištenje preventerskog sklopa za zatvranje su ključ učinkovitosti sekundarne kontrole nad tlakom u bušotini. Brzom reakcijom minimizira se volumen dotoka fluida u bušotinu. Što je manji volumen dotoka lakše se bušotina uguši zbog razvoja manjih tlakova koji se javljaju u prstenastom prostoru pri zatvaranju bušotine i pri cirkulaciji dotoka slojnog fluida iz bušotine.

Volumen dotoka ovisi o raznim čimbenicima, od kojih se samo na neke može utjecati, a to su:

- gustoća isplake,
- brzina bušenja,
- vrijeme do prepoznavanja dotoka i zatvaranja bušotine,
- promjer otvorenog dijela kanala bušotine.

U slučaju da se sekundarna kontrola nad tlakom u bušotini ne može uspostaviti zbog konkretnih bušotinskih uvjeta ili opreme, potrebno je poduzeti određene hitne procedure koje će uobičajeno voditi ka napuštanju bušotine. Te hitne procedure spadaju pod tercijarnu kontrolu nad tlakom u bušotini (Noble Drilling Services, 2012).

2. OPERTIVNI GEOLOŠKI NADZOR BUŠENJA

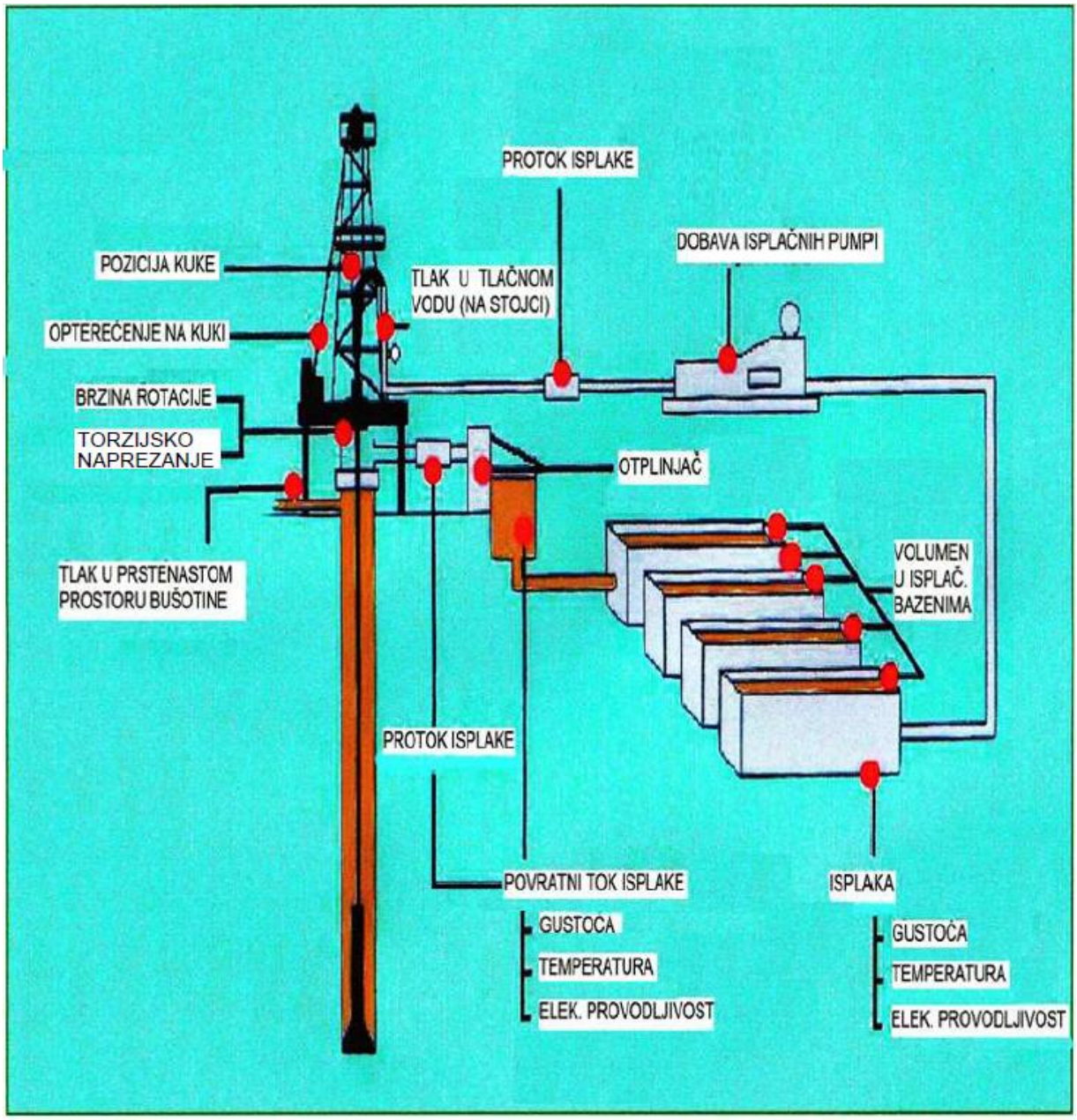
Servis operativnog geološkog nadzora je sustav koji omogućava očitavanje i analizu važnih podataka o bušenju i o bušaćem postrojenju tijekom izrade kanala bušotine. Također, dolazi se do podataka važnih za kontrolu tlaka u bušotini, za sigurno funkcioniranje postrojenja i tako dalje. Laboratorij nadzora bušenja (LNB) je pokretna jedinica koja se nalazi u blizini bušaćeg tornja, ukoliko je predviđena projektom izrade bušotine. Sadrži potrebne sklopove mjernih uređaja te opremu i programe za interpretaciju određenih informacija. Vrlo je bitno da je osoblje koje radi unutar LNB-a osposobljeno i stručno, budući da kriva interpretacija određenih signala, koji očitavaju različiti senzori i sklopovi uređaja za analizu, može negativno utjecati na kvalitetu rada i sigurnost postrojenja. Rano otkrivanje dotoka te praćenje gradijenata kretanja slojnog tlaka tijekom bušenja spadaju pod najvažnije zadatatke operativnog geološkog nadzora primjenom LNB jedinice (Whittaker 1991.). Iznimno je bitno pravovremeno reagirati na sloj pod povećanim tlakom iz kojeg se pojavio dotok slojnog fluida kako ne bi došlo do većeg dotoka nego što to dopušta proračun tolerancije budući da to može za posljedicu imati ugrožavanje života, erupciju, gubitak bušotine, bušaćeg postrojenja ili platforme. Kako bi pravovremena reakcija bila moguća u slučaju dotoka, potrebno je poznavanje ranih znakova dotoka.

Rani znakovi dotoka (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.):

a) naglo povećanje brzine bušenja (*engl. drilling break*),
b) pojava plina u isplaci,
c) promjena svojstava isplake,
d) smanjenje gustoće i povećanje veličine izbušenih krhotina u isplaci,
e) porast temperature u povratnom toku isplake,
f) povećanje brzine rotacije, torzije te natega,
g) povećanje razine isplake u isplačnim bazenima,
h) povećanje povratnog protoka isplake iz bušotine.

Rane znakove se može prepoznati putem aktivne kontrole raznih parametara u sklopu operativnog geološkog nadzora bušenja.

Na slici 2-1. prikazani su senzori na bušaćem postrojenju koji zadatim podatke šalju instrumentima LNB jedinice u kojoj se ti podaci služe za praćenje bušaćih parametara.



Slika 2-1. Neovisna mreža LNB senzora postavljenih na različitim mjestima na bušaćem postrojenju (Whittaker 1991)

Obzirom na način izvođenja radova i opremu koja se koristi te parametre koji se nadziru, opseg aktivnosti LNB jedinice može se podijeliti u tri glavne skupine.

2.1 Aktivnosti LNB jedinice

LNB jedinica obuhvaća uređaje pomoću kojih se mogu nadgledati i prikazivati svi relevantni podaci.

2.1.1 Kontrola bušaćih parametara

Bušaći parametri koje se prati obuhvaćaju sljedeće:

1. parametre sustava manipulacije alatki:
    - dubina bušotine,
    - mehanička brzina bušenja,
    - opterećenje na kuki,
    - opterećenje na dlijeto.
2. parametre rotacijskog sustava:
    - brzina rotacije bušaćih alatki,
    - torzijsko naprezanje.
3. parametre isplačnog sustava:
    - gustoća,
    - protok na izljevnoj cijevi,
    - razina u isplačnim bazenima
    - tlak na ušću (u prstenastom prostoru) i na bušaćim šipkama (na stojci)
    - temperatura isplake,
    - električna provodljivost.

2.1.2 Analiza pojava plina u isplaci

Instrumenti LNB laboratorija omogućuju registriranje pojava plina u isplaci, utvrđivanje njihovih ukupnih relativnih koncentracija (izraženih u dijelovima jedinice) kao i njihovog komponentnog sastava.

2.1.3 Geološka kontrola – analiza krhotina stijena i bušotinskih fluida

Uzorci krhotina stijena i isplake koji prolaze kroz mješalicu i komplet sita različite veličine otvora sita, koriste se u svrhu daljnjih ispitivanja litoloških svojstava te analize prisutnosti ugljikovodika (Whittaker 1991.).

3. METODE GUŠENJA BUŠOTINA

Proračun tolerancije dotoka je važan segment kontrole tlaka u bušotini, koji se provodi prije samog izvođenja bušenja. U slučaju dotoka u kanal bušotine isti je potrebno iscirkulirati kako bi se ponovno uspostavila primarna kontrola tlaka u bušotini. Način, to jest metoda koja se odabere za uspostavljanje kontrole tlaka vodi do ostvarivanja većih ili manjih tlakova u razini pete kolone te je potrebno temeljno razumijevanje metoda gušenja bušotina. U ovom radu se neće ulaziti u detaljne proračune niti u detaljne analize trenda razvoja tlaka, već će sažeto biti pojašnjene uobičajene procedure gušenja te razvoj tlakova koji nastaju na ušću i na bušaćim šipkama za slučaj kad se bušaće alatke nalaze na dnu bušotine.

Najčešće se koristi jedna od triju metoda za gušenje bušotina pri čijem se izvođenju podržava konstantan tlak na dno.

3.1 Inženjerska metoda gušenja bušotine

U Inženjerskoj metodi (*metoda „čekaj i otežaj”*) (*engl. wait and weight*) gušenja bušotina, barem u teoriji, bušotinu se guši kroz jednu cirkulaciju, iz čega joj potječe i drugi naziv „metoda jedne cirkulacije” (Noble Drilling Services, 2012). U ovoj metodi otežanu isplaku je potrebno pripremiti nakon zatvaranja bušotine, ukoliko dio otežane isplake nije već prethodno pripremljen u isplačnim bazenima. Nakon što se zatvori bušotina i tlakovi se stabiliziraju potrebno je očitati tlak na bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$) pomoću kojega se izračunava gustoća otežane isplake za gušenje. Taj je tlak referentan budući da je u bušaćim šipkama (u trenutku dotoka) isplaka poznate gustoće pa je tlak na šipkama jednak razlici između ležišnog tlaka i hidrostatskog tlaka isplake za gušenje.

Potrebno je provesti početni proračun prije početka cirkulacije, to jest ispuniti radni list za ugušivanje (*engl. kill sheet*) koji sadrži (Noble Drilling Services, 2012):

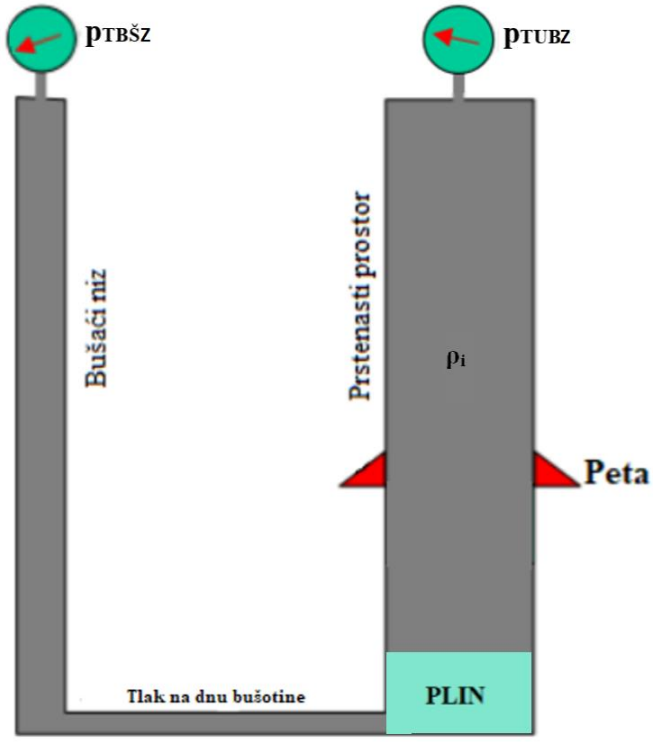
1. proračun potrebne gustoće isplake;
2. proračun kapaciteta to jest volumena unutar alata i u prstenastom prostoru po duljini (dubini) bušotine;
3. proračun početnog tlaka cirkulacije,
4. proračun krajnjeg tlaka cirkulacije,
5. određivanje broja hodova isplačne sisaljke potrebnih da isplaka za ugušivanje stigne do kritičnih točaka, to jest dlijeta, pete posljednje ugrađene kolone zaštitnih cijevi i sapnice;

6. dijagram koji prikazuje odnos tlaka cirkulacije odnosno tlaka na bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$) i broja hodova.

Sljedeći je korak pripemanje isplake za gušenje u isplačnim bazenima te se nakon toga može započeti s njenim utiskivanjem i gušenjem bušotine.

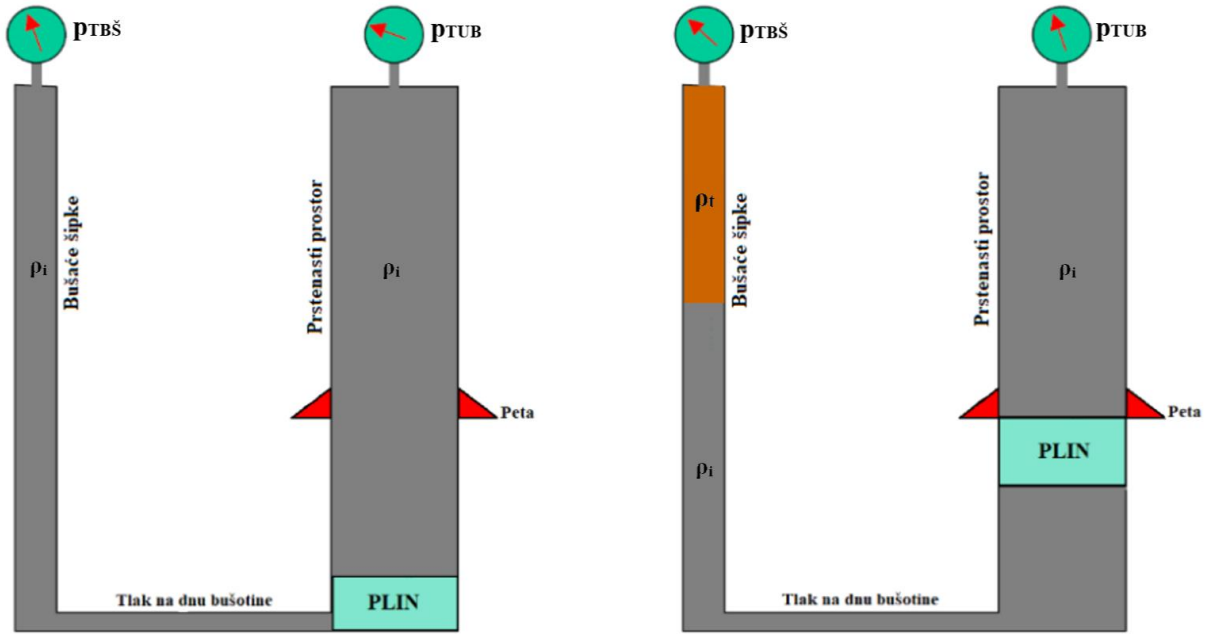
Trend razvoja tlaka u bušotini tijekom izvođenja inženjerske metode gušenja može se zaključiti na osnovu položaja kazaljki na manometrima (očitanjima) koji prikazuju tlak na bušaćim šipkama ($p_{TBŠ}$) i tlak na ušću bušotine (p_{TUB}) na slikama odSlika **3-2.** doSlika 3-5. Isti će također biti pojašnjen u tekstu i na grafu koji prikazuje odnos broja hodova (vremena) i tlaka na bušaćim šipkama i na ušću.

Na početku je potrebno nadvladati tlak na šipkama ($p_{TBŠZ}$) te tlak nužan za cirkulaciju otežane isplake smanjenim brojem hodova p_{TCS}. Početno stanje, nakon zatvranja bušotine prikazano je na slici 3-1., tlak na bušaćim šipkama u zatvorenoj bušotini ($p_{TBŠZ}$) manji je od tlaka na ušću bušotine ($p_{TBŠZ}$) u istim uvjetima zbog plina u prstenastom prostoru. Zbrajanjem $p_{TBŠZ}$ i p_{TCS} dobiva se početni cirkulacijski tlak (p_{TCP}) kojeg se na početku cirkulacije uspostavlja na bušaćim šipkama. Nakon što je otežana isplaka pripremljena i ispunjen list za ugušivanje otvori se sapnica i započne cirkulacija isplačnom sisaljkom. Dok se isplačnoj sisaljki povećava broj hodova do potrebnog broja hodova, operator na sapnici mora se truditi održavati tlak na ušću u prstenastom prostoru ($p_{TUB)}$ jednakim početnom očitanju tlaka na ušću (p_{TUBZ}). Kada se postigne smanjeni broj hodova sisaljke operator na sapnici mora pratiti razvoj tlaka na bušaćim šipkama ($p_{TBŠ}$) koji se regulira putem sapnice da bi se održavao na prethodno proračunatom razvoju tlaka od početnog cirkulacijskog tlaka do konačnog cirkulacijskog tlaka.



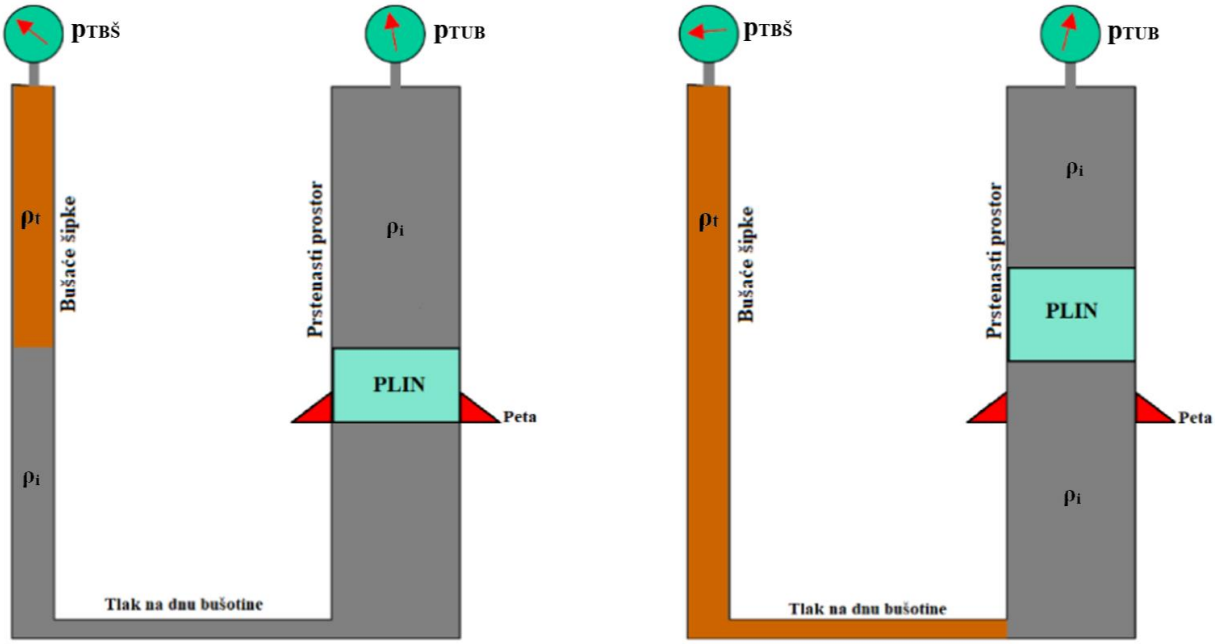
Slika 3-1. Prikaz početnog stanja u bušotini nakon zatvaranja bušotine (prilagođeno prema Maersk Training Centre A/S)

Na slici 3-2. (desno) prikazana je jedna od kritičnih situacija i bušotini, kada vrh stupca plina dosegne petu prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi.



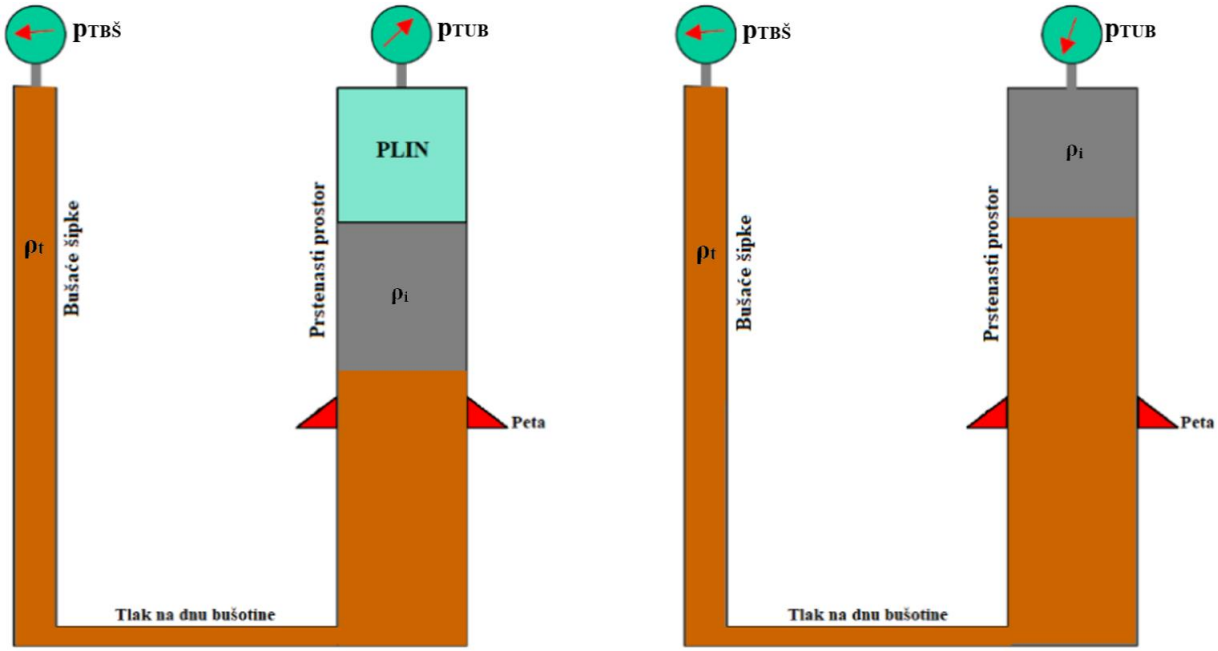
Slika 3-2. Prikaz stanja u bušotini pri početku cirkulacije u bušotinu (lijevo) i prikaz trenutka kada se vrh stupca plina protiskuje do pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi (desno) (Maersk Training Centre A/S)

Ukupni tlak koji je potrebno nadvladati se polagano smanjuje kako otežana isplaka napreduje prema dlijetu kao što se može vidjeti na kazaljkama manometara na slikama 3-2. i 3-3.



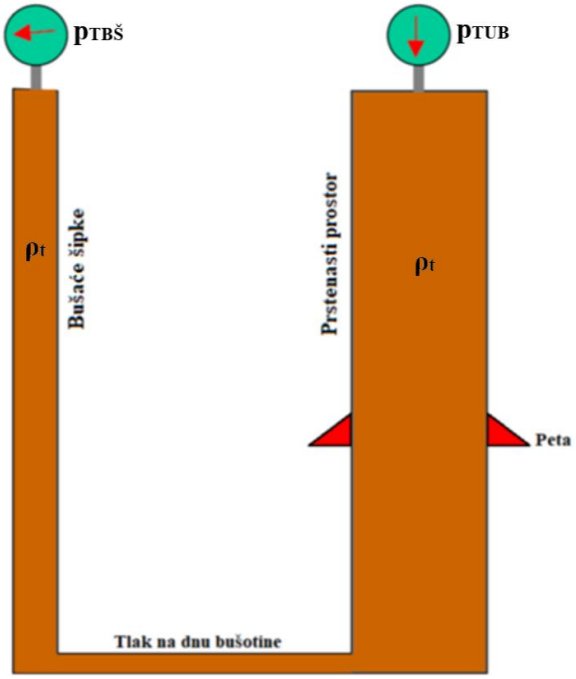
Slika 3-3. Prikaz stanja u bušotini tijekom izvođenja inženjerske metode i protiskivanja plina prema ušću (Maersk Training Centre A/S)

U trenutku kada otežana isplaka dođe do dlijeta tlak na manometru na bušaćim šipkama je jednak tlaku koji je potreban samo za cirkulaciju otežane isplake bušotinom to jest konačnom cirkulacijskom tlaku (p_{TCK}). Upravo je taj konačni cirkulacijski tlak potrebno održavati konstantim do kraja provođenja inženjerske metode gušenja bušotine. Napredovanjem otežane isplake prstenastim prostorom tlak na ušću (p_{TUB}) se povećava kako se plin približava ušću. Na slici 3-4. (lijevo) prikazana je još jedna kritična faza u gušenju bušotine, kada vrh stupca plina dosegne ušće bušotine. Tada se na ušću bušotine može očitati najveći tlak. Nakon što se plin iscirkulira tlak na ušću naglo pada ali bušotina u tom trenutku još nije ugušena budući da je dio isplake za bušenje još uvijek u prstenastom prostoru kao što je prikazano na slici 3-5. (desno).



Slika 3-4. Prikaz stanja u bušotini tijekom izvođenja inženjerske metode kada plin doseže ušće (lijevo) i prikaz trenutka kada je sav plin iscirkuliran izvan bušotine (desno) (Maersk Training Centre A/S)

Na slici 3-5. očitanje tlaka na manometru na bušaćim šipkama je posljedica rada isplačne sisaljke (cirkulacijski tlak isplačne sisaljke), bušotina je ugušena inženjerskom metodom budući da je sav plin protisnut iz bušotine i isplaka u bušotini je dovoljne gustoće da hidrostatskim tlakom nadvlada slojni tlak. Nakon prestanka cirkulacije i zatvaranja bušotine tlakovi na šipkama i ušću bušotine moraju biti jednaki nuli.



Slika 3-5. Krajnja faza gušenja primjenom inženjerske metode kada hidrostatski tlak otežane isplake nadvlada slojni tlaka (*Maersk Training Centre A/S*)

3.1.1 Prednosti i nedostaci inženjerske metode

Inženjerska metoda gušenja bušotine ima niz prednosti i nedostataka u usporedbi s drugim metodama gušenja

Prednosti u odnosu na ostale metode su:

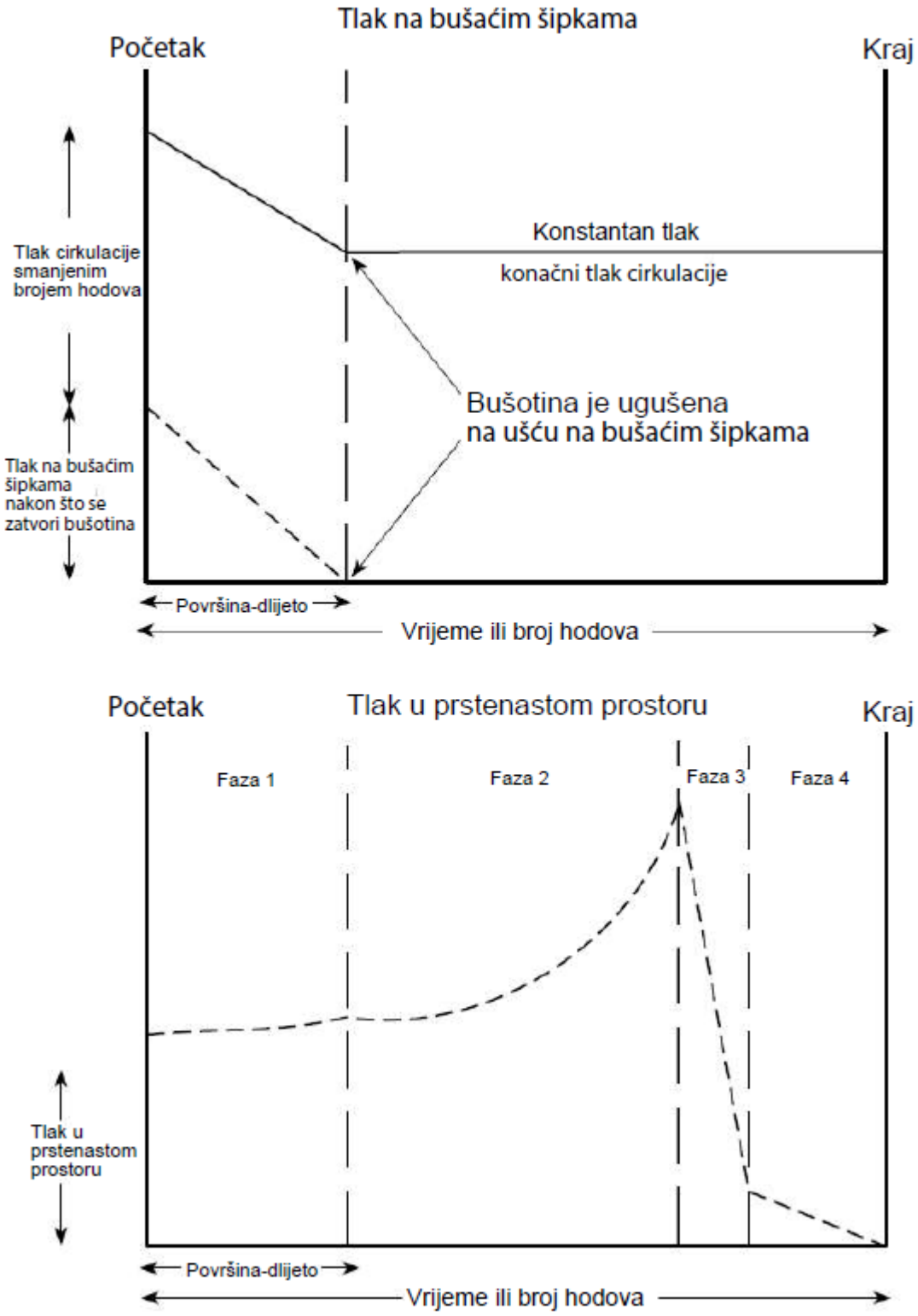
1. najmanji tlak na ušću,
2. najmanji tlak na razini pete kolone,
3. najmanji gubici isplake,
4. najkraće vrijeme obavljanja, samim time najmanje trošenje sapnice.

Nedostaci u odnosu na ostale metode su:

1. najduže vrijeme bez cirkulacije dok se priprema otežana isplaka,
2. za to vrijeme može doći do prihvata alata u bušotini budući da nema cirkulacije,
3. malo složeniji proračun.

4. teško provođenje ugušivanja ravnomjerno u jednom ciklusu u slučaju potrebe za velikim povećanjem gustoće isplake (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001., Maersk Training Centre A/S).

Na slici 3-6. (gornja slika) prikazan je razvoj tlaka na bušaćim šipkama tijekom provođenja inženjerske metode gušenja bušotina, koji je također i prethodno opisan.
Faze 1-4 na slici 3-6. (donja slika) podrazumijevaju razvoj tlaka na ušću kada se otežana isplaka protisne do dlijeta, kad vrh stupca plina dosegne ušće, kad se stupac plina iscirkulira iz bušotine te konačno kada se isplaka početne gustoće iscirkulira iz bušotine.



Slika 3-6. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom provođenja inženjerske metode gušenja bušotine (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.)

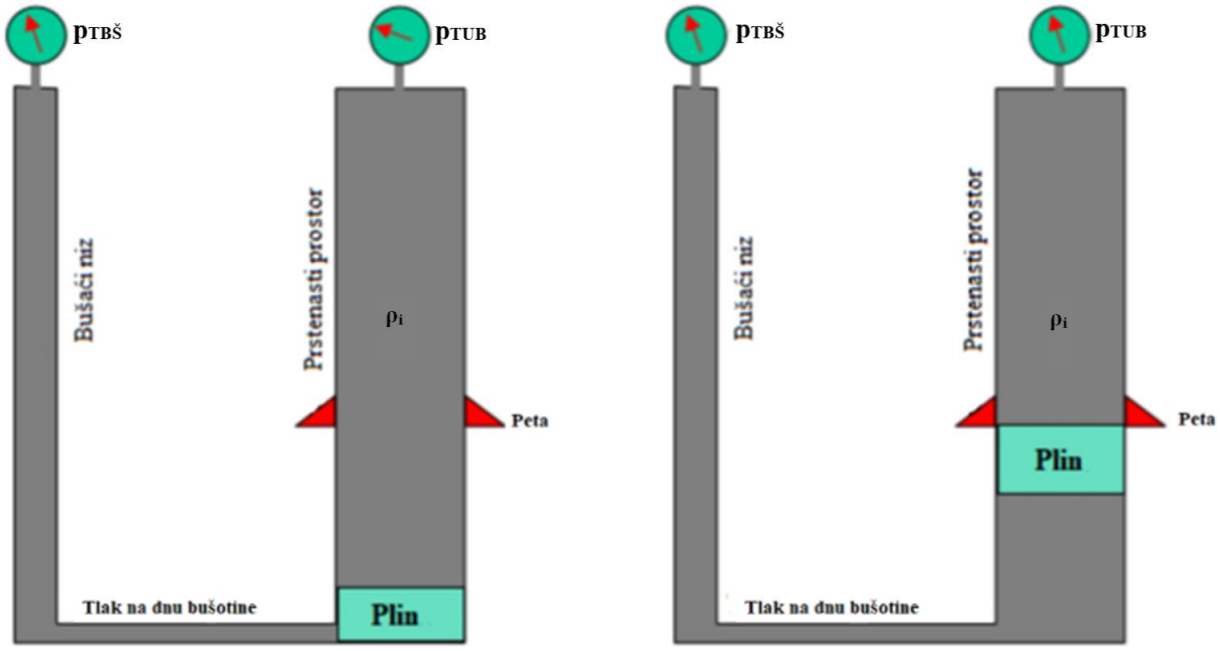
3.2 Bušaća metoda gušenja bušotine

Bušaća metoda (*engl. drillers method*) gušenja bušotine je najjednostavnija metoda za provođenje i proračunavanje. U ovoj se metodi bušotina ugušuje kroz dvije faze. U prvoj cirkulaciji se dotok istiskuje, dok se u drugoj protiskuje otežana isplaka u bušotinu kako bi se ponovno ostvarila primarna kontrola tlaka u bušotini. Međutim, rezultat dviju cirkulacija je duže vrijeme provođenja ove metode gušenja u odnosu na ostale metode provođenja što povećava mogućnost problema sa sapnicom. Također, tlak na ušću je često veći tijekom prve cirkulacije nego u bilo kojoj fazi drugih metoda, zahvaljujući tome što se odmah ne utiskuje otežana isplaka.

Jednostavnost bušaće metode gušenja bušotine čini ju poželjnom pri baratanju ograničenom količinom informacija o očekivanim uvjetima (Maersk Drilling Services A/S).
Proračun koji je već spomenut u inženjerskoj metodi također je potrebno obaviti prije druge cirkulacije bušaće metode (Noble Drilling Services, 2012).

3.2.1 Prva cirkulacija kod primjene bušaće metode

Čim se primjeti dotok u bušotini potrebno je napraviti kontrolu protoka (*engl. flow check*) te nakon toga zatvoriti bušotinu i nakon kratkog perioda potrebnog za stabiliziranje tlakova očitati tlak na šipkama na ušću bušotine te tlak u prstenastom prostoru na ušću bušotine. Tlak na ušću u prstenastom prostoru (p_{TUBZ}) je veći od tlaka u bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$) na ušću, a razlog je dotekli plin koji istiskuje dio isplake iz prstenastog prostora bušotine i na taj način, zbog manje gustoće doteklog fluida, smanjuje hidrostatski tlak na dno, što uzrokuje povećanje tlaka na ušću zatvorene bušotine. Tlak na dnu bušotine je jednak zbroju hidrostatskog tlaka i tlaka na bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$). Na daljnjim slikama na manometrima su prikazana stanja tlakova temeljem kojih se može zaključiti trend kretanja tlaka za vrijeme provođenja gušenja primjenom bušaće metode. Slika 3-7. lijevo prikazuje stanje nakon zatvaranja bušotine zbog dotoka plina te početak cirkulacije uz tlak (p_{TCP}).



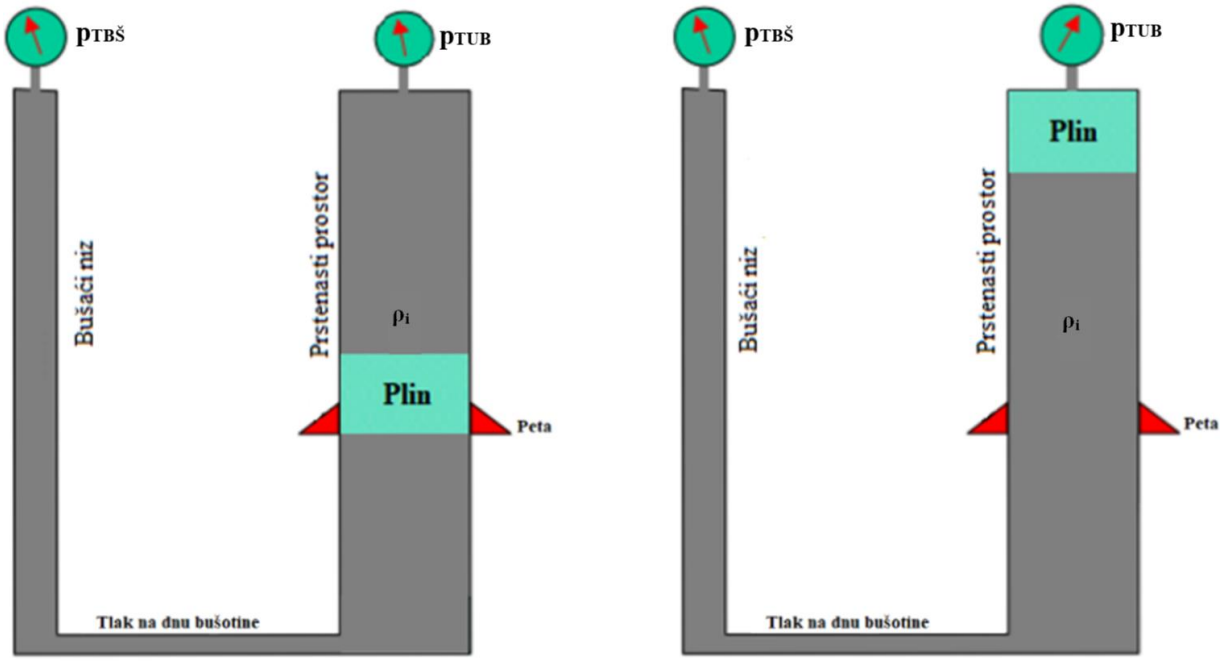
Slika 3-7. Prikaz stanja u bušotini pri početku protiskivanja plina iz bušotine (lijevo) i prikaz trenutka kad vrh stupca plina migrira do pete kolone zaštitnih cijevi (desno) (Maersk Training Centre A/S)

Započinje prva cirkulacija na način da se djelomično otvori sapnica i istovremeno pokrene isplačna sisaljka polagano povećavajući broj hodova do dobave za gušenje (*engl. kill rate*) to jest smanjenog broja hodova kojim se ostvaruje početni cirkulacijski tlak. U tom periodu operator sapnice mora održavati tlak na ušću otprilike na početnoj vrijednosti. Kada se sisaljka dovede do željenog broj hodova postiže se početni cirkulacijski tlak (p_{TCP}) na bušaćim šipkama na ušću te se nadalje taj tlak održava konstantnim. Početni cirkulacijski tlak se održava stalnim manipuliranjem sapnicom, broj hodova isplačne sisaljke također je potrebno održavati konstantanim dok se sav dotekli plin ne iscirkulira izvan bušotine (Aberdeen Drilling Schools & Well Control Training Centre, 2002).

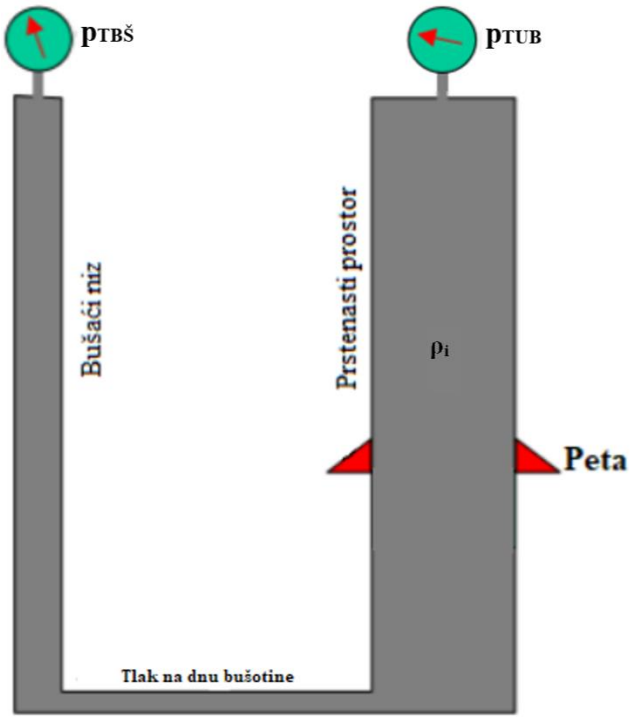
Plin se protiskuje prema ušću unutar prstenastog prostora i ekspandira te se na taj način smanjuje tlak doteklog plina (Maersk Training Centre A/S). Na desnoj strani slike 3-7. prikazan je trenutak kada plin dosegne petu kolone, to jest kritična točka, u procesu izbacivanja dotoka što će biti detaljno pojašnjeno u daljnjem tekstu ovog diplomskog rada.

Nakon što se dotok iscirkulira potrebno je zatvoriti bušotinu. Tijekom provođenja prve crikulacije priprema se otežana isplaka za gušenje (*engl. kill mud*). Na slici 3-8. prikazano je

daljnje protiskivanje plina prema ušću prstenastog prostora. Može se primjetiti porast tlaka na ušću prstenatog prostora kako se plin kreće prema površini. Prema tome, najveći tlak na ušću bušotine može se očekivati kad vrh plinskog stupca dosegne ušće bušotine kao što je prikazano na slici 3-8. desno. Nakon što se sav plin iscirkulira izvan bušotine tlak na ušću bušotine unutar zaštitnih cijevi (p_{TUBZ}) se naglo smanjuje kao što je vidljivo na slici 3-9. Krajnje stanje u bušotini u prvoj cirkulaciji je također početno stanje druge cirkulacije.



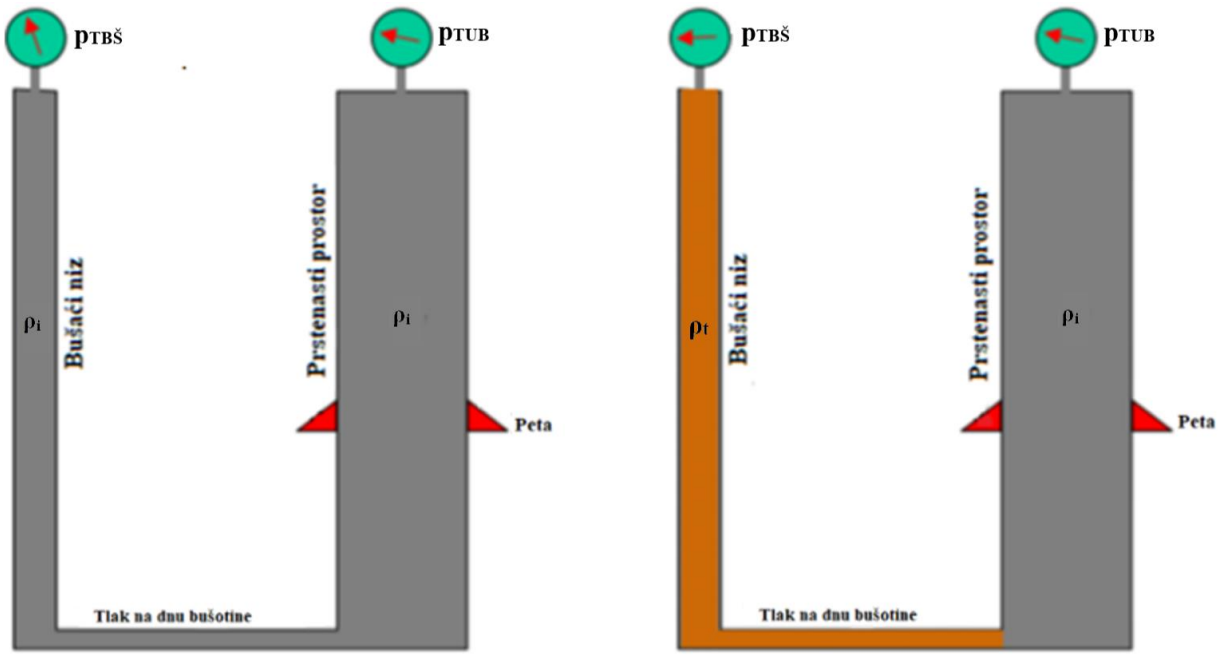
Slika 3-8. Prikaz stanja u bušotini tijekom cirkulacije plina prvom cirkulacijom kod primjene bušaće metode (Maersk Training Centre A/S)



Slika 3-9. Prikaz stanja u bušotini nakon prve cirkulacije kod primjene bušaće metode (Maersk Training Centre A/S)

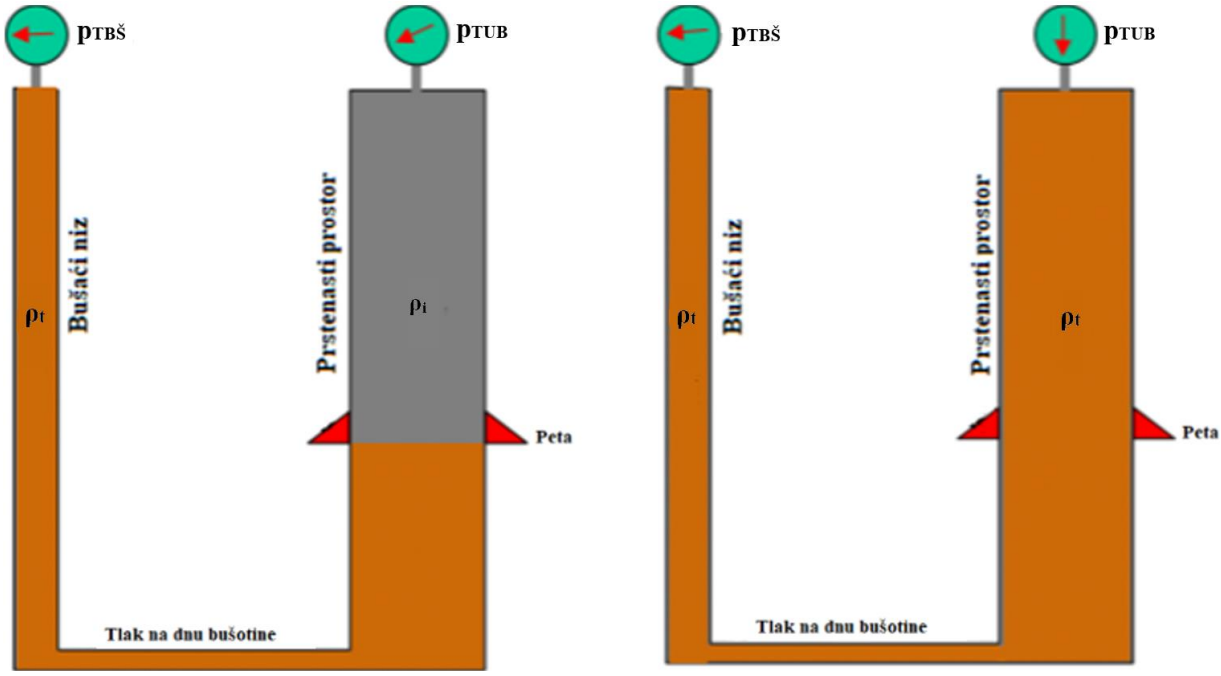
3.2.2 Druga cirkulacija kod primjene bušaće metode

Nakon što je isplaka za gušenje pripremljena, potrebno je djelomično otvoriti sapnicu te u isto vrijeme pokrenuti isplačnu sisaljku te polagano povećavati broj hodova do smanjenog broja hodova potrebnih za gušenje. Kao i u prvoj cirkulaciji, u ovom periodu, operator na sapnici bi trebao održavati tlak na ušću konstantnim to jest na vrijednosti tlaka na ušću zatvorene bušotine koji bi trebao korespondirati tlaku na šipkama ukoliko je sav dotok izbačen iz bušotine. Potrebno je nastaviti održavati tlak na ušću unutar zaštitnih cijevi (p_{TUB}) konstantim do dostizanja smanjenog broja hodova isplačne sisaljke kako bi se održao tlak na dnu bušotine konstantnim.



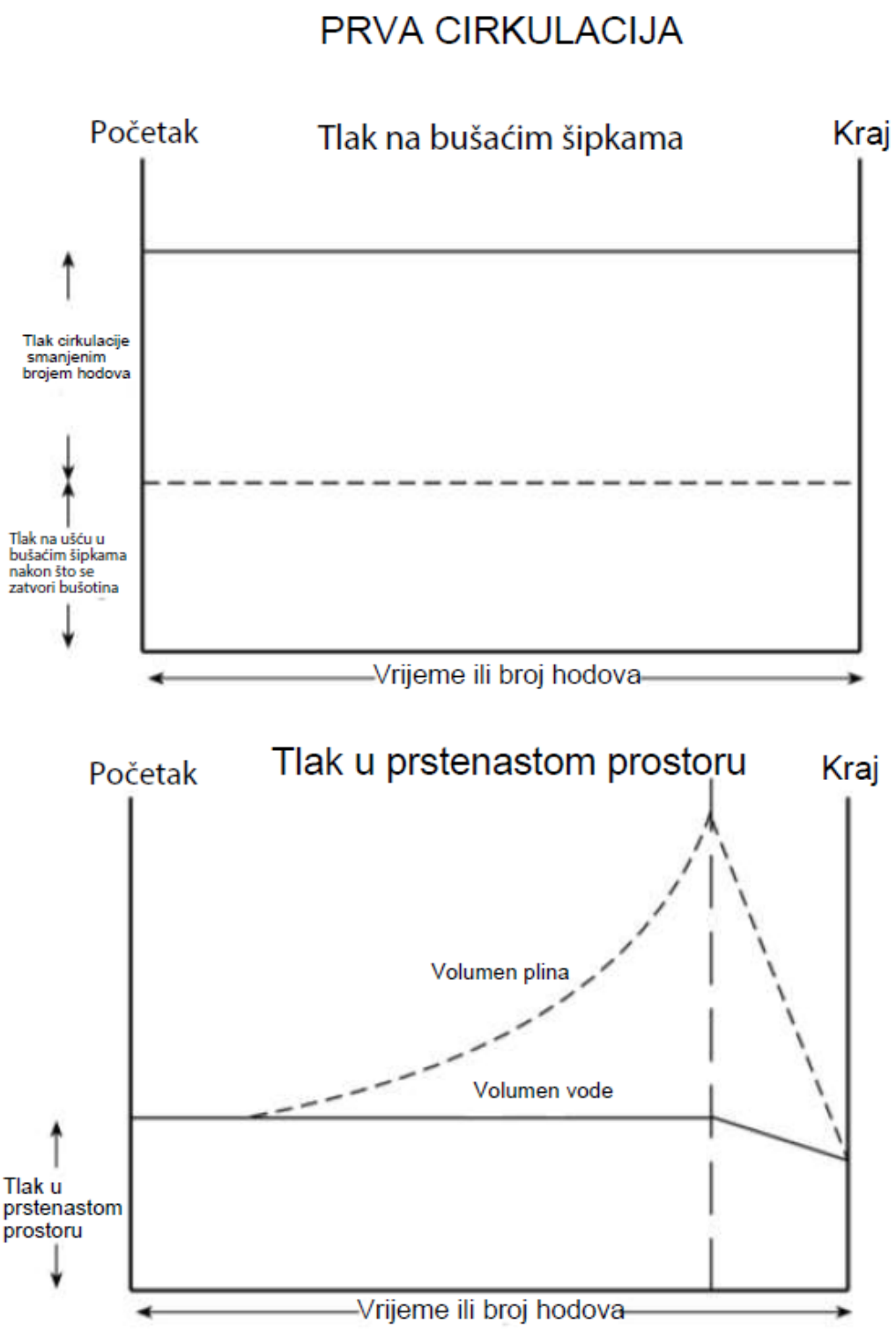
Slika 3-10. Prikaz početnog stanja u bušotini za vrijeme druge cirkulacije bušaće metode (lijevo) te prikaz utiskivanja isplake za gušenje (desno) (Maersk Training Centre A/S).

Utiskivanjem otežane isplake smanjuje se tlak unutar bušaćih šipki na ušću bušotine s početnog cirkulacijskog tlaka (p_{TCP}) do krajnjeg cirkulacijskog tlaka (p_{TCK}). Hidrostatski tlak stupca otežane isplake nadvladava slojni tlak, sve do trenutka kada otežana isplaka dođe do dlijeta i u potpunosti nadvlada slojni tlak kao što je prikazano na slici 3-10. desno. U tom trenutku potrebno je tlak na bušaćim šipkama ($p_{TBŠZ}$) održavati konstantim to jest jednakim konačnom cirkulacijskom tlaku (p_{TCK}). Na slici 3-11. lijevo prikazan je daljnji napredak otežane isplake kroz prstenasti prostor bušotine tijekom druge cirkulacije te posljedično smanjenje tlaka na bušaćim šipkama (p_{TUB}). Na slici 3-11. desno prikazana je bušotina u kojoj je tlak na bušaćim šipkama ($p_{TBŠ}$) jednak konačnom cirkulacijskom tlaku, a tlak unutar zaštitnih cijevi na ušću (p_{TUBZ}) jednak je nuli što znači da je bušotina ugušena. Budući da postoji mogućnost da tijekom prve cirkulacije nije iscirkuliran sav plin iz bušotine, u sklopu radnog lista za ugušivanje, treba izraditi graf ovisnosti $p_{TBŠ}$ o broju hodova isplačne sisaljke. Na taj način bi se pomoću praćenja $p_{TBŠ}$ moglo izbjeći pogreške nastale zbog malih mjehura plina u prstenastom prostoru koji mogu uzrokovati pogrešne informacije pri registriranju p_{TUB} (Aberdeen Drilling Schools & Well Control Training Centre, 2002.).

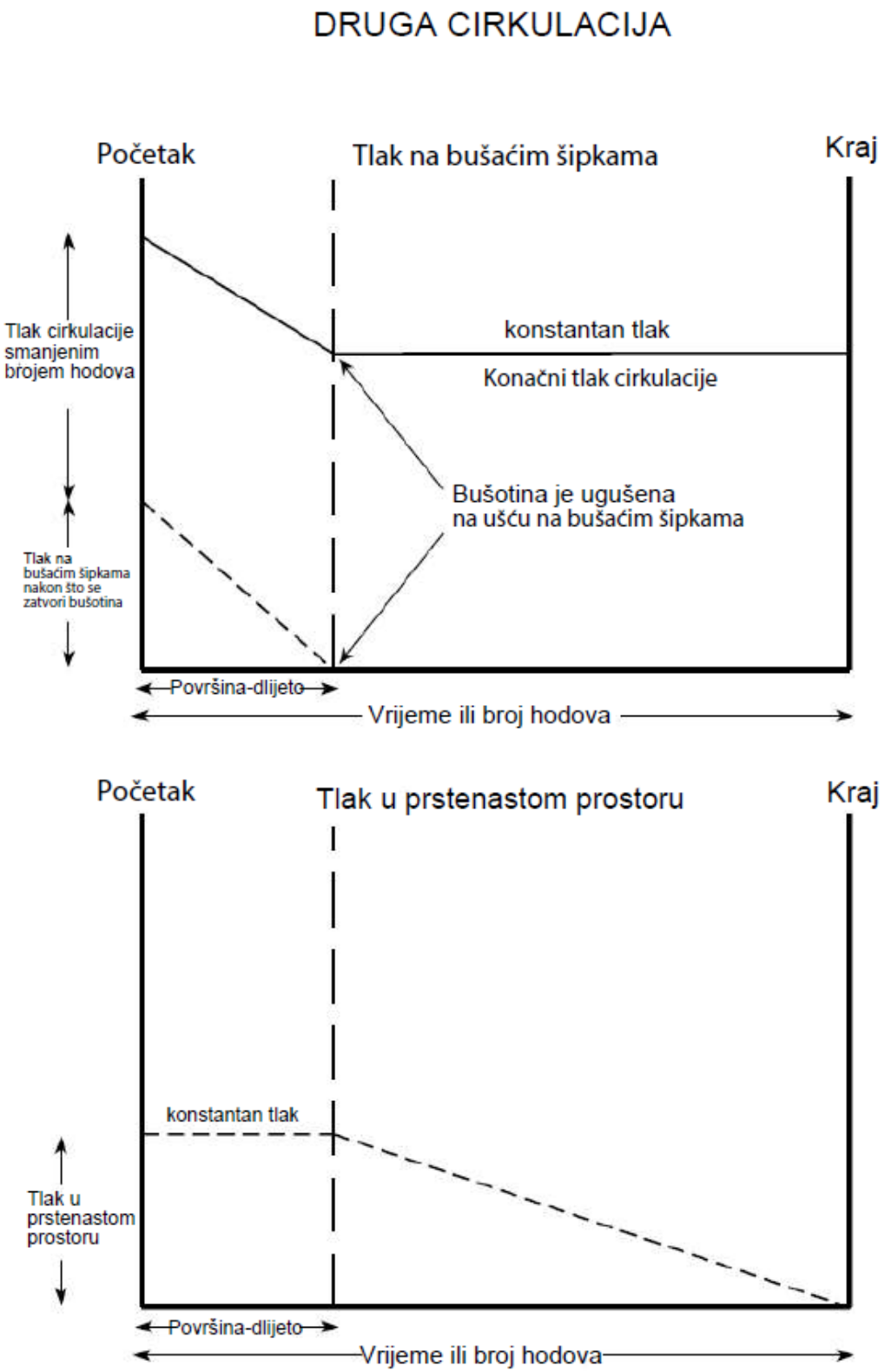


Slika 3-11. Prikaz stanja u bušotini tijekom druge cirkulacije (lijevo) te prikaz krajnje faze gušenja (desno) (Maersk Training Centre A/S)

Temeljem praćenja očitavanja na manometrima na prethodnim slikama može se zaključiti trend kretanja tlakova u bušotini tijekom prve i druge cirkulacije kod primjene bušaće metode, kao što je prethodno opisano. Trend kretanja tlaka prikazan na slikama 3-12 i 3-13. to dodatno potvrđuje. Donji graf na slici 3-12. prikazuje razvoj tlaka na ušću za slučajeve iscirkuliravanja dotoka plina i dotoka slojne vode (Maersk Training Centre A/S).



Slika 3-12. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom prve cirkulacije (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.)



Slika 3-13. Prikaz razvoja tlakova u bušotini tijekom druge cirkulacije (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.)

3.2.3 Prednosti i nedostaci primjene bušaće metode gušenja bušotine

Bušaća metoda gušenja bušotine ima niz prednosti i nedostataka u usporedbi s drugim metodama gušenja.

Prednosti u odnosu na ostale metode su (Maersk Training Centre A/S), (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.):

- najjednostavnija za primjenu,
- najjednostavniji proračun,
- u slučaju zagađenja slanom vodom, najbrže iznošenje zagađenja te sprječavanje taloženja pijeska oko bušaćeg alata,
- msnja mogućnost za migracije plina i efekata koja ista uzrokuje.

Nedostaci u odnosu na ostale metode su (Maersk Training Centre A/S), (Aberdeen Drilling School & Well Control Training Center, 2001.):

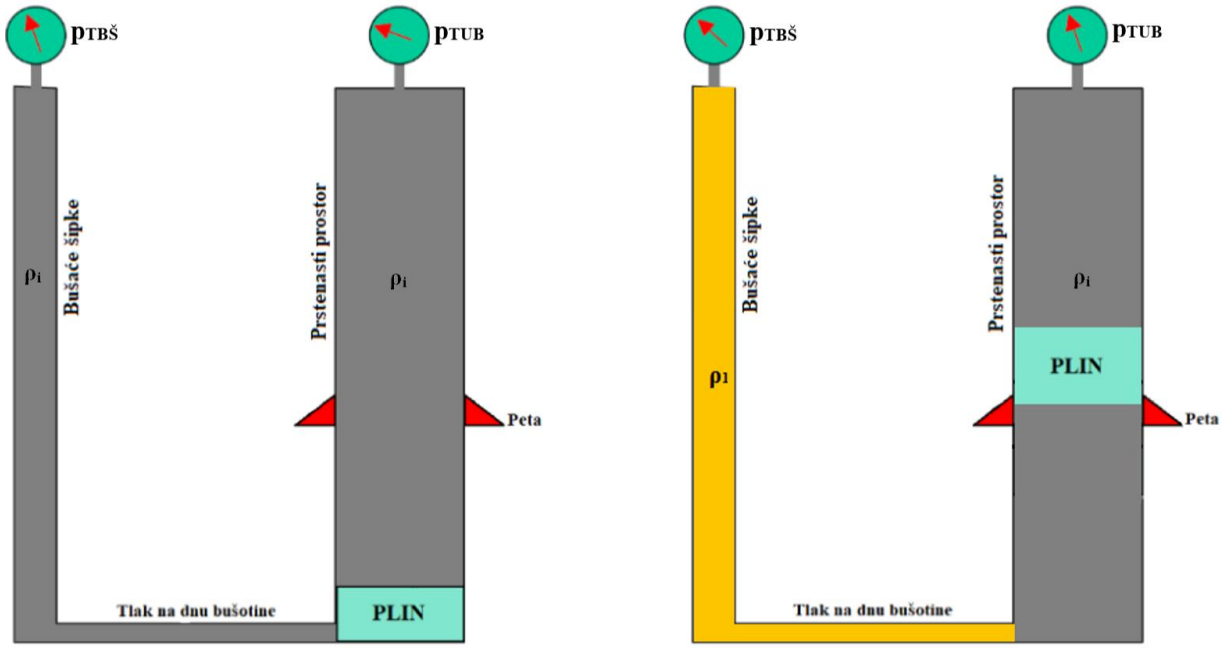
1. u slučaju da je veći volumen otvorenog dijela kanala od volumena unutar bušaćeg niza razvijaju se veći tlakovi na razini pete kolone;
2. razvijaju se veći tlakovi na ušću u prstenstom prostoru u odosu na druge dvije metode;
3. zahtjeva dvije cirkulacije, samim time i više vremena.

3.3 Istodobna metoda gušenja bušotine

Istodobna metoda (*engl. concurrent method*) gušenja bušotine je najkompliciranija za proračunavanje i najrjeđe korištena od navedenih metoda gušenja bušotine. U ovoj metodi gustoću isplake se povećava postepeno tijekom cirkulacije. Istodobna metoda gušenja bušotine je prema karakteristikama provedbe između bušaće i inženjerske metode. Sličnost istodobne i bušaće metode je to što se gušenju bušotine pristupa odmah nakon zatvaranja bušotine i stabilizacije tlakova, a sličnost istodobne i inženjerske metode je u tome da se dotok ne istiskuje postojećom isplakom, već se postepeno otežava isplaka prilikom samog istiskivanja dotoka u jednoj cirkulaciji. Gušenje je gotovo u onom trenutku kada se zadnji obrok otežane isplake, onaj koji je potreban za gušenje bušotine to jest obrok najveće gustoće, pojavi na površini. Za istodobnu metodu, u odnosu na inženjersku metodu, potreban je veći broj hodova isplačne sisaljke za uspješno gušenje bušotine. Volumen isplačnih bazena za pripremu otežane isplake je bitan faktor koji može utjecati na

smanjenje broja potrebnih koraka promjena gustoće u istodobnoj metodi gušenja. Glavna prednost istodobne metode nad inženjerskom je što se može započeti s cirkulacijom odmah nakon stabilizacije tlakova nakon zatvaranja bušotine, što ju čini primjenjivom u slučaju da u isplačnim bazenima postoji otežana isplaka, ali ne dovoljno otežana za gušenje (Goins i Sheffield, 1983; Grace, 2003).

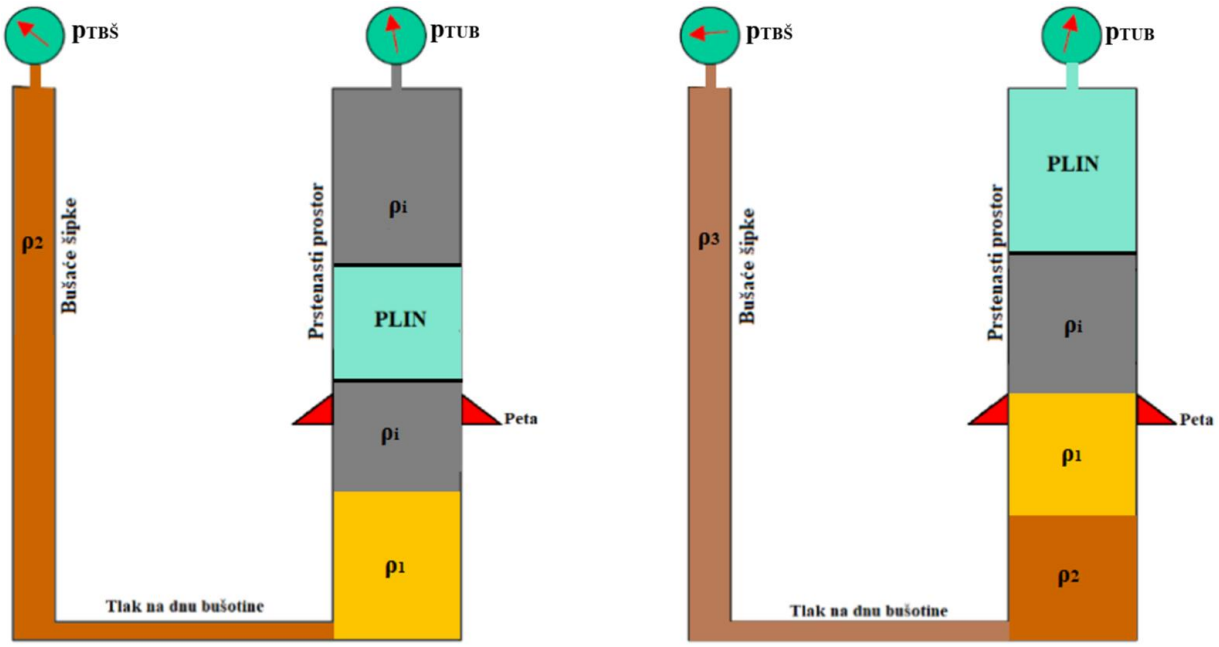
Početni dio procedure gušenja istodobne metode gušenja bušotine je isti kao i kod ostalih metoda odnosno potrebno je zatvoriti bušotinu, očitati tlak na šipkama te ispuniti list za ugušivanje bušotine. Dok se priprema isplaka početne gustoće (ρ_1), ukoliko nije prethodno pripremljena, započinje se s cirkulacijom kao i kod bušaće metode. Potrebno je djelomično otvoriti sapnicu te započeti cirkulaciju dok se ne postigne smanjeni broj hodova isplačne sisaljke uz istovremeno održavanje tlaka na ušću konstantnim. Kada se pripremi isplaka prve gustoće (ρ_1), koja nije dovoljne gustoće za gušenje, nastavlja se utiskivanjem iste uz praćenje prethodno izračunatog razvoja tlaka na šipkama i održavanjem istog pomoću sapnice na proračunatim vrijednostima kako bi tlak na dnu bio konstantan. Takav slučaj je prikazan na slici 3-14.



Slika 3-14. Početak cirkulacije isplakom za bušenje (lijevo) i već utisnut obrok isplake gustoće ρ_1 (desno) tijekom provođenja istodobne metode gušenja (prilagođeno prema Erceg, 2017)

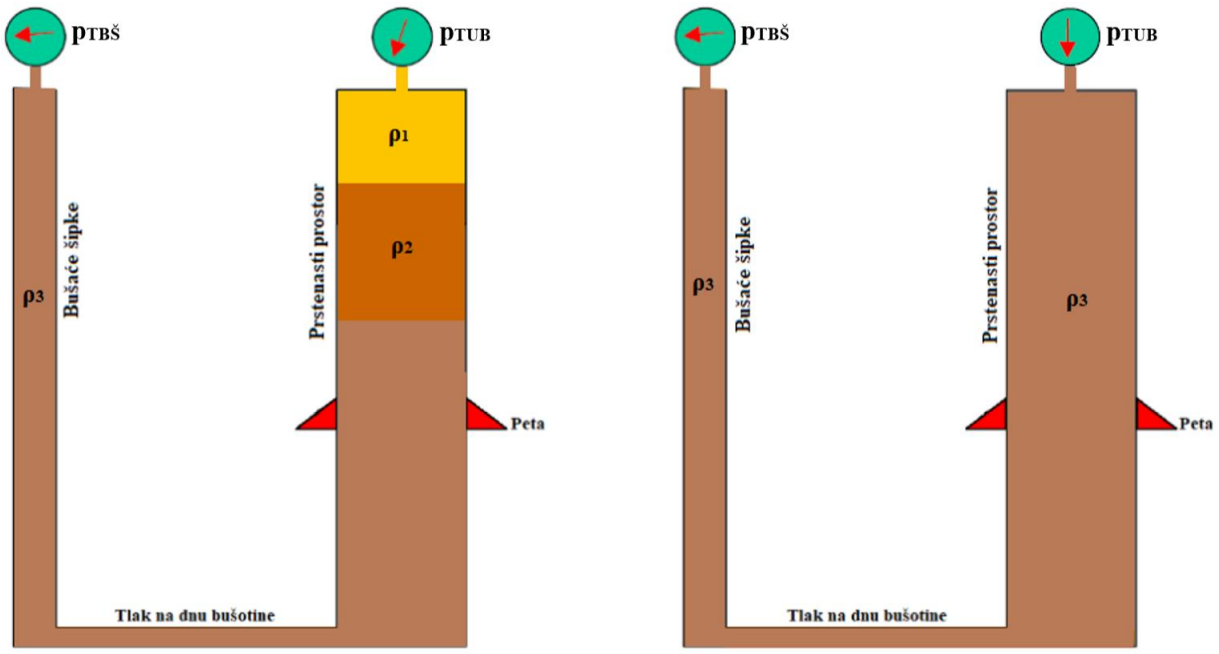
Kada se pripremi isplaka gustoće (ρ_2) nastavlja se s utiskivanjem iste. Tlak na ušću u tom periodu može rasti ili padati ovisno o tome koji utjecaj dominira, utjecaj utiskivanja otežane

isplake ili ekspanzije plina u bušotini. Međutim u jednom trenutku će tlak početi rasti dok plin ne dosegne ušće bušotine, u tom trenutku, u svim metodama tlak na ušću doseže svoj maksimum. U svakom slučaju, potrebno je pratiti razvoj tlaka na šipkama te prema prethodno obavljenom proračunu upravljati sapnicom. Istom procedurom se nastavlja i kada se pripremi isplaka za gušenje, u ovom slučaju (ρ_3) kao što je prikazano na slici 3-15.



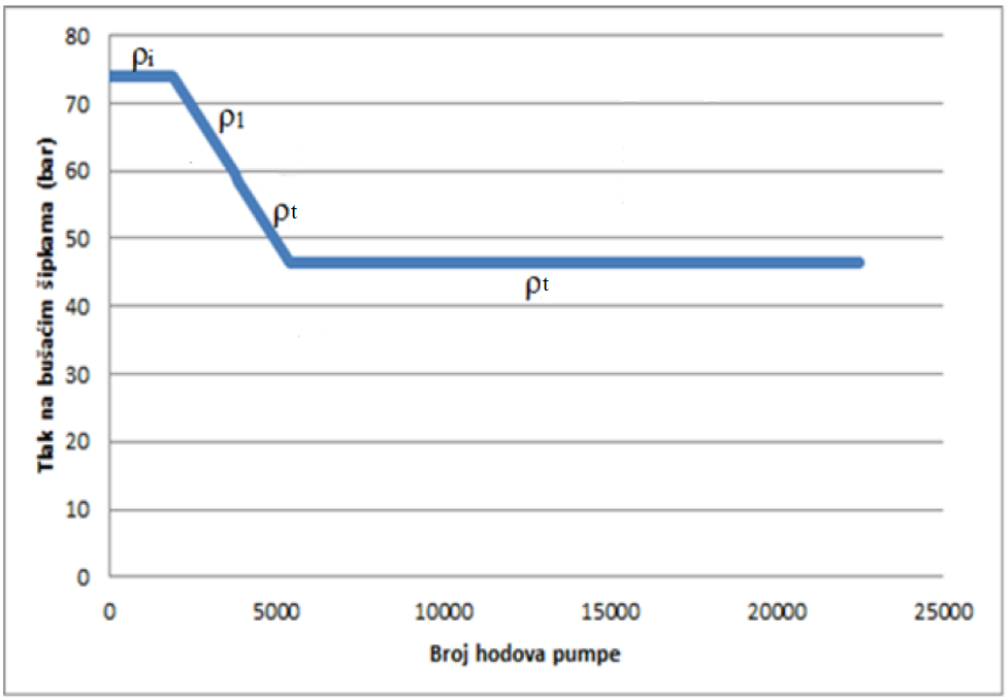
Slika 3-15. Prikaz slučaja s tri različite gustoće isplake u bušotini (lijevo) i s četiri različite gustoće isplake u bušotini (desno) tijekom primjene istodobne metode gušenja (prilagođeno prema Erceg, 2017)

Nužno je spomenuti da tokom izvođenja ove metode operator na sapnici mora imati na umu korekcije koje su posljedica povećanja gustoće isplake. 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). Tlak se na bušaćim šipkama smanjuje kako isplaku manje gustoće zamjenjuje isplaka za gušenje do trenutka kada isplaka za gušenje dosegne dlijeto, u tom trenutku postignut je konačni cirkulacijski tlak. Kako se isplaku za gušenje nastavlja utiskivati u bušotinu, nakon što je plin iscirkuliran izvan, tako tlak na ušću pada kako je i prikazano na slici 3-16.

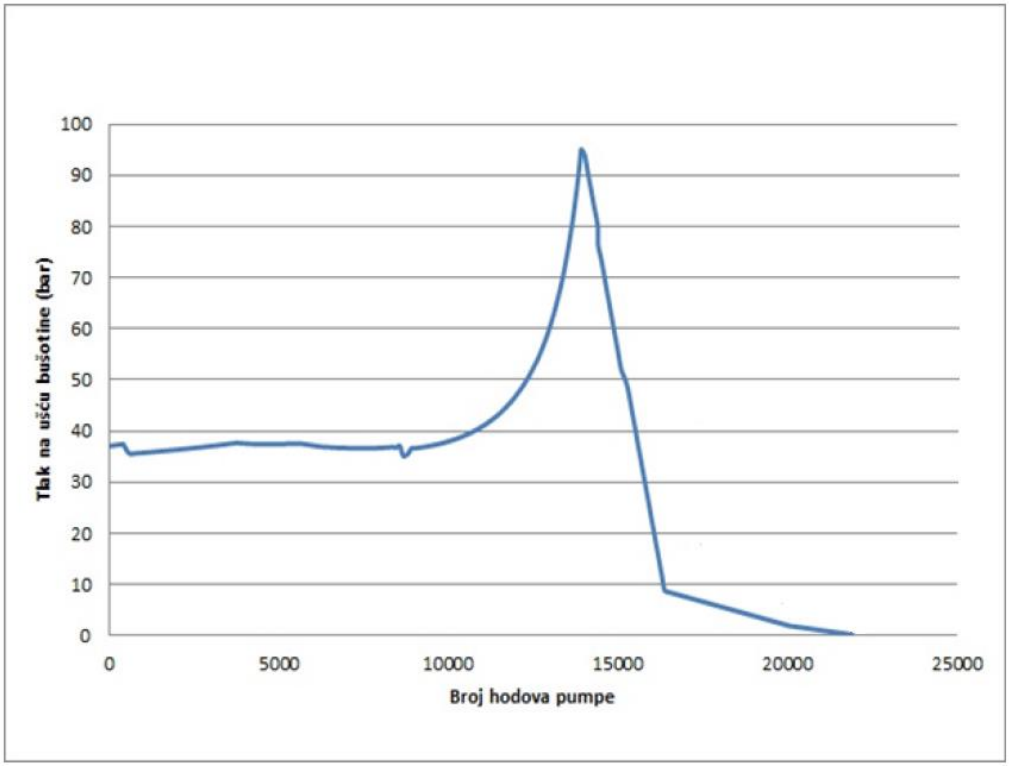


Slika 3-16. Isplaka za gušenje istiskuje isplake manjih gustoća (lijevo) te bušotina ugušena istodobnom metodom (desno) (prilagođeno prema Erceg, 2017)

Na slikama 3-17. i 3-18. prikazan je razvoj tlaka na ušću bušotine te na bušaćim šipkama. Može se primjetiti sličnost u razvoju tlakova između inženjerske metode i istodobne metode gušenja bušotine.



Slika 3-17. Razvoj tlaka na šipkama primjenom istodobne metode gušenja bušotine (Erceg, 2017)



Slika 3-18. Razvoj tlaka na ušću primjenom istodobne metode gušenja bušotine (Erceg, 2017)

3.3.1 Prednosti i nedostaci primjene istodobne metode gušenja bušotine

Istodobna metoda gušenja bušotine ima niz prednosti i nedostataka u usporedbi s drugim metodama gušenja.

Prednosti u odnosu na ostale metode (Maersk Training Centre A/S):

1. minimalno vrijeme do početka cirkulacije dotoka,
2. izvrsna u slučaju potrebe za velikim povećanjem gustoće (bušenje u uvjetima podtlaka),
3. viskoznost i sposobnost geliranja mogu se lakše održavati isplakama različite gustoće,
4. razvijaju se manji tlakovi na ušću nego tijekom bušaće metode,
5. jednostavno se može prebaciti na inženjersku metodu u slučaju potrebe.

Nedostaci u odnosu na ostale metode (Maersk Training Centre A/S):

1. zahtjeva duže upravljanje sapnicom,
2. proračun je puno kompleksniji,
3. javljaju se veći tlakovi na ušću te na razini pete kolone nego primjenom inženjerske metode.

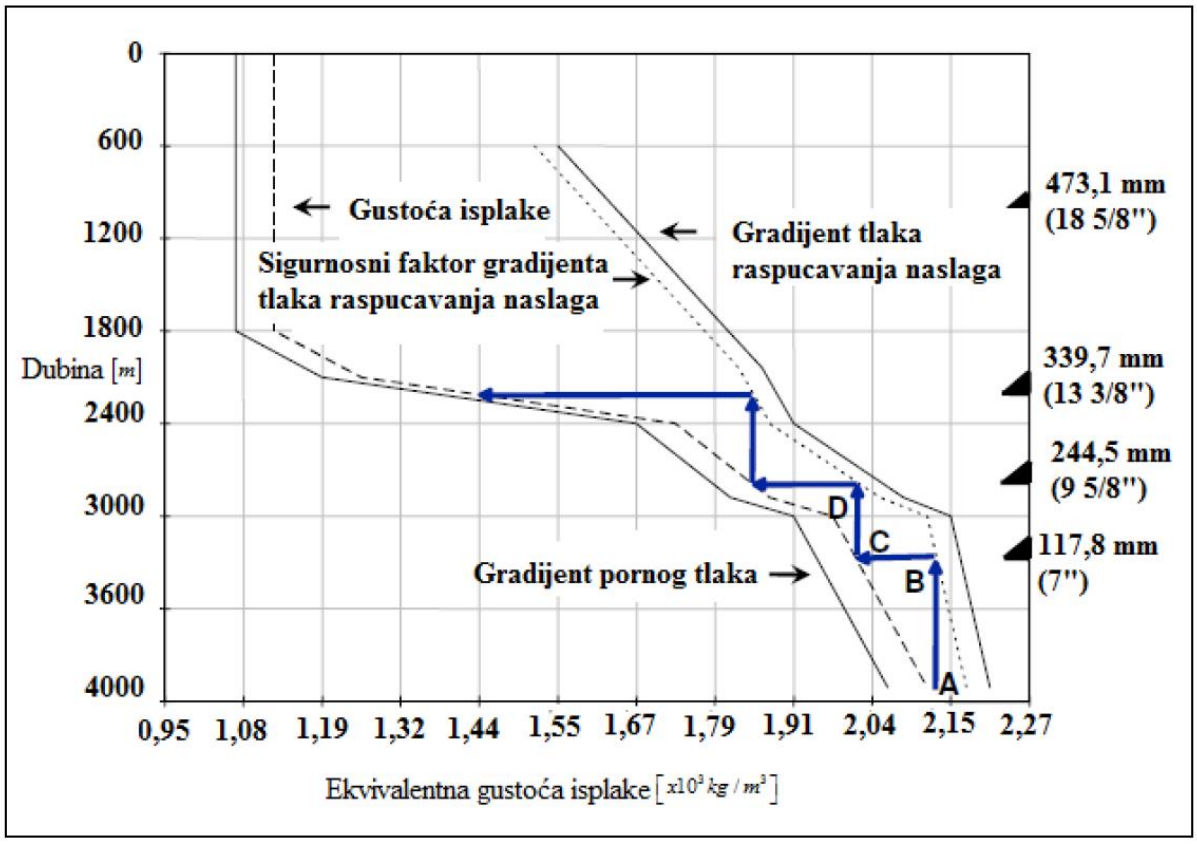
4. TOLERANCIJA DOTOKA

U praksi bušenja ne koristi se određeni standard kad je u pitanju tolerancija dotoka, iako se radi o kritičnom i temeljnom konceptu vezanom uz bušenje i kontrolu tlaka u bušotini. Također, pojam tolerancije dotoka često je premalo korišten i shvaćen koncept koji može pomoći pri donošenju odluka tijekom operacije bušenja. To često dovodi do rasprave o sigurnosti nastavka bušenja. Kako se buši u sve izazovnijim područjima, dovoljna je samo mala promjena u proračunu tolerancije dotoka koja može dovesti do preuranjenog napuštanja bušotine ukoliko je korištena konzervativnija metoda nego što je potrebno, ili može doći do pogreške vezane uz sigurnost same operacije bušenja ukoliko je tolerancija dotoka veća nego bi trebala biti (Catak et al., 2011.).

Tolerancija dotoka (*engl. kick tolerance*), pojam je koji definira najveći volumen dotoka, u najnepovoljnijem slučaju plina, koji smije ući u bušotinu. a da se bušotina može zatvoriti te da se taj dotok može iscirkulirati jednom od metoda gušenja bušotina na siguran način. To podrazumijeva da pri tom ne dođe do loma najslabijeg izloženog intervala, najčešće u području pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi. Kako je toleracija dotoka iznimno bitan faktor u svakoj fazi bušenja, nužno je napraviti proračun najveće količine dotoka fluida iz ležišta kako bi se na siguran način dosegla planirana dubina ugradnje sljedeće kolone zaštitnih cijevi. Do dotoka u bušotinu dolazi ukoliko je gustoća isplake za bušenje premalena pa slojni tlak premašuje hidrostatski tlak stupca isplake. Najnepovoljniji slučaj je dotok plina u bušotionu pri maksimalnoj dubini, to jest kada se dosegne potrebna dubina za ugradnju sljedeće kolone zaštitnih cijevi. Kako bi se odredili uvjeti u kojima neće doći do raspucavanja naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone potrebne su određene pretpostavke. Za istražne ili ocjenske bušotine u djelomično ili potpuno nepoznatim područjima, potrebno je pretpostaviti da formacija s povećanim tlakom ima porni tlak za deset posto veći od hidrostatskog tlaka stupca isplake za bušenje na dubini te formacije, iako se može pretpostaviti i veći tlak ukoliko okolnosti ukazuju na to. Za razradne bušotine se pretpostavlja da razmatrana formacija (formacija koja može uzrokovati dotok) ima tlak jednak hidrostatskom tlaku stupca isplake te da je bilo kakav dotok posljedica tlaka klipovanja (*engl. swabbing pressure*) (Devereux, 1998).

4.1 Određivanje dubine ugradnje kolona zaštitnih cijevi

Za razumijevanje koncepta tolerancije dotoka važno je poznavanje metode određivanja dubine ugradnje kolone zaštitnih cijevi. Standardna metodologija određivanja dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi, a samim tim i pojedinih faza projektiranja bušotine, određuje se slijedom odozdo prema gore (*engl. bottom up method*) i prikazana je na slici (4.1). Od točke A, koja ujedno predstavlja najveću dubinu bušotine, unutar krivulja profila gradijenata pornih i tlakova frakturiranja, povlači se okomita linija do točke B koja je zapravo dubina ugradnje proizvodne kolone na dubini od 3500 m. Kako bi se odredila dubina ugradnje prethodne, tehničke kolone zaštitnih cijevi, od točke B povlači se vodoravna linija do točke C, a od točke C povlači se okomita linija do točke D, koja korespondira s dubinom ugradnje tehničke kolone na dubini od 2800 m. Postupak se ponavlja dok se ne dostigne dubina prethodno definirane dubine ugradnje uvodne kolone zaštitnih cijevi (Krištafor, 2002).



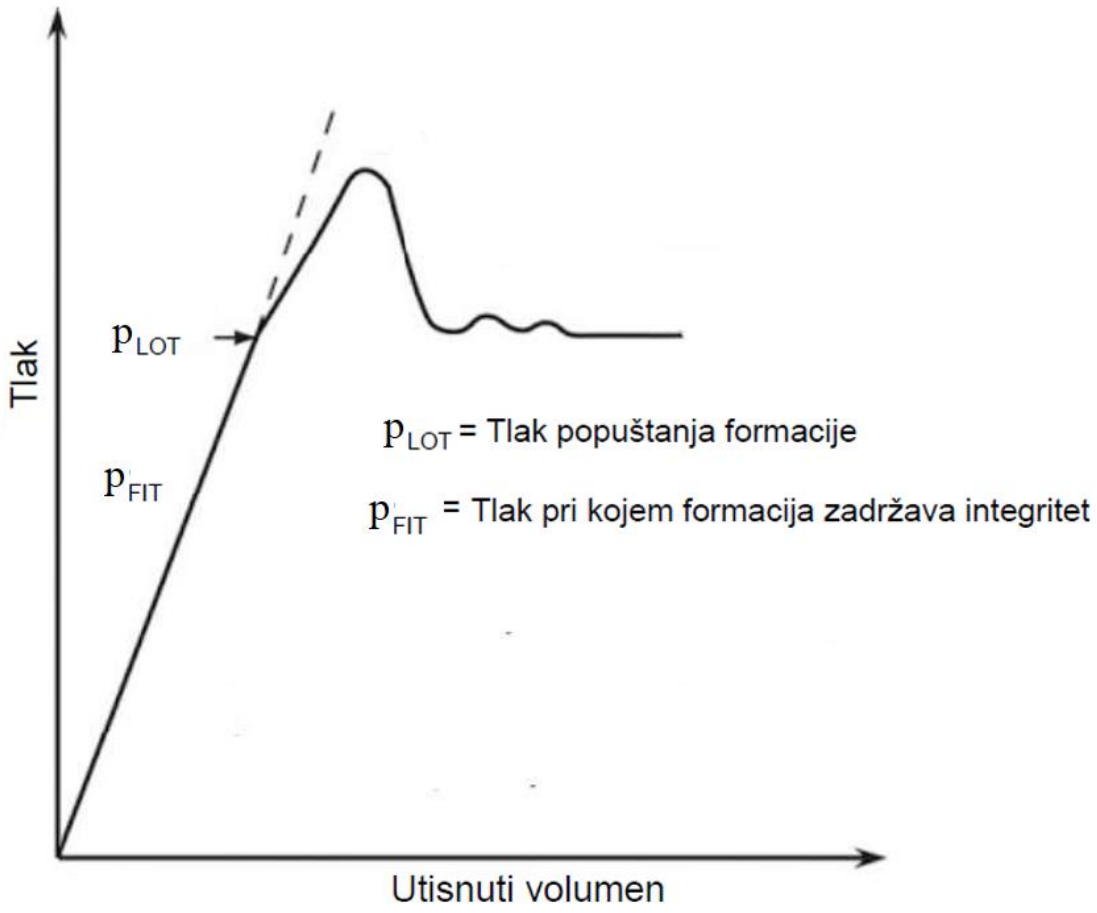
Slika 4-1. Prikaz određivanja dubina ugradnje kolona zaštitnih cijevi standardnom metodologijom („bottom up“) (Krištafor, 2002)

4.2 Migracija plina

Nakon zatvaranja bušotine u slučaju dotoka plina, plin će zahvaljujući razlici u gustoći migrirati prema površini u procesu zvanom perkolacija plina. Migracija plina može izazvati nesigurnosti tijekom operacija koje se provode u svrhu kontrole tlaka u bušotini, budući da se često ne obraća pozornost na taj fizikalni proces. Mjehuri plina pri kretanju prema ušću bušotine ekspandiraju, međutim, ukoliko je bušotina zatvorena i mjehurima plina nije omogućena ekspanzija, uzrokovat će porast tlaka na dnu i na ušću bušotine. Svi tlakovi rastu tijekom migracije plina osim tlaka mjehura plina koji u tom slučaju nosi slojni tlak. Iz tog razloga bušotina ne smije biti dugo zatvorena jer će uzrokovati gubitke cirkulacije i druge negativne utjecaje prevelikog tlaka u bušotini. Manipuliranjem sapnicom održava se tlak na bušaćim šipkama na početnoj očitanoj vrijednosti kod zatvaranja bušotine, čime se spriječavaju negativni efekti perkolacije na način da se dopusti mjehurima plina da ekspandiraju. (Devereux 1998.)

4.3 Ispitivanje integriteta naslaga

Ispitivanje integriteta naslaga (*engl. formation integrity test*) izvodi se kako bi se doznao maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine (MDTUB) nakon što se ugradi i cementira kolona zaštitnih cijevi i nakon što se probuši peta kolone dlijetom za nastavak bušenja sljedeće dionice. Pomoću ispitivanja integriteta naslaga određuje se maskimalni dozvoljeni volumen plina koji smije ući u bušotinu na razini ugradnje sljedeće planirane pete kolone pod tlakom koji je poznat. Za razliku od testa popuštanja naslaga (*engl leak off test*) kod ispitivanja integriteta naslaga ne postiže se tlak koji uzrokuje popuštanje naslaga kao što je prikazano na slici 4-2.



Slika 4-2. Graf ovisnosti tlaka o utisnutom volumenu pri izvođenju testa integriteta naslaga ili testa popuštanja naslaga **(**www.drillingcourse.com)

Postupak ispitivanja integriteta naslaga uključuje bušenje otprilike pet metara ispod pete kolone dlijetom manjeg promjera, cirkulaciju te tretiranje isplake dok cijela bušotine ne bude ispunjena isplakom iste gustoće i reoloških svojstava, ukoliko to već nije slučaj. Sljedeći korak podrazumijeva zadizanje dlijeta na razinu pete, potrebno je utvrditi da je bušotina ispunjena, zatvoriti prstenasti preventer oko bušaćih šipki te zatvoriti sapnicu na ušću bušotine na vodu za prigušivanje. Nadalje se priključi cementacijski agregat na bušaći niz. Polako se utiskuje volumen isplake dok tlak ne počne rasti. U tom trenutku se zapiše utisnuti volumen i tlak. Dopusti se tlaku da se stabilizira te se nadalje utiskuju volumeni od 0,4m^3 do 0,8m^3, nakon svakog utiskivanja dopusti se kratak period stabilizacije tlaka prije utiskivanja sljedećeg obroka te se zabilježe tlak i utisnuti volumen. Potrebno je koristiti dijagram ili tablicu s ranije spomenutim vrijednostima, koja će ukazati na smanjenje povećanja tlaka po utisnutom

volumenu. Test je potrebno zaustaviti kada se povećanje tlaka po jedinici utisnutog volumena smanji ili kada se postigne veći tlak od zadanog tlaka. U tom trenutku potrebno je očitati tlak na ušću bušotine. Taj tlak je kranji tlak koji je kasnije potrebno koristiti u proračunu kao maksimalni dozvoljeni tlak na ušću.

4.4 Metoda proračuna

Nakon što se odredi gradijent tlaka frakturiranja (tlak raspucavanja) stijena, moguće je krenuti s proračunom. Potrebno je izračunati najveći dotok plina u razini pete kolone prethodnih ugrađenih zaštitnih cijevi. Najveći tlak se razvija kada vrh stupca plina migrira do pete prethodno ugrađene kolone. Iako postoje situacije kada je visina stupca dotoka plina veća oko teških šipki nego kada vrh stupca plina dosegne petu, u tom slučaju, ekspanzija plina nije dovoljna da kompenzira promjene u volumenu prstenastog prostora bušotine. Proračun egzaktnog tlaka na vrhu stupca dotoka plina nije izvediv; postoje nepoznati faktori koji čine sitne razlike na uštrb sigurnosti. U proračun nisu uključeni ni komponentni sastav plina (faktori kompresibilnosti) ni temperaturni efekt. Proračun može biti neznatno točniji uz puno više truda, ali to ne mora biti ključno budući da i u slučaju da se ranije spomenuti faktori uzmu u obzir, ne može se predvidjeti sve dodatne faktore unutar bušotine budući da se ne radi o laboratorijskim uvjetima. U ovom slučaju radi se o jednostavnom proračunu za vertikalnu bušotinu (Zadravec, 2012).

Proračun se temelji na sustavu od dvije jednadžbe s dvije nepoznanice (Deveroux, 1998):

$$H_i + H_d = H_b - H_{zc} \tag{4-1}$$

$$H_p \times G_p + H_i \times G_i = p_{sl} - p_{zc} \tag{4-2}$$

gdje su:

H_p – visina stupca plina u bušotini [m]

H_i – visina stupca isplake u intervalu od dna do prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi [m]

H_{zc}– dubina prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi [m]

H_b – dubina bušotine [m]

G_p – gradijent tlaka dotoka plina [bar/m]

G_i – gradijent tlaka isplake za bušenje [bar/m]

p_{sl} – slojni tlak [bar]

p_{zc} – maksimalni dopušteni tlak na razini pete prethodno ugrađene kolone [bar]

U ovom slučaju nepoznanice su visina stupca plina u bušotini te visina stupca isplake. Međutim zbog lakše upotrebe u jednoj jednadžbi nego u sustavu jednadžbi koristi se jednadžba koja se može dobiti iz prethodnog sustava supstitucijom:

$$H_p = \frac{G_f \times H_{zc} + G_i \times (H_b - H_{zc}) - p_{sl}}{G_i - G_p} \tag{4-3}$$

Gdje je:

G_f - gradijent tlaka raspucavanja naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone [bar/m]

Nakon što se odredi visina stupca plina lako je izračunati volumen budući da je volumen prstenastog prostora otvorenog dijela kanala poznat. Nakon što se izračuna maksimalni dopušteni volumen dotoka na razini pete potrebno je izračunati koliki bi taj volumen bio na razini formacije (kolektorske stijene) to jest na dnu.

Prema Boyle Mariotteovom zakonu:

$$p_{zc} \times V_{pp} = p_{sl} \times V_{psl} \tag{4-4}$$

Gdje su:

V_{pp} – volumen stupca plina na razini prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi [m^3]

V_{psl} – volumen stupca plina na dnu bušotine [m^3]

V_{psl} je ujedno i konačni rezultat prema prethodno spomenutim pretpostavkama. Zbog ignoriranja već spomenutih faktora, proračun dopuštenog volumena dotoka plina na dnu bušotine je na strani sigurnosti, što znači da je realni maksimalni volumen dotoka koji neće izazvati lom stijene na razini pete vrlo često veći nego što je prema ovom proračunu.

Ti sigurnosni faktori su:

1. uslijed ekspanzije plina pada temperatura u bušotini što za posljedicu ima manji tlak na razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi;

2. određeni volumen plina će dispergirati unutar isplake što će, također, posljedično smanjiti tlak na razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi;
3. ukoliko je volumen unutar bušaćeg alata manji od volumena otvorenog dijela kanala bušotine, moguće je djelovati na smanjenje tlaka prije nego što vrh stupca plina dosegne petu prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi.

Ukoliko je čvrstoća stijena na razini pete prethodno ugrađene kolone premalena za potrebnu toleranciju dotoka mora se ugraditi kolona zaštitnih cijevi na manjoj dubini od planirane. Pri svakoj promjeni gustoće isplake potrebno je ponovno izračunati toleranciju dotoka, veća gustoća isplake uzrokuje manje tolerantnu bušotinu (*engl. less tolerant well*). Ne smije se dopustiti da isplaka svojim gradijentom tlaka premaši gradijent tlaka raspucavanja naslaga na određenoj dubini. Na primjer, u slučaju dotoka izazvanog klipovanjem u nekom poznatom području isplakom gustoće čiji hidrostatski tlak je jednak tlaku raspucavanja stijena na razini pete, znači da će maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine, skraćeno MDTUB (*engl. maximum allowable annular surface pressure, MAASP*) biti jednak nuli. Dakle gustoća isplake ne bi trebala biti veća od potrebne gustoće da se zadovolji sigurnosni dodatak za klipovanje (*engl. trip margin*) i uvjeti stabilnosti kanala bušotine. Na postrojenju se u svakom trenutku mora nalaziti dovoljna količina barita za otežavanje cijelokupnog aktivnog volumena u optoku na određenu gustoću koja se odredi ispitivanjem integriteta naslaga (*engl. formation integrity test, FIT*).

Dodatni utjecaji na prihvatljivi tlak i volumen dotoka:

- stupanj rizika, potrebno je pretpostaviti više porne tlakove u slučaju prvih istraživačkih bušotina na nepoznatim područjima i u slučaju bušotina s kratkim prijelaznim zonama;
- brzina reakcije; manji dopušteni volumeni bi trebali biti korišteni u sljedećim situacijama (Devereux, 1998.):
    1. bušenje većeg promjera kanala bušotine,
    2. bušenje formacije pod povišenim tlakom koja ima visoku propusnost,
    3. rad s plutajućim postrojenjem na kojem je otežana detekcija povratnog toka,
    4. upotreba opreme niskih standarda,
    5. neadekvatna osposobljenost osoblja na bušaćem postrojenju (Devereux, 1998.).

U nastavku su dane formule koje opisuju izraze za tlak na dubini vrha doteklog plina, tlak hidrostatskog stupca plina te tlak hidrostatskog stupca isplake ispod volumena plina.

$$p_{vrh} = p_f - p_p - p_i \tag{4-5}$$

gdje su:

p_{vrh} – tlak na dubini vrha doteklog plina [bar],

p_p – tlak hidrostatskog stupca plina [bar],

$$p_p = \rho_p \times g \times H_p \tag{4-6}$$

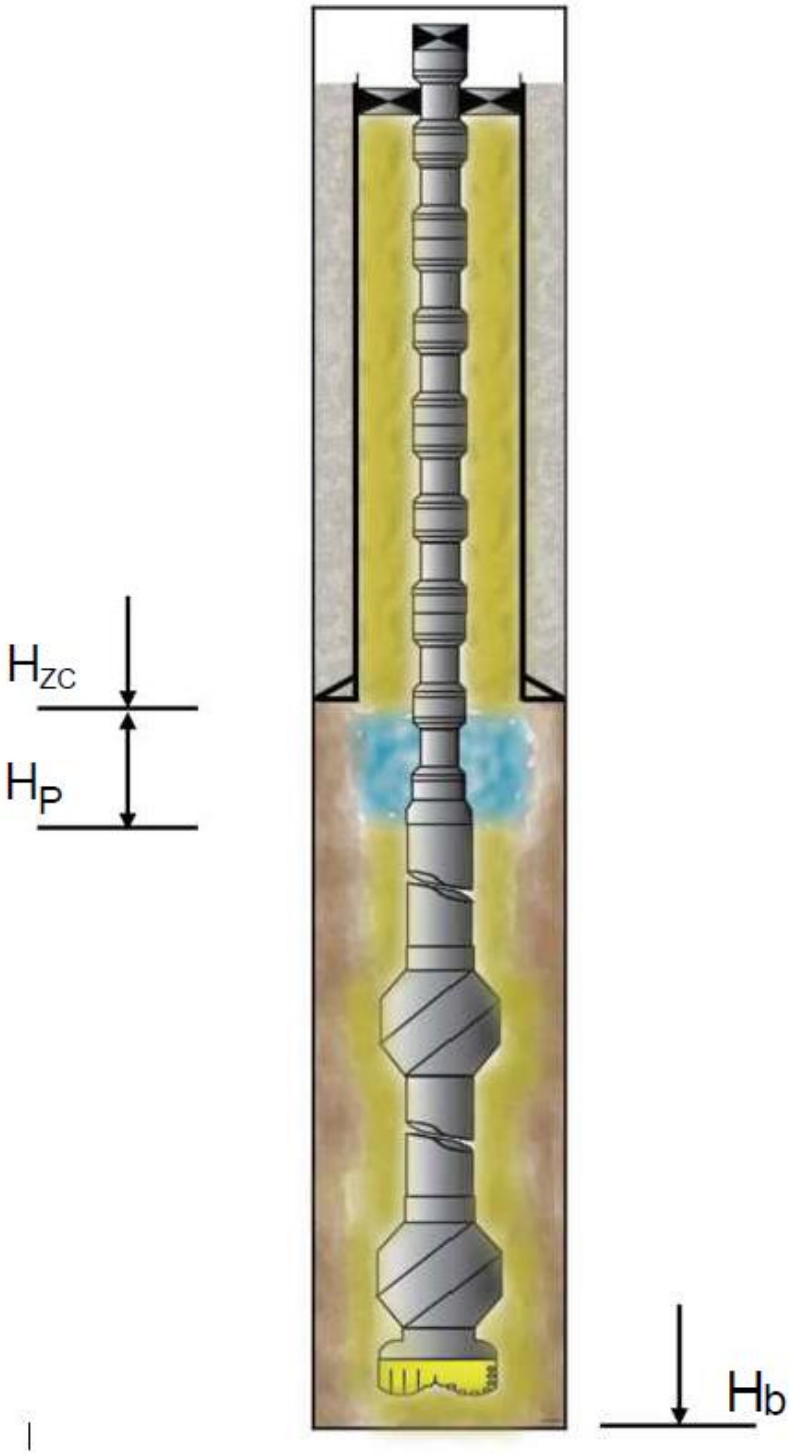
p_i – tlak hidrostatskog stupca isplake ispod volumena plina [bar]

$$p_i = \rho_i \times g \times \left(H_b - H_{zc} - H_p\right) \tag{4-7}$$

ρ_p – gustoća plina [kg/m^3],

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3],

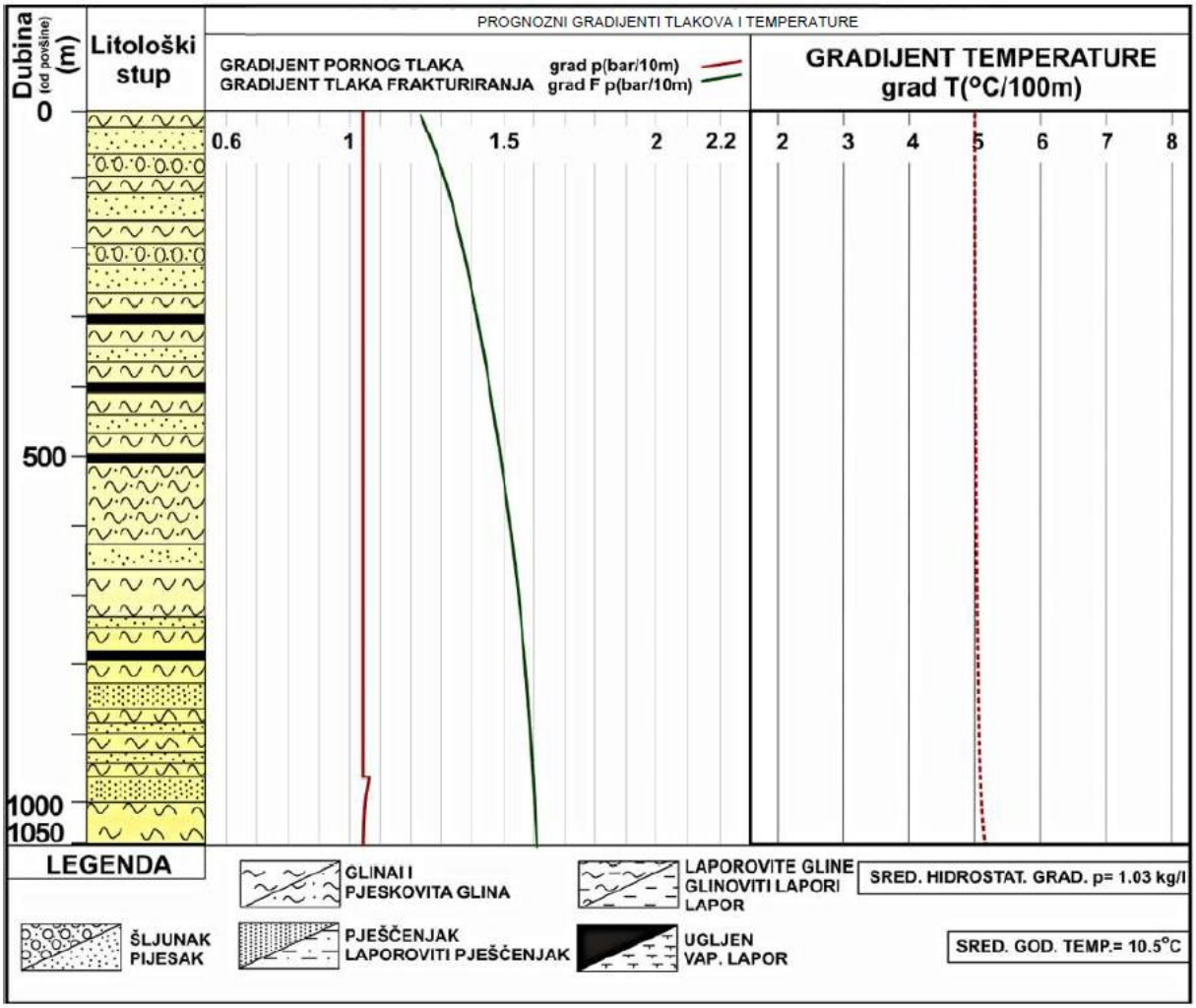
g – ubrzanje sile teže [9,80665 m/s^2]



Slika 4-3. Prikaz bušotine u trenutku kada vrh stupca plina dosegne petu prethodno ugrađene kolone (Projekt izrade istražne bušotine Berak-1, 2019)

4.5 Praktični primjer proračuna

Kao što je ranije spomenuto razlikuju se proračun za toleranciju dotoka tijekom bušenja i tijekom manevra bušaćim alatom. Litološki sastav, gradijenti tlaka frakturiranja i pornog tlaka te gradijent temperature za bušotinu Berak – 1 prikazani su na slici 4-3.



Slika 4-4. Litološki sastav, gradijenti tlaka frakturiranja i pornog tlaka te gradijent temperature za bušotinu Berak – 1 (Projekt izrade istražne bušotine Berak – 1, 2019)

Primjer proračuna tolerancije dotoka tijekom bušenja za bušotinu Berak – 1.

Ulazni podaci su:

- promjer dlijeta: D_{dl} = 0,1588 m
- vanjski promjer bušaćih šipki: $D_{bš}$ = 0,0889 m
- hidrostatski gradijent plina: G_p = 0,03 bar/m

- dubina ugradnje pete sljedeće kolone zaštitnih cijevi: H_b = 1100 m
- dubina pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi: H_{zc} = 450 m
- gradijent tlaka isplake maksimalne dopuštene gustoće: G_i = 0,115 bar/m
- gradijent pornog tlaka: G_p = 0,104 bar/m
- tlak u razmatranoj formaciji: p_{sl} = 114,4 bar
- gradijent tlaka raspucavanja naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone: G_f = 0,149 bar/m

Prema formuli (4-3) najveća dopuštena visina stupca plina u razini prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi:

$$H_p = \frac{G_f \times H_{zc} + G_i \times (H_b - H_{zc}) - p_{sl}}{G_i - G_p}$$

$$H_p = \frac{0{,}149 \times 450 + 0{,}115 \times (1100 - 450) - 114{,}4}{0{,}115 - 0{,}03}$$

$$H_p = 322{,}35\ m$$

Kako je 322,35 m visina dotoka na razini pete sljedeći korak je proračunati volumen istog dotoka (V_{pp}).

$$V_{pp} = H_p \times \frac{{D_{dl}}^2 - {D_{bš}}^2}{4}\ x\ \pi \qquad (4\text{-}8)$$

$$V_{pp} = 322{,}35 \times \frac{0{,}1588^2 - 0{,}0889^2}{4}\ x\ \pi$$

$$V_{pp} = 4{,}380\ m^3$$

Budući da je 4,380 m^3 volumen plina kada vrh stupca plina dosegne petu kolone, potrebno je izračunati koliki je taj isti volumen u ležišnim uvjetima (V_{psl}).

Maksimalni dopušteni tlak na razini pete prethodno ugrađene kolone (p_{zc}):

$$p_{zc} = G_f \times H_{zc} \qquad (4\text{-}9)$$

$$p_{zc} = 0{,}149 \times 450$$

$$p_{zc} = 67{,}05\ bar$$

Volumen plina u ležišnim uvjetima (V_{psl}) je prema formuli (4-4):

$$V_{psl} = \frac{p_{zc} \times V_{pp}}{p_{sl}}$$

$$V_{psl} = \frac{67{,}05 \times 4{,}380}{114{,}4}$$

$$V_{psl} = 2{,}567\ m^3$$

Prema prethodnom proračunu, maksimalni dopušteni volumen plina koji smije ući u bušotinu, a da ne izazove raspucavanje naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi iznosi 2,567 m^3.

Kao što je prethodno spomenuto, proračun za toleranciju dotoka tijekom manevra će biti drugačiji od proračuna dotoka tijekom bušenja. Razlika je u pretpostavci iznos slojnog tlaka, u slučaju dotoka tijekom bušenja u proračunu se koristi pretpostavljeni slojni tlak, dok se u slučaju dotoka tijekom manevra koristi slojni tlak koji je jednak hidrostatskom tlaku stupca isplake.

Primjer proračuna tolerancije dotoka tijekom manevra za bušotinu Berak – 1

Ulazni podaci:

- promjer dlijeta: D_{dl} = 0,1588 m
- vanjski promjer bušaćih šipki: $D_{bš}$ = 0,0889 m
- gradijent plina: G_p = 0,0300 bar/m
- dubina ugradnje pete sljedeće kolone zaštitnih cijevi: H_b = 1100 m
- dubina pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi: H_{zc} = 450 m
- gradijent tlaka stupca isplake maksimalne dopuštene gustoće: G_i = 0,1150 bar/m
- gradijent tlaka raspucavanja naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone: G_f = 0,1490 bar/m
- tlak na razini formacije:

$$p_{sl} = G_i \times H_b \qquad (4\text{-}10)$$

$$p_{sl} = 0{,}1150 \times 1100$$

$$p_{sl} = 126{,}50\ bar$$

Prema formuli (4-3) najveća dopuštena visina stupca plina u razini prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi:

$$H_p = \frac{G_f \times H_{zc} + G_i \times (H_b - H_{zc}) - P_{sl}}{G_i - G_p}$$

$$H_p = \frac{0{,}1490 \times 450 + 0{,}1150 \times (1050 - 450) - 126{,}50}{0{,}1150 - 0{,}0300}$$

$$H_p = 180\ m$$

Kako je 180 m visina dotoka na razini pete sljedeći korak je proračunati volumen istog dotoka.

$$V_{pp} = H_p \times \frac{{D_{dl}}^2 - {D_{bš}}^2}{4} \times \pi$$

$$V_{pp} = 180 \times \frac{0{,}1588^2 - 0{,}0889^2}{4} \times \pi$$

$$V_{pp} = 2{,}445\ m^3$$

Budući da je 2,445 m^3 volumen plina kada vrh stupca plina dosegne petu kolone, potrebno je izračunati koliki je taj isti volumen u ležišnim uvjetima (V_{psl}).

Maksimalni dopušteni tlak na razini pete prethodno ugrađene pete kolone zaštitnih cijevi:

$$p_{zc} = G_f \times H_{zc}$$

$$p_{zc} = 0{,}1490 \times 450$$

$$p_{zc} = 67{,}05\ bar$$

Volumen plina u ležišnim uvjetima (V_{psl}) je:

$$V_{psl} = \frac{P_{zc} \times V_{pp}}{P_{sl}}$$

$$V_{psl} = \frac{67{,}05 \times 2{,}445}{126{,}50}$$

$$V_{psl} = 1{,}296\ m^3$$

Prema danom proračunu, maksimalni dopušteni volumen plina koji smije ući u bušotinu a da ne izazove raspucavanje naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi iznosi 1,296 m^3.

Tablica 4-1 prikazuje najveći dopušteni volumen dotoka na pojedinim dubinama u bušotini tijekom bušenja bušotine Berak-1.

Tablica 4-1 prikaz najvećih dopuštenih volumena dotoka na pojedinim dubinama bušotine tijekom bušenja bušotine Berak-1. (Projekt izrade istražne bušotine Berak – 1, 2019)

Dubina	G_{sl}	G_f	G_i	A	H_{zc}	V_{pp}	$\mathbf{V_{psl}}$
m	bar/m	bar/m	bar/m	m^2	m	m^3	$\mathbf{m^3}$
451	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,324	**4,63**
500	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,332	**4,29**
550	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,341	**4,00**
600	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,350	**3,76**
650	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,359	**3,56**
700	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,368	**3,39**
750	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,376	**3,24**
800	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,385	**3,10**
850	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,394	**2,99**
900	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,403	**2,89**
950	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,412	**2,79**
1000	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,420	**2,71**
1050	1,08	1,49	1,15	0,0136	450	0,362	**2,14**
1100	1,04	1,49	1,15	0,0136	450	0,438	**2,57**

Prema određenim preporukama ili prema procedurama određenih kompanija potrebno je pretpostaviti maksimalni volumen dotoka te krenuti u proračun zadanim maksimalnim volumenom dotoka, što za posljedicu najčešće ima manju dubinu ugradnju pete sljedećeg niza zaštitnih cijevi.

Prema Američkom naftnom institutu (*engl. American Petroleum Institute, API*) zahtjev za minimalnim volumenom dotoka ovisi o promjeru bušotine. Za bušotinu promjera 31,12 cm (12 ¼ incha) traženi maksimalni volumen je 7,95 m^3 dok za bušotinu promjera 21,59 cm (8 ½ incha) traženi maksimalni volumen je 4 m^3. To u stvari predstavlja maksimalni volumen dotoka koji je moguće ugušiti bez posljedica po frakturiranje bušotine (najčešće na konačnoj dubini, određeno pomoću ispitivanja integriteta naslaga).

Za bušotine u kojima slojni tlak nije poznat najmanja prihvatljiva tolerancija dotoka iznosi 4 m^3, za bušotine manjeg promjera od 21,59 cm (8 ½ incha) te za bušotine većeg promjera od 21,59 cm (8 ½ incha) iznosi 8 m^3 (Vermilion, 2019). Za bušotine u kojima je slojni tlak poznat te hidrostatski tlak stupca isplake premašuje taj poznati tlak minimalna tolerancija dotoka za bušotine promjera manjeg od 21,59 cm (8 ½ incha) iznosi 3 m^3 te za bušotine većeg promjera od 21,59 cm (8 ½ incha) iznosi 6 m^3 (Vermilion, 2019).

Primjer proračuna tolerancije dotoka u slučaju zadane tolerancije dotoka, za bušotinu Berak-1, dotok izazvan klipovanjem.

- promjer dlijeta: D_{dl} = 0,1588 m
- vanjski promjer bušaćih šipki: $D_{bš}$ = 0,0889 m
- hidrostatski gradijent plina: G_p = 0,0300 bar/m
- dubina ugradnje pete sljedeće kolone zaštitnih cijevi: H_b = 1100 m
- gradijent tlaka stupca isplake maksimalne dopuštene gustoće: G_i = 0,1150 bar/m
- gradijent tlaka raspucavanja naslaga u razini pete prethodno ugrađene kolone: G_f = 0,1490 bar/m
- tlak na razini formacije: p_{sl} = 126,50 bar
- dotok plina na razini formacije: V_{psl} = 3 m^3

Radi jednostavnijeg proračuna potrebno izračunati površinu presjeka prstenastog prostora bušotine označenu s A:

$$A = \frac{D_{dl}^2 - D_{bš}^2}{4}\pi \tag{4-11}$$

$$A = \frac{0{,}1588^2 - 0{,}0889^2}{4}\pi$$

$$A = 0{,}0136\ m^2$$

u ovom slučaju tlak (P_{zc}) i volumen plina (V_{pp}) u razini pete kolone su nepoznate vrijednosti a jednake su sljedećim izrazima:

$$V_{\mathrm{pp}} = A \times H_p \tag{4-12}$$

$$P_{\mathrm{zc}} = G_f \times H_{\mathrm{zc}}$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza u (4-4) i sređivanjem izraza, dobije se jednakost za potrebnu dubinu ugradnje prethodne kolone H_{zc}:

$$H_{zc} = \frac{P_{sl} \times V_{\mathrm{psl}}}{G_f \times A \times H_p} \tag{4-13}$$

budući da vrijedi jednakost u jednadžbi (4-3) moguće je istu izraziti kao:

$$H_{zc} = \frac{H_p \times (G_i - G_p) + P_{sl} - G_i \times H_b}{G_f - G_i}$$

Izjednačavanjem dubine potrebne ugradnje prethodne kolone, u ovom slučaju, dobije se jednadžba u kojoj je jedina nepoznata vrijednost visina dotoka u razini pete kolone;

$$H_{zc} = H_{zc}$$

$$\frac{p_{sl} \times V_{psl}}{G_f \times A \times H_p} = \frac{H_p \times (G_i - G_p) + P_{sl} - G_i \times H_b}{G_f - G_i} \quad (4\text{-}14)$$

Sređivanjem izraza (4-13) može se dobiti sljedeći izraz:

$$H_p^2 \times (G_f \times A \times (G_i - G_p) + H_p \times (G_f \times A \times (p_{sl} \times G_i \times H_b) - p_{sl} \times V_{psl} \times (G_f - G_i) = 0$$

koji je zapravo kvadratna jednažba.

Proračunom prethodne jednadžbe u programskom paketu MS Office Excel-u, korištenjem funkcije „goal seek" dobije se:

$$H_p = 273{,}72\ m$$

iz čega slijedi prethodno spomenutim izrazom (4-13):

$$H_{zc} = \frac{p_{sl} \times V_{psl}}{G_f \times A \times H_p}$$

$$H_{zc} = \frac{126{,}50 \times 3}{0{,}1490 \times 0{,}0136 \times 273{,}72}$$

$$H_{zc} = 684{,}27\ m$$

Prema tome, prethodnu kolonu zaštitnih cijevi, pri istim pretpostavkama kao u prethodnom proračunu, potrebno je ugraditi na minimalnoj dubini od 684,27 m.

Istim proračunom, za prvi primjer, u slučaju prethodno određene tolerancije dotoka od 4 m^3 u fazi bušenja koristeći gradijent pornog tlaka G_{sl}=0,1040 bar/m, minimalna dubina ugradnje zaštitnih cijevi je 594,24 m.

5. ZAKLJUČAK

Proračun tolerancije dotoka neizostavan je dio projektiranja bušenja i same operacije bušenja. Međutim, prema zahtjevima određenih kompanija u proračun tolerancije dotoka kreće se obrnutim slijedom, prema zadanom volumenu dotoka plina određenih svojstava i ostalim bušotinskim uvjetima koji su ili poznati ili pretpostavljeni, određuje se potrebna dubina ugradnje kolone zaštitnih cijevi. Prethodno je spomenuto kako su u proračunu koji se koristi za projektiranje namjerno zanemareni određeni faktori koji neznatno utječu na rezultat a, nepotrebno, znatno kompliciraju proračun. Ti faktori smanjuju maksimalni dopušteni dotok, tako da se zapravo radi o predimenzioniranju tj. očekivanju većeg dotoka nego što je moguć radi većeg faktora sigurnosti. Također, jasno je da volumen dotoka nije jedini bitan faktor u razvoju tlakova, promjer kanala bušotine ima veliku ulogu budući da će isti volumen dotoka činiti puno dulji stupac plina u kanalu manjeg promjera, samim time će se znatno sniziti hidrostatski tlak u prstenastom prostoru. Stoga je bitno ograničiti volumen dotoka prema promjeru kanala bušotine. Primjena obrnutog načina proračuna može biti efikasna u vidu određenih tablica te smjernica u odnosu na promjer kanala bušotine te očekivane gradijente tlaka frakturiranja i pornog tlaka. Na taj način može se odrediti ugradnja dodatne kolone zaštitnih cijevi u određenom slučaju te se može uniformno zadati maksimalni dopušteni dotok preko kojeg se može projektirati potrebna dubina ugradnje dodatne kolone zaštitinih cijevi. Međutim, pretpostavljanjem maksimalnog dopuštenog dotoka lako je moguće pretpostaviti preveliki volumen dotoka što može uzrokovati potrebu za ugradnjom tehničke kolone tamo gdje zapravo nema potrebe, što može znatno povećati troškove bušenja. Ukoliko ovaj način proračuna tolerancije dotoka, s dodatnim sigurnosnim faktorom, često i s dodatnom kolonom zaštitnih cijevi, utječe na smanjenje frekvencije potrebe za korištenjem tercijarnih metoda kontrole tlaka te posljedičnim napuštanjem bušotina, onda može biti isplativ. Međutim dok se takvo ispitivanje ne sprovede, dodatna ograničenja i pretpostavke samo povećavaju troškove operacije bušenja.

6. LITERATURA

1. Aberdeen Drilling Schools & Well Control Training Centre, 2002. „Well Control For The Man On The Rig“, Aberdeen.

2. DEVEROUX, S., 1998. Practical well planning and drilling manual. Pen Well Corporation, Tulsa.

3. CATAK, E., SANTOS, H., VALLURI, S., 2011. Kick-Tolerance Misconceptions and Consequences for Well Design, SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam,

4 ERCEG, 2017. Istodobna metoda gušenja bušotina i usporedba s inženjerskom metodom, RGNF.

5. FIKA ECO d.o.o., Zagreb 2019. Projekt izrade istražne bušotine Berak-1 s bušotinskim radnim prostorom za smještaj bušaćeg postrojenja na istražnom prostoru Sava-10.

6. GOINS, W.C.Jr., SHEFFIELD, R., 1983. Blowout Prevention, Houston: Gulf Professional Publishing.

7. GRACE, R.D., 2003. Blowout and Well Control Handbook, Houston: Gulf Professional Publishing.

8. KRIŠTAFOR, Z., 2002. Projektiranje zacjevljenja : skripta. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

9. Maersk Training Centre A/S, Well Control Manual.

10. Noble Drilling Services , INC, 2012. Well Control Manual.

11. Vermilion, 2019. Well Construction Standards Manual.

12. WHITTAKER, A., 1991. Mud Logging Handbook (e-book), Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

13. ZADRAVEC, D., 2012. Stohastički model dinamičkog sustava izrade kanala bušotine, RGNF

www izvori:

14. 20.11.2018. Formation integrity test – definitions and objectives

URL: https://www.drillingcourse.com/2018/11/formation-integrity-test-definitions.html (25.01.2020.).

Izjava

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

_____

Marko Kvartuč