Stanja, postupci i formule za kontrolu tlaka u bušotini

Girtšal, Dominik

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:169:193928

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

STANJA, POSTUPCI I FORMULE ZA KONTROLU TLAKA U BUŠOTINI

Diplomski rad

Dominik Girtšal

N-168

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

STANJA, POSTUPCI I FORMULE ZA KONTROLU TLAKA U BUŠOTINI

DOMINIK GIRTŠAL

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Osnovna zadaća kontrole tlaka u bušotini je isplakom vršiti nadtlak na sloj kako ne bi došlo do utoka slojnih fluida u kanal bušotine. Hidrostatički tlak stupca isplake sredstvo je primarne kontrole tlaka, a pojava dotoka znak je njenog gubitka. Preventerski sklop postavljen na ušću bušotine kojim se, jednom kad je dotok utvrđen, bušotina zatvara, sredstvo je sekundarne kontrole tlaka. Nakon zatvaranja, bušotina se pojednostavljeno promatra kao U-cijev i tlakovi se očitavaju na bušaćim šipkama i nad prstenastim prostorom. Na temelju očitanih tlakova i ostalih faktora kao što je stanje i položaj alatki, odabire se neka od metoda ugušivanja bušotine kako bi se ponovno uspostavila primarna kontrola tlaka. Opisani postupci i formule služe sprječavanju dotoka, ali zbog nepredvidivih okolnosti, neopreza i/ili manjka iskustva bušaćeg osoblja, dotok se ne može uvijek spriječiti. Preciznost proračuna od krucijalne je važnosti kako bi se bušotina ugušila i izbjegao najnepovoljniji ishod – gubitak bušotine i/ili ljudskih života.

Ključne riječi: kontrola tlaka, primarna kontrola tlaka, sekundarna kontrola tlaka, metode ugušivanja, formule.

Diplomski rad sadrži: 40 stranica, 13 slika i 11 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. veljače 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master thesis

SITUATIONS, PROCEDURES AND FORMULAS FOR WELL CONTROL

DOMINIK GIRTŠAL

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The main objective of well control is to overbalance the formation pressure by using drilling fluid thus preventing influx of formation fluids into the well. The hydrostatic pressure of the drilling fluid column is the instrument of primary pressure control. The loss of primary pressure control signals the influx of formation fluids. The blow-out prevention assembly located at the top of the well is used to close the well after the detection of influx, representing the means of secondary pressure control. After the well is shut in, it is treated as a closed U-tube. Pressure is measured at the wellhead producing readings for the pressure inside the drillpipe and casing. In order to regain primary control, an appropriate well killing method is selected based on the pressure readings and other factors, such as the condition and positioning of drilling tools. The procedures and formulas described in this thesis are used to prevent and control influx. Despite this, influxes and kicks still occur as a result of unpredictable issues, irreverence and an inexperienced staff. When applying a kill well method accurate calculations are crucial in order to regain control over the well and to prevent the worst case scenario – loss of the well and human lives.

Keywords: Well control, primary pressure control, secondary pressure control, well kill methods, formulas.

Thesis contains: 40 pages, 13 figures i 11 references.

Original in: Croatian

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

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 17th, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
2. PRIMARNA KONTROLA TLAKA 2
2.1. Hidrostatički tlak (P_h) 2
2.2. Slojni tlak (P_{sl}) 2
2.3. Diferencijalni tlak 3
2.4. Dinamički tlak (P_d) 3
2.5. Ekvivalentna gustoća isplake 5
2.6. Tlak frakturiranja 6
2.7. Test primanja sloja 6
2.8. Maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine (MDTUB) 8
3. UZROCI DOTOKA 9
3.1. Dotok tijekom manevra 9
3.1.1. Efekti klipovanja i hidrauličkog udara 15
3.2. Slojevi pod povećanim tlakom 17
3.2.1. Plinske leće 18
3.2.2. Pliniziranje isplake i jedinica za operativni geološki nadzor 19
3.3. Posebni slučajevi kada je moguća pojava dotoka 23
4. SEKUNDARNA KONTROLA TLAKA 24
4.1. Osnovni principi ugušivanja dotoka 26
4.2. Smanjeni tlak cirkulacije (P_{TCS}) 28
4.3. Općenito o metodama ugušivanja 29
4.3.1. Bušaća metoda 30
4.3.2. Inženjerska metoda 30
4.3.3. Kombinacija bušaće i inženjerske metode 31
4.3.4. Volumetrijska metoda 31
4.3.5. Metoda malog tlaka na sapnici 32
4.3.6. Metoda vraćanja dotoka u sloj 32
5. HIDRAULIČKI KONTROLNI SUSTAV 33
5.1. Hidraulička jedinica 33
5.2. Akumulatorski sklop i proračun 34
6. ZAKLJUČAK 38
7. LITERATURA 40

POPIS KORIŠTENIH SLIKA

Slika 2-1. Prikaz razlike vrijednosti tlakova na dno bušotine 5
Slika 2-2. Prikaz idealiziranih grafova testa primanja formacije za konsolidirane i nekonsolidirane formacije 7
Slika 3-1. Pad nivoa isplake kod „suhog“ vađenja. 10
Slika 3-2. Pad nivoa isplake kod „mokrog“ vađenja. 13
Slika 3-3. Shema kontinuiranog nadopunjavanja bušotine isplakom 15
Slika 3-4. Shematski prikaz efekata hidrauličkog udara i klipovanja 17
Slika 3-5. Proboj plina iza konduktor kolone 19
Slika 3-6. Shematski prikaz povećanja volumena (ekspanzije) plina 20
Slika 3-7. Shematski prikaz jedinice za operativni geološki nadzor 22
Slika 4-1. Prikaz niza preventera i pripadajućih oznaka prema API RP 53 25
Slika 4-2. Pojednostavljeni prikaz odnosa tlakova na ušću i bušaćim šipkama temeljen na principu U-cijevi 27
Slika 5-1. Akumulatorska boca s mijehom 35
Slika 5-2. Kritični tlakovi u akumulatorskoj boci 36

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I NJIMA PRIPADAJUĆIH MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
A_{pp}	- površina poprečnog presjeka prstenastog prostora	[m^2]
$D_{bš}$	- promjer bušaćih šipki	[m]
D_{kb}	- promjer kanala bušotine	[m]
H_m	- dubina mora	[m]
H_{PK}	- vertikalna dubina pete kolone	[m]
H_{pn}	- pad nivoa isplake	[m]
$H_{pnž}$	- željeni pad nivoa isplake u bušaćim šipkama	[m]
H_{TVD}	- stvarna vertikalna dubina	[m]
H_V	- vertikalna dubina	[m]
$l_{iš}$	- duljina izvađenih šipki	[m]
l_{ri}	- duljina rajzer cijevi	[m]
$l_{tš}$	- duljina teških šipki	[m]
n_{hod}	- broj hodova pumpe u jedinici vremena	[1/min]
n_n	- novi broj hodova pumpe	[1/min]
n_s	- stari broj hodova pumpe	[1/min]
P_A	- tlak predpunjenja akumulatora dušikom	[bar]
P_B	- maksimalni radni tlak hidrauličkog sustava	[bar]
P_C	- minimalni tlak potreban za zatvaranje preventera	[bar]
P_h	- hidrostatički tlak	[Pa]
$P_{hbš}$	- hidrostatički tlak isplake u bušaćim šipkama	[kPa]
P_{hpp}	- hidrostatički tlak isplake u prstenastom prostoru	[kPa]
P_{hsl}	- hidrostatički tlak slojnih fluida u prstenastom prostoru	[kPa]
P_{LOT}	- tlak primanja sloja	[kPa]
P_{MDTUB}	- maksimalni dozvoljeni tlak u bušotini	[kPa]
P_{nt}	- nadtlak	[kPa]
P_{ntc}	- novi tlak cirkulacije	[kPa]
P_{PTC}	- pad tlaka cirkulacije u prstenastom prostoru	[kPa]
P_{sl}	- slojni tlak	[kPa]
P_{stc}	- stari tlak cirkulacije	[kPa]

$P_{TBŠZ}$	- tlak na bušaćim šipkama nakon zatvaranja	[kPa]
P_{TCK}	- konačni tlak cirkulacije	[kPa]
P_{TCP}	- početni tlak cirkulacije	[kPa]
P_{TCS}	- smanjeni tlak cirkulacije	[kPa]
P_{TUBZ}	- tlak na ušću nakon zatvaranja	[kPa]
Q_p	- dobava pumpe	[m^3/min]
V_b	- volumen akumulatorkse boce	[m^3]
$V_{bš}'$	- jedinični volumen unutar bušaćih šipki	[m^3/m]
$V_č$	- volumen čelika	[m^3]
$V_č'$	- jedinični volumen čelika	[m^3/m]
V_{hf}	- iskoristivi volumen hidrauličkog fluida	[m^3]
V_i	- volumen isplake	[m^3]
v_{pp}	- brzina isplake u prstenastom prostoru	[m/min]
V_{KZC}	- volumen kolone zaštinih cijevi	[m^3]
v_{mp}	- brzina migracije plina	[m/h]
V_{pill}	- volumen otežanog obroka isplake za istikivanje	[m^3]
$V_{ppš}'$	- jedinični volumen presjeka punog profila šipki	[m^3/m]
Z_i	- zaplinjenost isplake	[%]
ΔP_{hi}	- gradijent hidrostatičkog tlaka isplake	[kPa/m]
ΔP_{SV}	- gradijent pada tlaka pri suhom vađenju šipki	[kPa/m]
$\Delta P_š$	- porast tlaka plina na šipkama u jedinici vremena	[kPa/h]
ρ	- gustoća fluida	[kg/m^3]
ρ_{ECD}	- ekvivalentna gustoća isplake u cirkulaciji	[kg/m^3]
ρ_i	- gustoća isplake	[kg/m^3]
ρ_{iz}	- gustoća isplake na izlazu iz bušotine	[kg/m^3]
ρ_m	- gustoća mora	[kg/m^3]
ρ_{MD}	- maksimalna dozvoljena gustoća isplake	[kg/m^3]
ρ_{oi}	- gustoća otežane isplake	[kg/m^3]
ρ_{sf}	- sigurnosni faktor gustoće isplake	[kg/m^3]
τ_o	- naprezanje pri pokretanju isplake	[Pa]

1. UVOD

Moglo bi se reći kako kontrola tlaka (engl. *well control, pressure control*) započinje prvim zabušivanjem tla (engl. *spud in*) obzirom na isplaku (engl. *drilling fluid*) čija je primarna zadaća u toj fazi izrade bušotina cirkuliranjem iznositi krhotine razrušenih stijena. Nadalje tijekom izrade kanala bušotine moguć je dotok kapljevine ili plina u kanal bušotine, a to može biti prvi korak prema erupciji. Do najvećih nesreća u naftnoj djelatnosti dolazi zbog nekontroliranih erupcija. Posljedično je izgubljeno mnogo života i načinjeno puno materijalne štete, uništena su mnoga postrojenja, ali i ležišta. Do dotoka, a posljedično erupcije može doći tijekom:

- bušenja,
- spuštanja i izvlačenja bušaćih alatki,
- cementacije zaštitne kolone i stvrdnjavanja cementne kaše,
- duljeg mirovanja bušotine,
- spašavanja prihvaćenih alatki u bušotini itd.

Ako isplaka nije odgovarajućih svojstava i dovoljne energije protjecanja, krhotine će se taložiti na dnu (engl. *pack-off*) te će kočiti daljnji napredak. Situacija postaje znatno složenija kada se uspostavi kontakt s ležištem i fluidima koje ono sadržava. Na taj način dolazi se do glavne zadaće postupaka i načina kontrole tlaka čija je svrha održavanje tlaka u otvorenom kanalu bušotine u funkciji sprječavanja dotoka slojnih fluida, a u najpogubnijem slučaju erupcije. Nakon dostizanja konačne dubine bušotine (engl. *total depth*) provodi se proizvodno opremanje bušotine (engl. *well completion*) čime započinje eksploatacija iz kolektorskih stijena. Nadalje tijekom godina eksploatacije nerijetko dolazi do oštećenja opreme i odstupanja od idealne projektirane eksploatacije fluida, pa su potrebni remontni radovi (engl. *workover*). Kontrola tlaka neophodna je i kod navedenih radova. U ovom radu definirani su osnovni pojmovi vezani uz kontrolu tlaka te navedene glavne formule s pripadajućim oznakama i mjernim jedinicama potrebne za provođenje ispravne kontrole tlaka, a u skladu s kriterijima krovnih svjetskih institucija (*International Well Control Forum* – IWCF i *International Association of Drilling Contractors* – IADC).

2. PRIMARNA KONTROLA TLAKA

Kontrola tlaka podrazumijeva postupke nadzora slojnih fluida u sloju odnosno ležištu. To se postiže tlakom koji ostvaruje stupac isplake u bušotini nasuprot pornog prostora ležišta koji mora biti veći od tlaka fluida u sloju. Stoga je razumijevanje tlakova i njihovih odnosa preduvjet za provođenje kontrole tlaka.

2.1. Hidrostatički tlak (P_h)

Hidrostatički tlak (engl. *hydrostatic pressure*) je tlak prouzročen težinom stupca fluida u mirovanju, a proporcionalan je vertikalnoj dubini ili visini stupca promatranog fluida. Nadalje ovisan je i o gustoći fluida čime formula za određivanje hidrostatičkog tlaka glasi:

$$P_h=\rho\times g\times H_v \text{ [Pa]} \tag{2.1}$$

pri čemu su:

P_h – hidrostatički tlak [Pa];

ρ – gustoća fluida [kg/m^3];

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

H_v – vertikalna dubina ili visina stupca fluida [m].

Održavanje dovoljnog hidrostatičkog tlaka je temeljno načelo primarne kontrole tlaka stoga je potrebno definirati i njegov gradijent. Gradijent hidrostatičkog tlaka je vrijednost porasta hidrostatičkog tlaka po jedinici vertikalne dubine, a različit je za pojedine fluide i ovisan o njihovoj gustoći. Mjerna jedinica je [Pa/m], a u praksi se još koriste [bar/m] i [psi/ft].

2.2. Slojni tlak (P_{sl})

Slojni tlak ili tlak formacije (engl. *formation pressure*) je tlak fluida koji se nalazi zarobljen unutar porozne stijene. Razlikuju se vrijednosti normalnog i anormalnog slojnog tlaka pri čemu normalni slojni tlak odgovara gradijentu tlaka slojne vode u rasponu od 979-1052 Pa/m (ovisno o stupnju mineralizacije vode) (Apave Mare d.o.o., 2015). Vrijednosti gradijenta tlaka većeg ili manjeg od navedenih smatraju se anormalnim slojnim tlakom. Općenito se pod anormalnim slojnim tlakom u literaturi podrazumijeva tlak veći od normalnog iako i smanjeni tlak može izazvati ozbiljne posljedice. Tlak veći od normalnog posljedica je kompakcije stijena koja se prenosi na fluide u njima. Smanjeni slojni tlak najčešće je posljedica crpljenja fluida u ležištu.

2.3. Diferencijalni tlak

Prilikom bušenja isplaka gotovo uvijek treba ostvarivati veći tlak od slojnog tlaka (engl. *overbalance*). Razlika hidrostatičkog tlaka isplake i slojnog tlaka naziva se diferencijalni tlak. Poznavanjem slojnog tlaka i stvarne vertikalne dubine (engl. *true vertical depth* – TVD) može se odrediti potrebna vrijednost gustoće isplake kako bi razlika tlaka stupca isplake i slojnog tlaka bila pozitivna. Jednadžba za minimalnu vrijednost gustoće isplake glasi:

$$\rho = \frac{P_{sl}}{H_{TVD} \times 0{,}00981} \ [kg/m^3] \tag{2.2}$$

gdje su:

ρ – gustoća fluida [kg/m^3];

P_{sl} – slojni tlak [kPa];

H_{TVD} – stvarna vertikalna dubina [m].

2.4. Dinamički tlak (P_d)

Pod dinamičkim tlakom podrazumijeva se tlak do kojeg dolazi prilikom protjecanja fluida odnosno cirkulacijom kroz protočni sustav. Gibanjem fluida postiže se veći tlak na stijenke sustava u odnosu na statičko stanje. Viša vrijednost tlaka tijekom protjecanja fluida potrebna je za nadvladavanje sile trenja (otpor protjecanju), koja se javlja između fluida i kontaktne površine, a djeluje u smjeru suprotnom od smjera protjecanja. Potreban dinamički tlak, odnosno tlak cirkulacije isplake, ostvaruje se dobavom isplačne pumpe. Kako bi se odredila dostatna vrijednost tlaka cirkulacije, potrebno je uzeti u obzir sljedeće pokazatelje (Crosco d.o.o., 2014.):

- gustoća i viskoznost isplake;
- duljina i unutrašnji promjeri površinske opreme i niza alatki;
- promjer mlaznica;
- zazori između stijenki kanala bušotine i niza alatki;
- dobava.

Dobava ovisi o kapacitetu hoda pumpe i broju hodova u jedinici vremena:

$$Q_p = V_{hod} \times n_{hod} \ [m^3/min] \tag{2.3}$$

gdje su:

Q_p – dobava pumpe [m^3/min];

V_{hod} – volumen jednog hoda pumpe [m^3];

n_{hod} – broj hodova pumpe u jedinici vremena [1/min].

Brzina uzlaznog toka isplake proporcionalna je protoku, a obrnuto proporcionalna površini poprečnog presjeka promatranog segmenta prstenastog prostora:

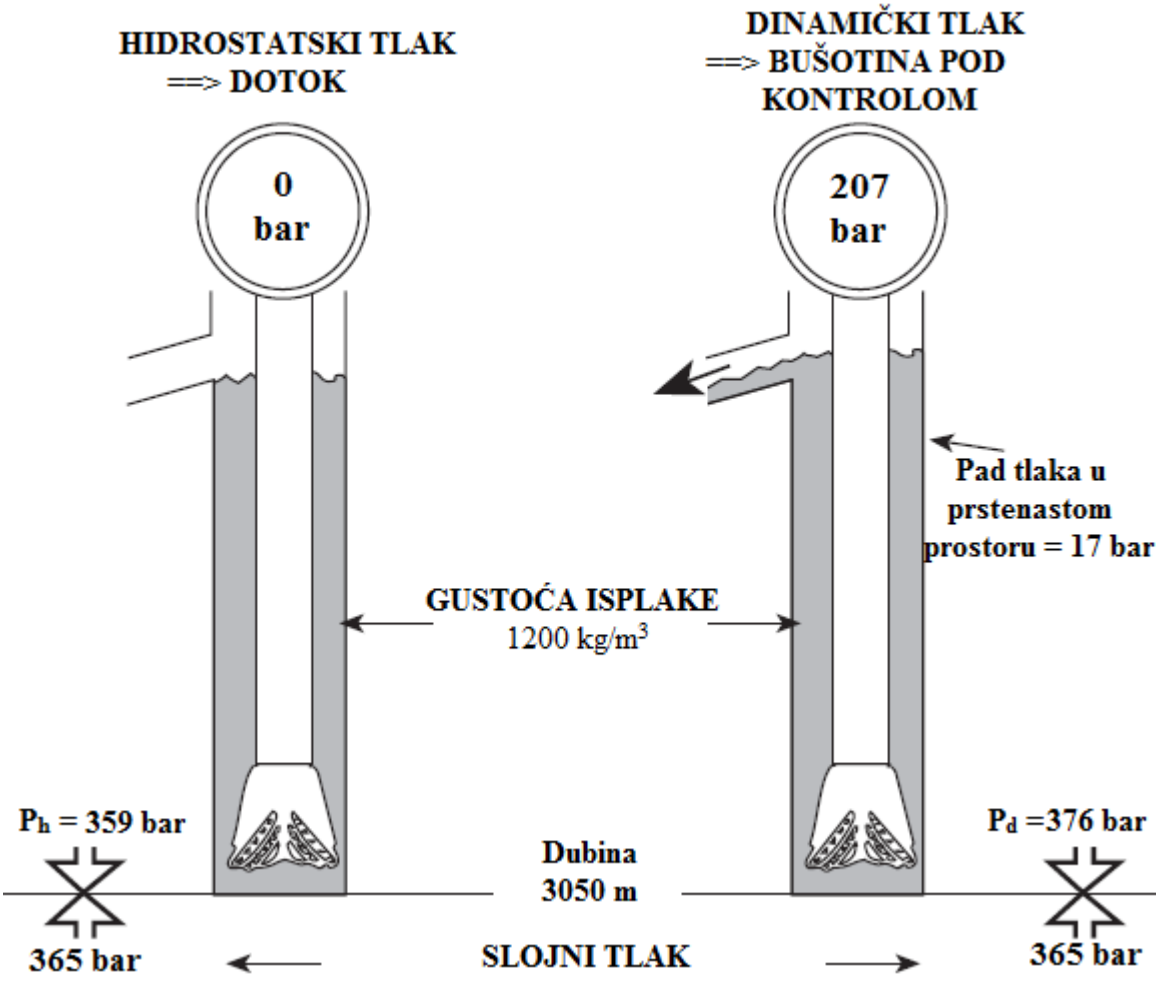
$$v_{pp} = \frac{Q_p}{A_{pp}} \ [m/min] \tag{2.4}$$

gdje je:

v_{pp} – brzina isplake u prstenastom prostoru [m/min];

A_{pp} – površina poprečnog presjeka prstenastog prostora [m^2].

Povećanjem dubine bušotine povećavaju se otpori protiskivanja isplake. Ukoliko se zadrži dobava odnosno količina protiskivanja isplake, smanjit će se sposobnost iznošenja krhotina uzlaznim tokom. Optimalna brzina iznošenja krhotina uzlaznim tokom utvrđuje se proračunom, a u praksi se navodi raspon od 0,63 do 0,83 m/s (Plavec, 1972). Tlak očitan na manometru na izlazu tlačnog voda isplačne pumpe postepeno se troši savladavajući otpore pri protjecanju kroz navedene dijelove sustava, a najveći gubitak je na mlaznicama dlijeta. Ako radni tlak pumpe treba povećati, to se ostvaruje bilo povećanjem broja hodova pumpe ili smanjenjem promjera košuljice cilindra. U slučaju pogrešnog proračuna i posljedično nedovoljnog tlaka kojeg proizvodi pumpa, krhotine se neće djelotvorno iznositi iz bušotine, jer je pokretačka sila nedovoljna da nadvlada otpor protoku (slika 2-1). Ukoliko se pak greška dogodi u drugom smjeru, tlak koji ostvaruje isplaka na stijenke otvorenog kanala i dno može biti dovoljno velik da dovede do frakturiranja stijene i time do gubitka isplake. Posljedica gubljenja isplake je smanjenje tlaka u sustavu, a time i tlaka na dno bušotine što može uzrokovati dotok. Stoga je održavanje dinamičkog tlaka u potrebnim granicama od krucijalne važnosti.



Slika 2-1. Prikaz razlike vrijednosti tlakova na dno bušotine (Aberdeen Drilling School, 2002).

Iz primjera na slici 2-1 vidljivo je da hidrostatički tlak stupca isplake nije dovoljan za kontrolu slojnog tlaka, a za istu isplaku, u dinamičkim uvjetima, bušotina je pod kontrolom. Očitani tlak od 207 bar je dinamički tlak isplake na izlazu iz isplačne pumpe, koji se troši kako isplaka protječe sustavom.

2.5. Ekvivalentna gustoća isplake

Obzirom na otpore protjecanju za vrijeme cirkuliranja isplaka ima prividno veću gustoću nego u statičkim uvjetima. Radi određivanja potrebne gustoće isplake navedeno povećanje opisano je terminom ekvivalentne gustoće isplake (engl. *equivalent circulating density* – ECD). U biti to je efektivna gustoća isplake gdje se stvarnoj gustoći dodaje vrijednost gustoće izračunata zbog otpora prilikom protjecanja isplake prstenastim prostorom od dna do ušća bušotine. Ta je vrijednost kritična kod bušenja, a nadalje i u kontroli tlaka, posebno u slučajevima malih zazora između stijenke kanala bušotine i bušaćeg alata jer su tada veći

otpori protjecanju, a time i veći pad tlaka. Stoga se gustoća isplake potrebna tijekom cirkulacije izračunava prema sljedećoj formuli:

$$\rho_{ECD} = \frac{P_{PTC}}{H_{TVD} \times 0{,}00981} + \rho_i \ \ [kg/m^3] \tag{2.5}$$

gdje su:

ρ_{ECD} – ekvivalentna gustoća isplake u cirkulaciji [kg/m^3];

P_{PTC} – pad tlaka prilikom protjecanja isplake u prstenastom prostoru [kPa];

H_{TVD} – stvarna vertikalna dubina bušotine [m];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3].

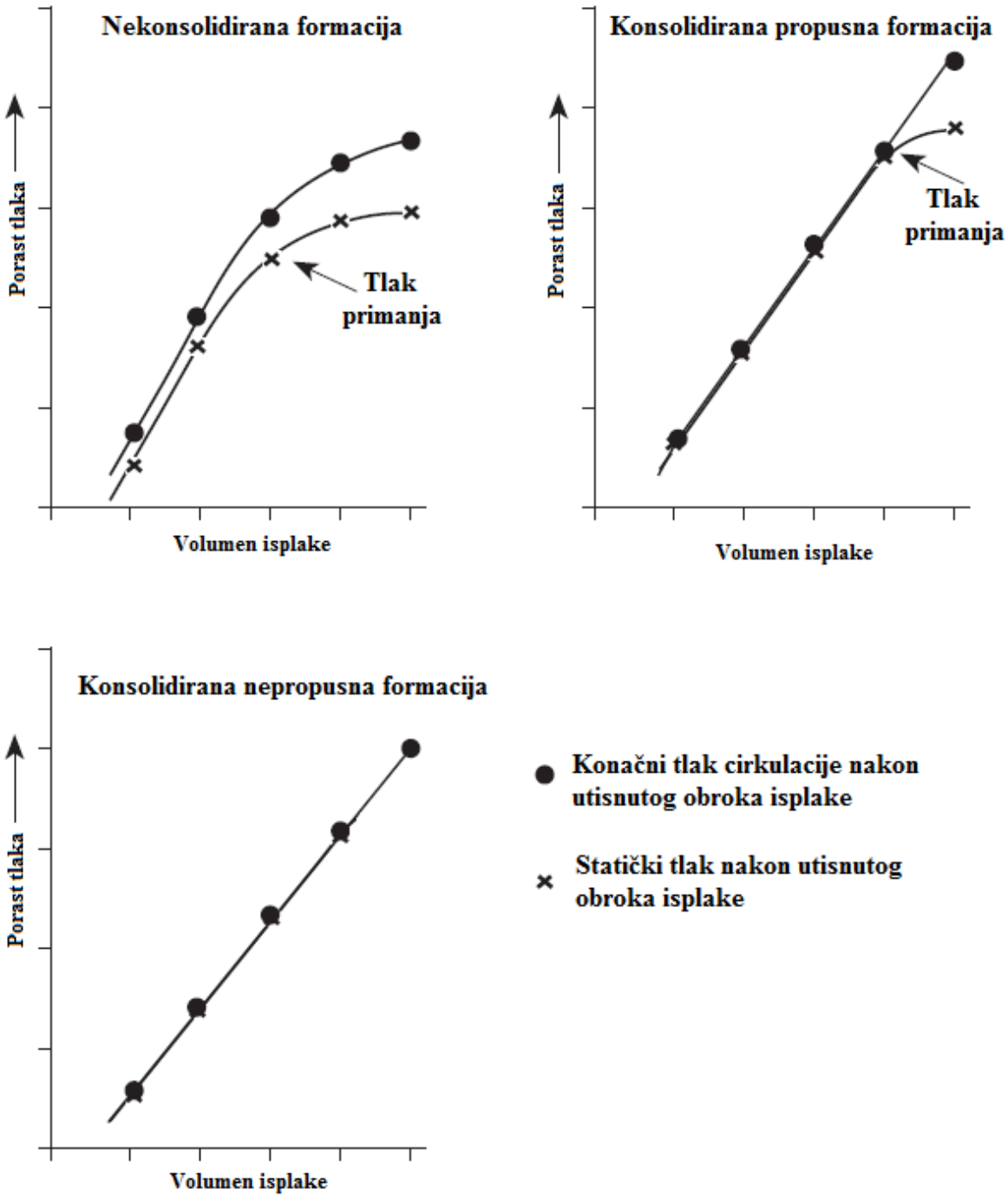
2.6. Tlak frakturiranja

Tlak frakturiranja je tlak pri kojem dolazi do loma formacije. Kada bi tlak u otvorenom djelu kanala bušotine premašio vrijednost tlaka loma naslaga došlo bi do stvaranja trajne frakture, a posljedično tome do gubitka isplake u stijene, smanjenja hidrostatičkog tlaka stupca isplake i gubitka primarne kontrole tlaka. Vrijednost tlaka frakturiranja ovisi o gustoći i vrsti promatrane stijene, a nadalje i o fluidima koje ona sadržava u pornom prostoru.

2.7. Test primanja sloja

Test primanja sloja (engl. *leak of test* – LOT) se provodi kako bi se odredio minimalni tlak pri kojem dolazi do popuštanja sloja. Provodi se u prvom propusnom sloju ispod pete kolone zaštitnih cijevi koji je najkritičniji dio otvorenog dijela kanala bušotine prilikom nastavka bušenja. Provođenjem samog testa provjerava se i kvaliteta cementacije prethodne kolone zaštitnih cijevi, kako ne bi došlo do probijanja isplake iza cementnog kamena. Prije provođenja testa potrebno je probušiti cementacijsku petu i zabušiti u prvi sloj ispod pete kolone zaštitnih cijevi. Isplaka se kondicionira i iscirkulira prstenastim prostorom. Test primanja sloja se provodi tako da se bušotina zatvara i hermetizira, a nakon toga se kondicionirana isplaka polagano utiskuje u zatvorenu bušotinu, uz očitavanje porasta tlaka. Za utiskivanje isplake se najčešće koristi cementacijski agregat jer omogućuje jedinično utiskivanje isplake smanjenom dobavom. Kako se utiskuju obroci isplake tako se grafički bilježi odnos utisnutog volumena i rezultirajućeg tlaka utiskivanja. Kada povećanje tlaka prestaje biti linearno točka infleksije obilježava tlak prilikom kojeg je došlo do popuštanja sloja. Taj tlak se definira kao minimalni tlak frakturiranja, utiskivanje se zaustavlja, tlak se

otpušta, a osim tlaka se bilježi i volumen izgubljene isplake, ako je do gubitka došlo. U nekonsolidiranim ili visoko propusnim formacijama može doći do gubitka isplake već pri nižim tlakovima te će tlak pasti čim se isključi pumpa što onemogućava provođenje testa za takve formacije (slika 2-2).



Slika 2-2. Prikaz idealiziranih grafova testa primanja formacije za konsolidirane i nekonsolidirane formacije (Aberdeen Drilling School, 2002).

Iz navedenog grafa za konsolidiranu i nepropusnu formaciju je vidljivo da do frakturiranja neće doći bez obzira na povećanje tlaka.

2.8. Maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine (MDTUB)

Govoreći o tlakovima koji ograničavaju dozvoljene vrijednosti tlaka u bušotini, osim tlaka sloja i dinamičkog tlaka uslijed cirkulacije, važan je i maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine. To je najveći tlak kojeg bušotina sa svom opremom može izdržati kad je napunjena fluidom određene, unaprijed poznate gustoće, a ovisi o vrijednosti tlaka dobivenog testom primanja sloja objašnjenim u prethodnom potpoglavlju. Za svaku sljedeću gustoću isplake se mora ponovno računati MDTUB. Raspon dozvoljenih gustoća isplaka kreće se od već opisane minimalne vrijednosti gustoće isplake, koja proizlazi iz potrebnog diferencijalnog tlaka, pa do maksimalne dozvoljene gustoće isplake koja se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$\rho_{MD} = \frac{P_{LOT}}{H_{PK} \times 0{,}00981} + \rho_{LOT} \ \ [kg/m^3] \tag{2.6}$$

gdje su:

ρ_{MD} – maksimalno dozvoljena gustoća isplake [kg/m^3];

P_{LOT} – tlak primanja sloja očitan na površini [kPa];

H_{PK} – vertikalna dubina pete kolone [m];

ρ_{LOT} – gustoća isplake za vrijeme testa primanja sloja [kg/m^3];

Maksimalni dopušteni tlak na ušću bušotine se onda računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{MDTUB} = (\rho_{MD} - \rho_i) \times H_{PK} \times 0{,}00981 \ \ [kPa] \tag{2.7}$$

gdje su:

P_{MDTUB} – maksimalni dopušteni tlak u bušotini [kPa];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3].

3. UZROCI DOTOKA

Dotok (engl. *kick, influx*) je neželjena pojava utoka slojnih fluida u kanal bušotine, a glavni uzrok je nedovoljan tlak stupca isplake u razini propusne naslage u otvorenom kanalu bušotine. S dotokom slojnog fluida u bušotinu počinje i prelijevanje isplake. Dotok predstavlja opasnost i uvertira je za svaku erupciju, te je stoga bitno poznavati njegove uzroke. Uzroci dotoka su sljedeći (Saudi Aramco, 2002):

1) tijekom manevra: - nedovoljno punjenje pri vađenju/spuštanju alata,
   - klipovanje (engl. *swabbing*),
   - hidraulički udar (engl. *pressure surge*);
2) nedovoljna gustoća isplake;
3) gubitak dinamičke komponente tlaka na dno bušotine;
4) slojevi s povećanim ili anormalnim tlakom;
5) gubitak isplake.

Bez obzira o kojem se uzroku, ili kombinaciji više njih radi, jednom kad je dotok uočen bušotina se na ušću mora čim prije zatvoriti pomoću preventera kako bi se volumen dotoka sveo na najmanju moguću mjeru.

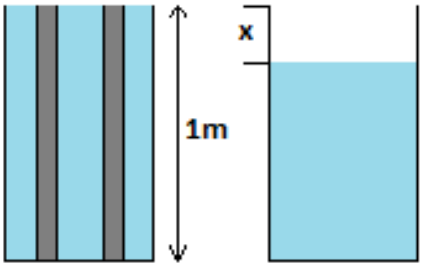
3.1. Dotok tijekom manevra

Neovisno o razlogu zbog kojeg se išlo u manevar, jedan od najčešćih uzroka dotoka je nedovoljno punjenje bušotine isplakom prilikom vađenja ili spuštanja šipki i/ili bušaćeg alata (Crosco d.o.o., 2014), odnosno o kakvom tipu vađenja je riječ. Razlikuju se „MOKRO“ i „SUHO“ vađenje alata. Kod mokrog vađenja alata šipke su ispunjene isplakom, pa je potrebno nadomjestiti volumen punog presjeka šipki. Razlog može biti protupovratni ventil u sastavu alata ili možda čepljenje mlaznica dlijeta. Kod suhog vađenja u proračun za punjenje ulazi samo volumen izvađenog čelika alata. Za izračunavanje teoretskih volumena za nadopunjavanje i maksimalno dozvoljenog pada razine isplake u prstenastom prostoru potrebno je poznavati sljedeće vrijednosti (Crosco d.o.o., 2014):

- jedinični volumen čelika bušaćih i teških bušaćih šipki [m^3/m];
- jedinični volumen čelika teških šipki [m^3/m];
- jedinični vanjski volumen bušaćih i teških šipki (volumen koji istisne zatvorena cijev) [m^3/m];

- maksimalno dozvoljeni pad nivoa isplake za određeno okruženje [m];
- broj pasova bušaćeg alata za maksimalno dozvoljeni pad nivoa isplake itd.

Za vrijeme dok se šipke još nalaze u kanalu bušotine volumen kanala jednak je zbroju volumena čelika i volumena isplake. Nakon suhog vađenja šipki nivo isplake u kanalu je niži za vrijednost x (slika 3-1).



Slika 3-1. Pad nivoa isplake kod „suhog“ vađenja.

Razlika u visini stupca isplake odnosno pad nivoa omjer je volumena čelika i ukupnog volumena isplake:

$$x = \frac{V_{\check{c}}}{V_i}$$

gdje su:

$V_{\check{c}}$ – volumen čelika;

V_i – volumen isplake.

Volumen isplake odgovara razlici unutarnjeg volumena kolone zaštitnih cijevi i volumena čelika:

$$V_i = V_{KZC} - V_{\check{c}}$$

gdje je:

V_{KZC} – volumen kolone zaštitnih cijevi ili rajzera.

Iz čega slijedi:

$$x = \frac{V_{\check{c}}}{V_{KZC} - V_{\check{c}}}$$

Navedeni volumeni mogu biti izraženi po metru duljine kanala ili kao ukupni volumeni u kanalu bušotine, a omjer x vrijedi za oba slučaja. Radi praktičnosti koriste se jedinični volumeni. Uvrštavanjem pada nivoa umjesto dubine u jednadžbi za hidrostatički tlak slijedi:

$$x = \frac{P_h}{\rho \times g}$$

Izjednačavanjem tih dvaju izraza slijedi:

$$\frac{\Delta P}{\rho \times g} = \frac{V_č}{V_{KZC} - V_č}$$

Prema čemu je hidrostatički tlak koji se mora nadomjestiti, odnosno pad tlaka na dno bušotine po metru izvađenih alatki kod suhog vađenja:

$$\Delta P_{SV} = \frac{\rho_i \times V_č'}{V'_{KZC} - V_č'} \times 0{,}00981 \ \ [kPa/m] \tag{3.1}$$

gdje su:

ΔP_{SV} – pad tlaka pri suhom vađenju alatki [kPa/m];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3];

$V_č'$ – jedinični volumen čelika [m^3/m];

V'_{KZC} – jedinični volumen kolone zaštitnih cijevi ili rajzera [m^3/m].

Poznavajući vrijednost nadtlaka koji se ostvaruje na sloj tj. diferencijalnog tlaka, prema jednadžbi (3.2) može se izračunati kolika se duljina šipki može izvaditi dok se ne izgubi nadtlak tijekom suhog vađenja:

$$l_{iš} = \frac{P_{nt} \times (V'_{KZC} - V'_č)}{\Delta P_i \times V'_č} \ \ [m] \tag{3.2}$$

gdje su:

$l_{iš}$ – duljina izvađenih šipki dok se ne izgubi nadtlak [m];

P_{nt} – vrijednost nadtlaka na sloj ili diferencijalni tlak [kPa];

V'_{KZC} – jedinični volumen kolone zaštitnih cijevi ili rajzera [m^3/m];

$V_č'$ – jedinični volumen čelika [m^3/m];

ΔP_i – gradijent hidrostatičkog tlaka isplake [kPa/m].

Pad nivoa isplake u bušotini prilikom suhog vađenja (preostalih) teških šipki se računa prema izrazu:

$$H_{pn} = \frac{l_{t\check{s}} \times V'_{\check{c}}}{V'_{KZC}} \ [m] \tag{3.3}$$

gdje je:

H_{pn} – pad nivoa isplake [m].

Kako bi se osiguralo suho vađenje u bušaće šipke se prije vađenja utiskuje obrok otežane isplake (engl. *pill*), čija je uloga istiskivanje iz šipki isplake koja je prije toga korištena kod bušenja. Volumen otežane isplake (V_t) izračunava se prema jednadžbi:

$$V_{pill} = \frac{H_{pn\check{z}} \times V'_{b\check{s}} \times \rho_i}{\rho_{oi} - \rho_i} \ [m^3] \tag{3.4}$$

gdje su:

V_{pill} – potrebni volumen otežanog obroka isplake za istiskivanje [m^3];

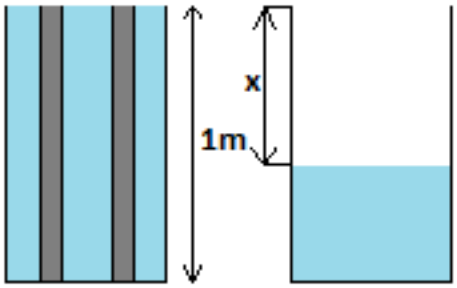
$H_{pnž}$ – željeni pad nivoa u bušaćim šipkama [m];

$V'_{bš}$ – jedinični volumen unutar bušaćih šipki [m^3/m];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3];

ρ_{oi} – gustoća otežane isplake [kg/m^3].

Ako je iz bilo kojeg razloga suho vađenje alatki onemogućeno, potrebno je prići s još većim oprezom proračunu volumena za vrijeme mokrog vađenja, kako ne bi došlo do dotoka. Prilikom mokrog vađenja, budući da su šipke pune isplake, volumen isplake za nadopunjavanje je, ovisno o jediničnom obujmu, i do tri puta veći nego kod suhog vađenja (Crosco d.o.o., 2014). Stoga je i jedinični pad stupca isplake u kanalu bušotine veći (slika 3-2).



Slika 3-2. Pad nivoa isplake kod „mokrog“ vađenja.

Pad nivoa kod mokrog vađenja iznosi:

$$x = \frac{V_{č} + V_{uš}}{V_{KZC} - V_{č} - V_{uš}}$$

gdje je:

$V_{uš}$ – volumen unutar šipki.

Izjednačavanjem s izrazom dobivenim iz formule za hidrostatički tlak, te uvrštavanjem volumena punog presjeka profila šipki, dobiva se jednadžba za pad tlaka pri mokrom vađenju, a ona glasi:

$$P_{MV} = \frac{\rho_i \times V'_{ppš}}{V'_{KZC} - V'_{ppš}} \times 0{,}00981 \ \ [kPa/m] \tag{3.5}$$

gdje su:

P_{MV} – pad tlaka pri mokrom vađenju alatki [kPa/m];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3];

$V'_{ppš}$ – jedinični volumen punog presjeka/profila šipki [m^3/m];

V'_{KZC} – unutarnji jedinični volumen kolone zaštitnih cijevi ili rajzera [m^3/m].

Duljina šipki koja se mokrim vađenjem može izvaditi dok se ne izgubi nadtlak računa se kao i kod suhog vađenja, samo što umjesto volumena čelika u proračun ulazi volumen punog profila šipki. Zato je duljina koja se može tako izvaditi, dok se ne izgubi nadtlak, znatno manja (ako se bušotina odmah ne nadopunjava), a jednadžba glasi:

$$l_{iš} = \frac{P_{nt} \times (V'_{KZC} - V'_{ppš})}{\Delta P_i \times V'_{ppš}} \ \ [m] \tag{3.6}$$

gdje su:

$l_{iš}$ – duljina izvađenih šipka dok se ne izgubi nadtlak [m];

P_{nt} – vrijednost nadtlaka na sloj ili diferencijalni tlak [kPa];

V'_{KZC} – jedinični volumen kolone zaštitnih cijevi ili rajzera [m^3/m];

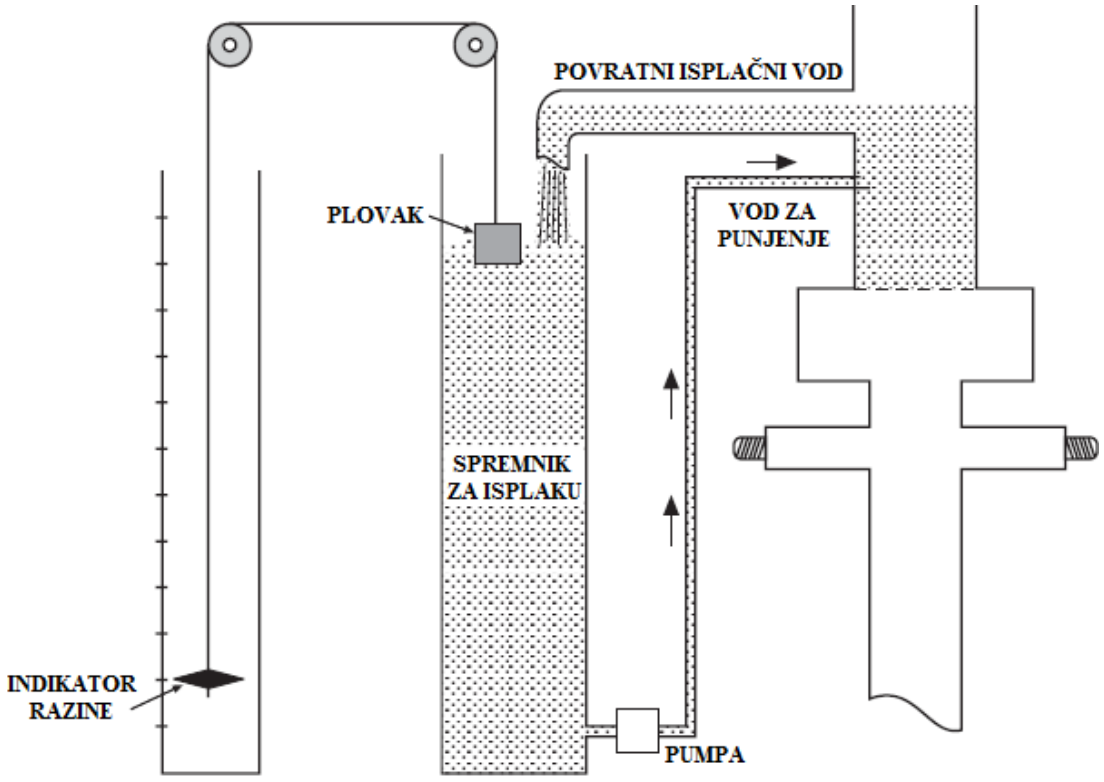
$V'_{ppš}$ – jedinični volumen punog presjeka/profila šipki [m^3/m];

ΔP_i – gradijent hidrostatičkog tlaka isplake [kPa/m].

Slično prethodnom, pad nivoa isplake u bušotini prilikom mokrog vađenja (preostalih) teških šipki se računa prema sljedećem izrazu:

$$H_{pn} = \frac{l_{tš} \times V'_{ppš}}{V'_{KZC}} \ [m] \tag{3.7}$$

Nadalje, bušotina bi morala uvijek biti puna. Zato se volumeni moraju pomno proračunati, a u isplačnim bazenima mora biti pripremljeno dovoljno isplake za nadomjestiti volumen izvađenog alata, čak i ako se iz bilo kojeg razloga radi o mokrom vađenju alata. Kako bi se osiguralo da bušotina bude stalno puna, najbolje bi bilo nadopunjavati ju kontinuirano iz posebnih spremnika s mogućnošću preciznog određivanja utisnutih ili povratnih volumena isplake (engl. *trip tank*) (slika 3-3).



Slika 3-3. Shema kontinuiranog nadopunjavanja bušotine isplakom (Aberdeen Drilling School, 2002).

3.1.1. Efekti klipovanja i hidrauličkog udara

Prilikom izvlačenja alata dolazi do efekta klipovanja (engl. *swabbing*) koji uzrokuje privremeni pad tlaka na dno bušotine zbog malog zazora u prstenastom prostoru između dlijeta i stabilizatora i stijenki kanala bušotine, kao i trenja između alatki i isplake. Bušaće alatke djeluju kao klip i isplaka teži da se podiže zajedno s njima. Kritični trenutak je sam početak izvlačenja alatki, a intenzitet pada tlaka na dno će biti veći ako je:

- velika čvrstoća gela i viskoznost isplake;
- mali zazor između stijenki kanala i niza bušaćih alatki – uzrok može biti predebeli isplačni oblog, obljepljivanje alata glinom i krhotinama razrušenih stijena, te kod nepovoljnog odnosa promjera kanala i teških šipki;
- ugrađen protupovratni ventil u niz bušaćih šipki;
- velika brzina izvlačenja alatki;
- velika duljina niza alatki.

Stoga se uobičajeno primjenjuje sigurnosni faktor (engl. *trip margin*), u ovisnosti o reološkim svojstvima isplake i zazora u prstenastom prostoru, kako bi se isplaka prije

manevra alatkama prema potrebi dodatno otežala za tu vrijednost, a računa se prema sljedećoj jednadžbi (Lapeyrouse, 2002):

$$\rho_{sf} = \frac{\tau_0}{2{,}01 \times (D_{kb} - D_{bš})} \ [kg/m^3] \tag{3.8}$$

gdje su:

ρ_{sf} – sigurnosna vrijednost za koju se mora povećati postojeća gustoća isplake [kg/m^3];

τ_0 – naprezanje pri pokretanju isplake [Pa];

D_{kb} – promjer kanala bušotine [m];

$D_{bš}$ – promjer bušaćih šipki [m].

Ako je nepoznata vrijednost naprezanja pri pokretanju isplake, za sigurnosni faktor uzima se vrijednost u ovisnosti o padu tlaka prilikom protjecanja isplake prstenastim prostorom i stvarnoj vertikalnoj dubini bušotine, kao i kod izračuna ekvivalentne gustoće cirkulacije.

Prilikom bušenja u odobalju (engl. *offshore drilling*) komunikacija između ušća bušotine na dnu mora i platforme ostvaruje se konduktor kolonom ili pomoću rajzer cijevi (engl. *marine riser*). Odspajanjem rajzera gubi se nadtlak stupca fluida iz rajzera te je zbog toga uveden sigurnosni faktor (engl. *riser margin*) ovisan o dubini mora odnosno duljini rajzera. Što je veća dubina mora na kojoj se ušće bušotine nalazi time će rasti i sigurnosni faktor za koji se gustoća isplake mora povećati. Stoga treba biti oprezan kod velikih dubina mora kako se ne bi prekoračio maksimalni dopušteni tlak u sustavu odnosno tlak frakturiranja ispod pete kolone. Sigurnosni faktor računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\rho_{sf} = \frac{(l_{ri} \times \rho_i) - (H_m \times \rho_m)}{H_{TVD} - l_{ri}} \ [kg/m^3] \tag{3.9}$$

gdje su:

l_{ri} – duljina rajzer cijevi [m];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3];

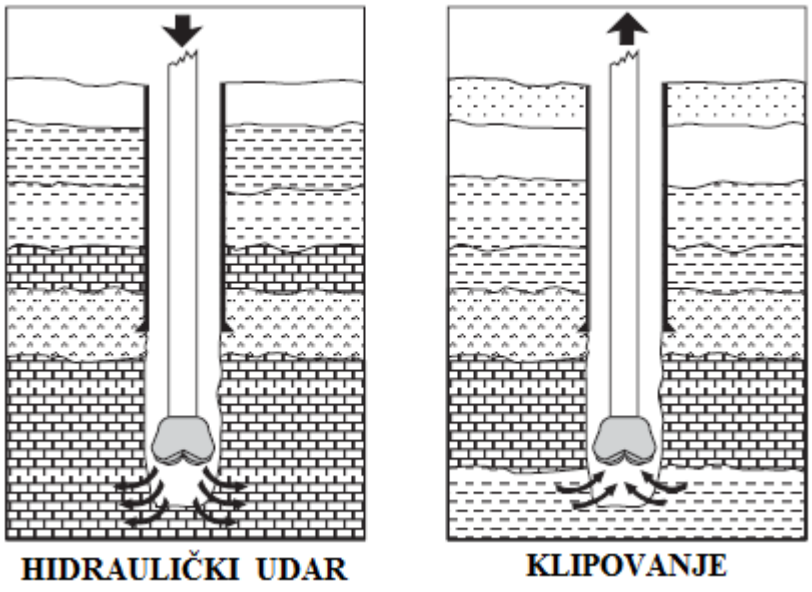
H_m – dubina mora [m];

ρ_m – gustoća mora [kg/m^3];

H_{TVD} – stvarna vertikalna dubina bušotine [m].

Istovjetan efekt pri spuštanju alatki se manifestira povećanjem tlaka na dno. Taj se efekt naziva hidraulički udar (engl. *surging*). Njegova vrijednost proporcionalna je ubrzanju masa tekućine i trenju pri pokretanju isplake, a ako premaši čvrstoću stijene dođi će do frakturiranja. Uslijedit će gubitak isplačnog fluida, možda i optoka isplake pri čemu će se stupac isplačnog fluida smanjivati, a time i tlak na dno. Praćenje volumena isplake koji izlazi iz bušotine i usporedbom s teoretskim, najbrže će se zaključiti da dolazi do njezinog gubitka. Ako se gubitak ne primijeti na vrijeme, a bušotina ne nadopunjava, gotovo sigurno će doći do dotoka. Kako bi se izbjegle neželjene pulzacije tlaka pri spuštanju bušaćih alatki treba (Borzatti i Grdešić, 1972):

- redovito upotrebljavati hidrauličku kočnicu;
- lagano i jednolično ubrzavati alatke;
- spuštati jednoličnog brzinom;
- ukloniti protupovratni ventil iz bušaćeg niza;
- izbjegavati brze, kratke manevre alatkama prije početka rada dlijeta na dnu.



Slika 3-4. Shematski prikaz efekata hidrauličkog udara i klipovanja (Aberdeen Drilling School, 2002).

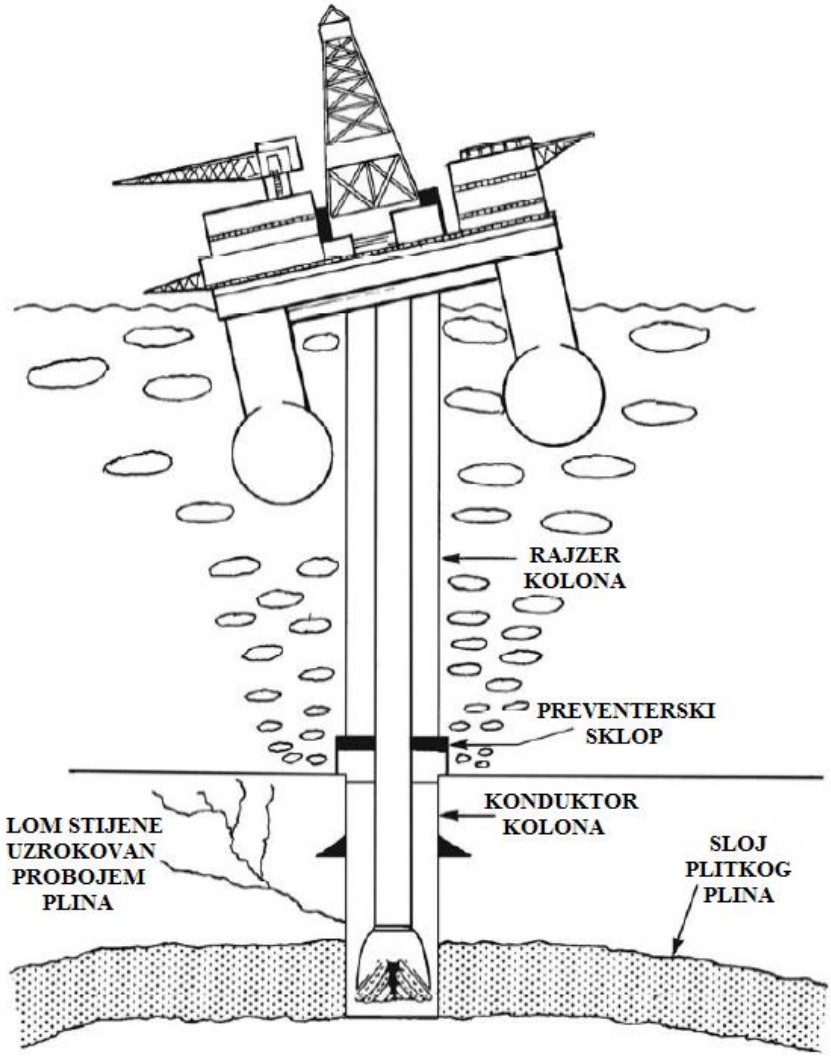
3.2. Slojevi pod povećanim tlakom

Jedan od teško predvidivih razloga i uzroka dotoka je nailazak na sloj sa znatno povećanim tlakom u odnosu na projektom predviđene vrijednosti. Postoje neposredni i posredni

pokazatelji dotoka, kao što su povećanje brzine bušenja, pojava plina u isplaci, krhotine koje sadrže plin, porast temperature isplake i sl., no jednom kad se takav sloj nabuši može biti prekasno. Pod anormalno visokim tlakom misli se na formacije u kojima je npr. voda pod većim tlakom nego što bi njezin hidrostatički tlak na toj dubini trebao biti. Njihova nepredvidivost se očituje u tome što se na takav sloj može naići i na relativno malim dubinama u bušotini, pa sve do dubina većih od nekoliko tisuća metara. Razlozi postojanja takvih slojeva su kombinacija geoloških, fizikalnih, geokemijskih i mehaničkih procesa nastajanja stijena tijekom geološke povijesti. Kako je već opisano, anormalno visokim tlakom se smatra tlak viši od hidrostatičkog za promatrani fluid na određenoj dubini. Pritom se misli na gradijente tlaka veće od 0,1 bar/m do 0,23 bar/m. U nekim dijelovima svijeta su čak zabilježeni gradijenti od 0,3 bar/m i viši, no to su rjeđi slučajevi i uglavnom su lokalnog karaktera (Aberdeen Drilling School, 2002). Nadalje postoje ležišne formacije koje su pretežno građene od bubrivih glina koji ekspanzijom u doticaju s vodom povećavaju tlak slojnih fluida iznad normalnih razina.

3.2.1. Plinske leće

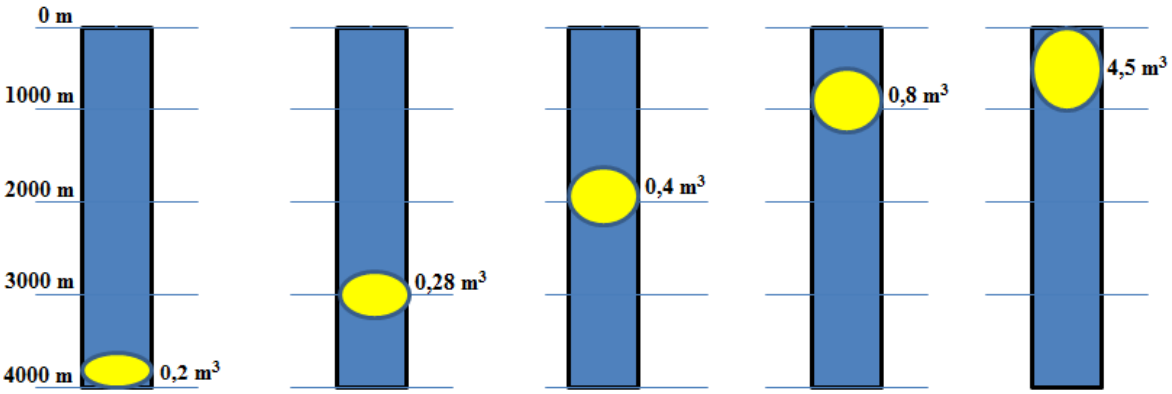
Jedan od češćih slučajeva susretanja s povećanim tlakovima, uglavnom pri bušenju u odobalju, a ujedno i jedan od najopasnijih je nabušivanje plitkih plinskih leća (engl. *shallow gas formations*). Brojni su slučajevi kroz povijest naftne industrije gdje je nailazak na plinsku leću bio koban po bušotinu, a i ljudstvo. Opasnost se očituje u brzom širenju plina prema površini i posljedičnom povećanju tlaka u sustavu. Zbog toga se bušotina ne smije zatvarati na klasičan način korištenjem preventera jer se riskira fraktura formacije zbog povišenog tlaka i/ili proboj plina iza nabijene ili cementirane konduktor kolone. Kao posljedica proboja plina može doći do smanjenja nosivosti morskog dna i prevrtanja platforme (slika 3-5). Stoga se plin kontrolira na način da ga se preusmjerava dalje od postrojenja korištenjem divertera. Plinske leće se, kako je rečeno, najčešće pojavljuju kod odobalnog bušenja te je u ranoj fazi izrade bušotine primjena divertera neizostavna.



Slika 3-5. Proboj plina iza konduktor kolone (Rig Train, 2001).

3.2.2. Pliniziranje isplake i jedinica za operativni geološki nadzor

Svrha jedinice za operativni geološki nadzor (engl. *mud logging unit*) bušotine je pored kontrole tehnoloških pokazatelja, analiza geoloških pokazatelja i analiziranja svih plinskih pojava tijekom bušenja. Odatle i stariji naziv – jedinica za plinsku karotažu. Zaplinjenoj isplaci pada gustoća, a samim time i hidrostatički tlak na stijenke kanala bušotine. Zbog velike razlike u gustoći plin relativno brzo migrira prema površini, a kako je stupac isplake koji djeluje na njega manji, tim više ekspandira. Na početku je ekspanzija vrlo spora, ali se naglo ubrzava približavanjem dotoka plina površini. Ako se tlak smanji na polovinu vrijednosti, volumen plina će se udvostručiti (slika 3-6).



Slika 3-6. Shematski prikaz povećanja volumena (ekspanzije) plina.

Kako se plin kreće prema površini sa sobom nosi slojni tlak. Kako se podiže, u zatvorenoj bušotini raste tlak, a time i tlak na dno. Ako se tlak ne otpušta na sapnici za prigušivanje doći će do loma formacije i gubitka isplačnog fluida. Kao mjera promjene gustoće isplake zaplinjenost se izražava dijelovima jedinice, a računa se prema sljedećoj formuli:

$$Z_i = \frac{\rho_i - \rho_{iz}}{\rho_i} \times 100 \ \ [\%] \tag{3.9}$$

gdje su:

Z_i – zaplinjenost isplake [%];

ρ_i – gustoća isplake na ulazu u bušotinu [kg/m^3];

ρ_{iz} – gustoća isplake na izlazu iz bušotine [kg/m^3].

Brzina kojom plin migrira prema površini ovisi o porastu tlaka i gustoći isplake. Najčešća vrijednost je oko 300 m/h, no u ekstremnim slučajevima može se kretati i do 600 m/h (Crosco d.o.o., 2014). Brzina migracije plina računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$v_{mp} = \frac{\Delta P_š}{\rho_i \times 0{,}00981} \ \ [m/h] \tag{3.10}$$

gdje su:

v_{mp} – brzina migracije plina [m/h];

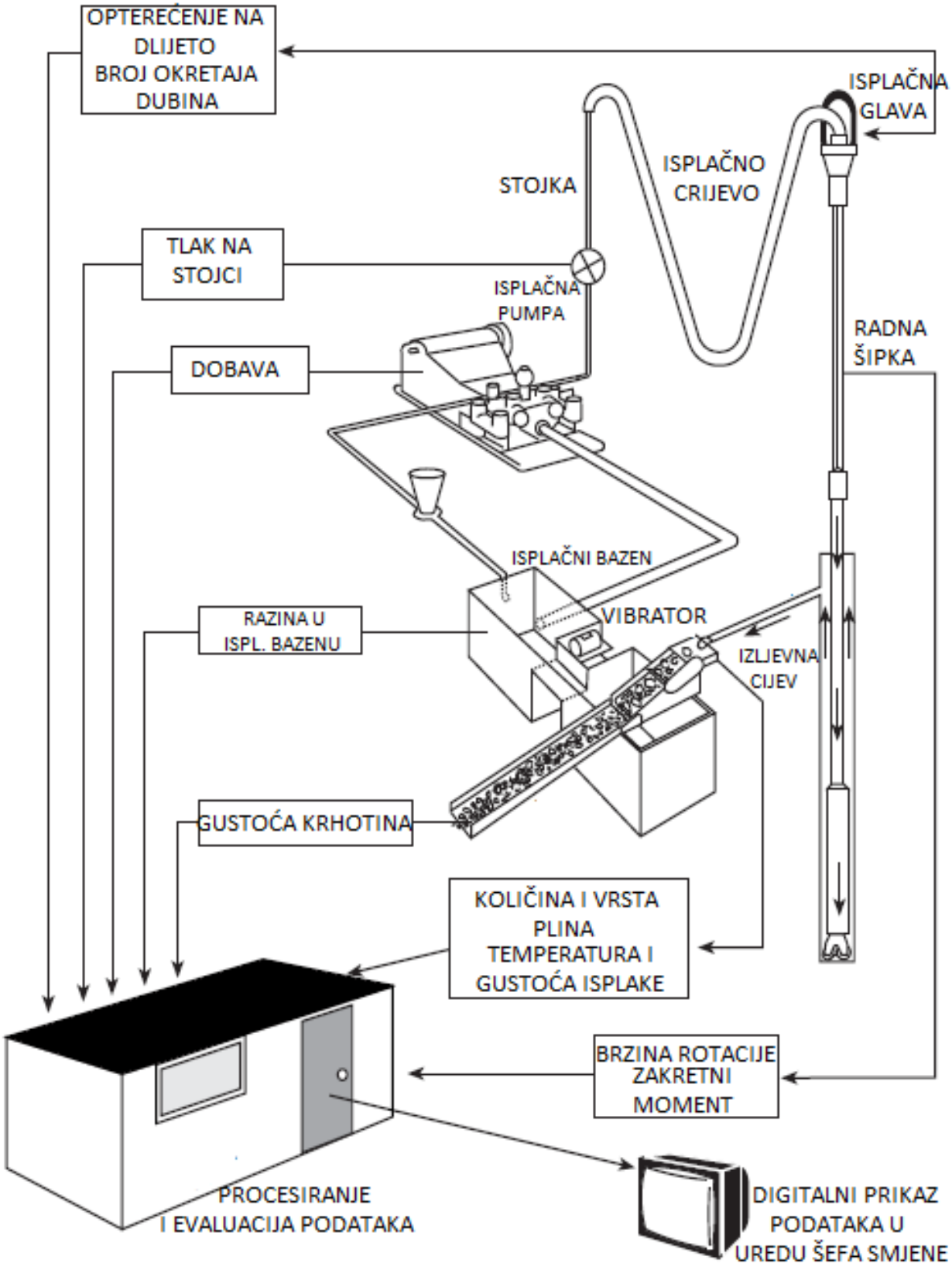
$\Delta P_š$ – porast tlaka plina na šipkama u jedinici vremena [kPa/h];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3].

Prisustvo plina je stoga bitno uočiti čim prije kako bi se proveli odgovarajući postupci i poduzele mjere za otplinjavanje isplake. Oprema za operativni geološki nadzor ima višestruku namjenu, a varira od jednostavnog praćenja bušotinskih pokazatelja do sofisticirane računalne podrške i modeliranja pojedinih pokazatelja, a neke od standardnih zadataka jedinice su (slika 3-7):

- detekcija plina u isplaci;
- analiza plina;
- analiza gustoće krhotina;
- bilježenje ulazne i izlazne gustoće isplake;
- bilježenje ulazne i izlane temperature isplake;
- praćenje parametara režima bušenja i brzine bušenja;
- trend tlaka u porama stijene itd.

Neki od navedenih podataka i parametara služe kao posredni pokazatelji dotoka, a iskusni bušač će pomoću njih na vrijeme prepoznati da je došlo do dotoka i zatvaranjem bušotine spriječiti daljnje dotjecanje slojnih fluida u kanal bušotine. Jedinica za geološki nadzor obavezno se primjenjuje tijekom istražnog bušenja, a usprkos povećanom trošku poželjna je i kod razradnog bušenja.



Slika 3-7. Shematski prikaz jedinice za operativni geološki nadzor (Aberdeen Drilling School, 2002).

3.3. Posebni slučajevi kada je moguća pojava dotoka

1) **Iskušavanja bušotine (DST)**

   Iskušavanje bušotine (engl. *drill stem test* – DST) odnosno ležišta je ispitivanje koje se provodi tijekom izrade bušotine. Cilj ispitivanja je prouzročiti dotok kako bi se odredila potencijalna produktivnost bušotine i protok. Test se provodi pomoću sklopa alatki spuštenih na nizu bušaćih šipki, a sastoji se od dubinske brtvenice ili pakera, perforirane cijevi, komore za skupljanje uzoraka slojnih fluida, ventila za regulaciju protoka, dubinskih sapnica i manometra. Dubinska brtvenica postavlja se u položaj brtvljenja iznad i ispod formacije koja se želi ispitivati u svrhu njezine izolacije te se pušta dotok slojnih fluida u prstenasti prostor i dio bušaćih šipki ili tubinga. Nakon završetka ispitivanja sloj se mora dovesti pod primarnu kontrolu, a ukoliko se tomu ne pristupi s dovoljnom pažnjom, posljedično može doći do erupcije.

2) **Ulazak u pridruženi kanal**

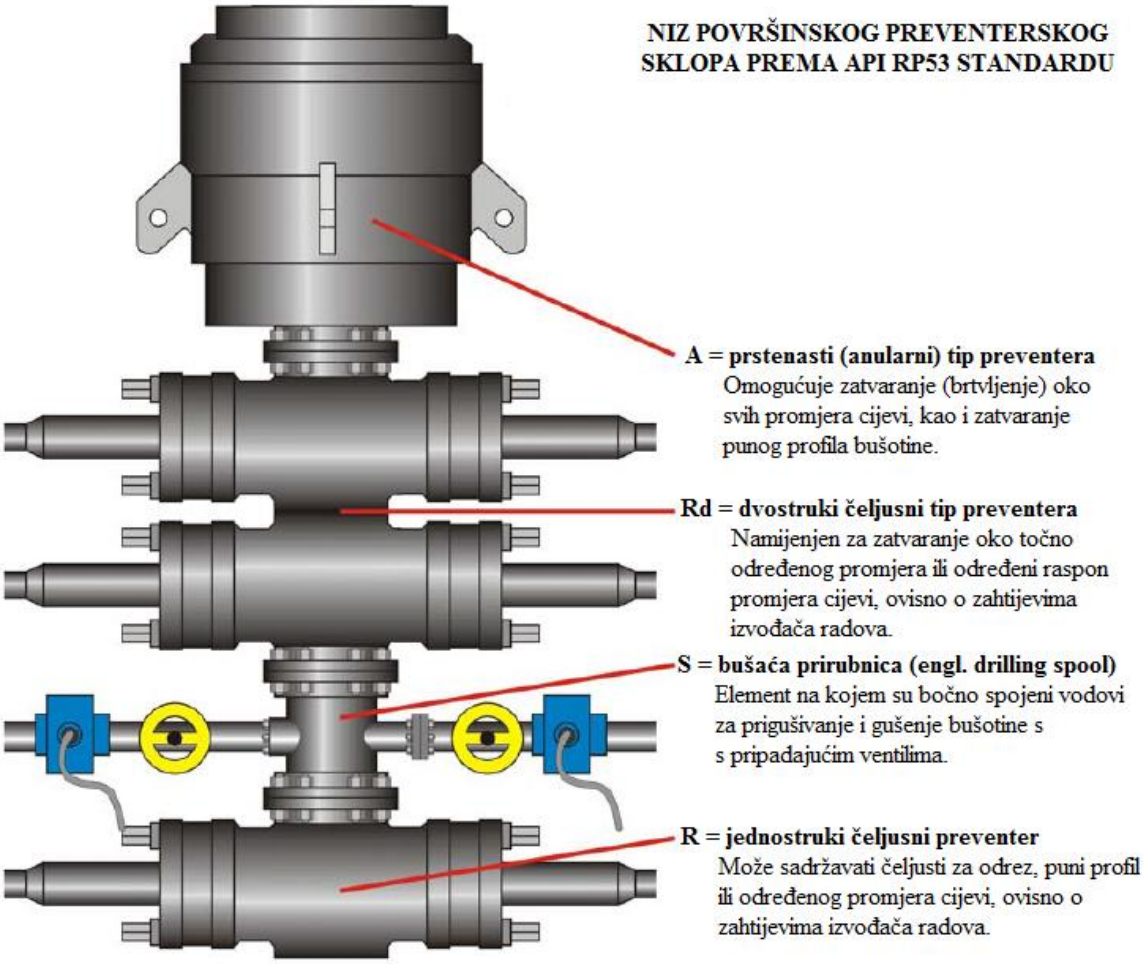
   Nabušivanje pridruženog ili susjednog kanala bušotine predstavlja potencijalni problem kada je gusta mreža bušotina na manjoj površini, a posebice kod odobalnog bušenja kada se buši veliki broj bušotina s iste platforme. Slučajnim ulaskom u kanal susjedne bušotine koja je već opremljena i u fazi proizvodnje, doći će do dotoka slojnih fluida u kanal bušotine u izradi. Ako se navedeno dogodi na relativno maloj dubini može doći do erupcije koju se neće moći kontrolirati. Zato se kod guste mreže bušotina mora pomno paziti na odstupanja od projektirane trajektorije bušotine.

3) **Povećana brzina bušenja kroz plinonosne pješčenjake**

   Bušenjem kroz plinonosne slojeve može doći do postepenog i u početku teško uočljivog zaplinjavanja isplake. Krhotine stijena u porama mogu sadržavati plin koji se može otpuštati kako se uzdižu prstenastim prostorom prema površini. Intenzitet zaplinjavanja isplake ovisi o mehaničkoj brzini bušenja, poroznosti i propusnosti formacije, neovisno o gustoći isplake. Mali pad tlaka na dno se iznenada može pretvoriti u veći, a posljedično dolazi i do dotoka. Stoga se isplaka mora konstantno pročišćavati, a krhotine razrušenih stijena analizirati. Najbolje bi bilo da na postrojenju postoji jedinica za operativni geološki nadzor u funkciji.

4. SEKUNDARNA KONTROLA TLAKA

Odgovarajuća vrijednost gustoće isplake koja svojim hidrostatičkim stupcem drži nadtlak u odnosu na slojni tlak je sredstvo primarne kontrole tlaka. Prelijevanje isplake tijekom dodavanja, kada su pumpe isključene, te povećanje razine u isplačnim bazenima su neposredni pokazatelj dotoka na koji treba hitno, bez odlaganja, reagirati zatvaranjem bušotine. Svrha sekundarne kontrole tlaka je spriječiti daljnji dotok fluida u kanal bušotine, kako ne bi posljedično došlo do erupcije, a kao sredstva služe sve mehaničke barijere u sustavu (npr. cementni kamen, brtva na vješalicama zaštitnih cijevi, PPV) od kojih je najvažniji sklop preventera na ušću bušotine. Zatvaranje bušotine naređuje vođa smjene, a ona se na ušću zatvara preventerom unutar preventerskog sklopa čiji je sastav određen na temelju maksimalnog očekivanog radnog tlaka u bušotini. Preventeri moraju omogućiti zatvaranje bušotine u svim slučajevima, nalazio se bušaći alat u bušotini ili ne. Nadalje, ako se bušaći alat nalazi u bušotini, mora se omogućiti njegovo kretanje pod tlakom, a u krajnjoj mjeri odrez. Osnovne dijelove klasičnog površinskog preventerskog sklopa čine čeljusni i prstenasti preventeri, te vodovi za prigušivanje (engl. *choke line*) i gušenje (engl. *kill line*) bušotine (slika 4-1). Vodovi za gušenje i prigušivanje bušotine najčešće su spojeni na bušaču prirubnicu (engl. *drilling spool*), no mogu biti spojeni i direktno na čeljusni preventer čime je visina sklopa manja, ali se riskira erozijsko oštećenje preventera čija je cijena višestruko veća od cijene prirubnice. Vod za prigušivanje služi za propuštanje fluida iz prstenastog prostora bušotine u razdjelnik podesive sapnice (engl. *choke manifold*), a iz razdjelnika se preusmjerava prema potrebi u sustav za čišćenje isplake, na baklju ili u rezervni isplačni bazen tj. otpadnu grabu. Na vodu za prigušivanje potrebno je ugraditi minimalno dva zasuna. Unutrašnji koji je ručno podesiv i vanjski – hidraulički upravljiv. Regulacija tlaka u zatvorenoj bušotini obavlja se ručno upravljivom sapnicom. Vod za gušenje služi za utiskivanje isplake za vrijeme postupaka gušenja bušotine, a uz ručno i hidraulički upravljiv zasun, prema potrebi se ugrađuje i protupovratni ventil. Ovisno da li je ručno podesiva sapnica na vodu za prigušivanje otvorena ili zatvorena, razlikuje se „MEKO“ ili „TVRDO“ zatvaranje bušotine. Ukoliko se radi o dubokoj bušotini i postoji opasnost od frakturiranja sloja i, ako se ne radi o dotoku plina, bušotina se zatvara na meki način uz otvorenu ručno podesivu sapnicu na vodu za prigušivanje. U suprotnom se odabire tvrdo zatvaranje, čime se skraćuje vrijeme zatvaranja i smanjuje volumen dotoka. Koji način zatvaranja se primjenjuje ovisi o procjeni vođe smjene i praksi kompanije (engl. *company policy*).



Slika 4-1. Prikaz niza preventera i pripadajućih oznaka prema API RP 53 (Rig Train, 2001).

Nakon zatvaranja pristupa se provođenju neke od metoda ugušivanja bušotine kako bi se ponovno uspostavila primarna kontrola tlaka. Tako se razlikuju:

- bušaća metoda,
- inženjerska metoda,
- istodobna metoda (kombinacija bušaće i inženjerske),
- volumetrijska metoda,
- metoda malog tlaka na sapnici,
- metoda prisilnog utiskivanja dotoka nazad u formaciju (engl. *bullheading*) i druge metode za primjenu u specifičnim situacijama.

Cilj provedbe neke od metoda ugušivanja je pomoću otežane isplake, smanjenim tlakom cirkulacije, iscirkulirati dotekle slojne fluide (očistiti kanal) i što prije uspostaviti primarnu kontrolu kako bi se zaustavljeni radovi mogli nastaviti.

4.1. Osnovni principi ugušivanja dotoka

Osnovni princip svih metoda ugušivanja je održavanje tlaka na dno bušotine jednakim ili nešto višim od slojnog tlaka ponajviše kako bi spriječili novi dotok. Nakon što je bušotina uspješno zatvorena, potrebno je pričekati 5-10 minuta kako bi se tlakovi u bušotini stabilizirali. Potom se na manometrima na ušću bušotine očitavaju vrijednosti dvaju tlakova – tlak u bušaćim šipkama ($P_{TBŠZ}$) i tlak u zaštitnim cijevima (P_{TUBZ}). Bušotina se razmatra kao velika U-cijev u kojoj jedan kraj cijevi predstavljaju bušaće šipke, a drugi prstenasti prostor (slika 4-2). Dopušteni statički tlak na ušću bušotine ograničen je:

- dubinom ugradnje kolone zaštitnih cijevi;
- čvrstoćom kolone zaštitnih cijevi;
- izdržljivošću raskrivenih naslaga ispod pete kolone.

Tlakom na bušaćim šipkama ($P_{TBŠZ}$) definira se razlika slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka u bušaćim šipkama pa se izražava sljedećom formulom:

$$P_{TBŠZ} = P_{sl} - P_{hbš} \ [kPa] \tag{4.1}$$

gdje su:

$P_{TBŠZ}$ – tlak očitan na bušaćim šipkama nakon zatvaranja [kPa];

P_{sl} – slojni tlak [kPa];

$P_{hbš}$ – hidrostatički tlak isplake u bušaćim šipkama [kPa].

Iz gore navedene formule je lako izraziti vrijednost slojnog tlaka koji je potreban za izračunavanje gustoće otežane isplake kojom se planira uravnotežiti slojni tlak odnosno ugušiti bušotina glasi:

$$\rho_{oi} = \frac{P_{TBŠZ}}{H_{TVD} \times 0{,}00981} + \rho_i \ [kg/m^3] \tag{4.2}$$

gdje su:

ρ_{oi} – gustoća otežane isplake [kg/m^3];

H_{TVD} – stvarna vertikalna dubina bušotine [m].

Tlak na ušću bušotine, odnosno zaštitnim cijevima (P_{TUBZ}) definira se kao razlika slojnog tlaka i hidrostatičkog stupca fluida koji ispunjava prstenasti prostor (stupci isplake i slojnih fluida), te se izražava sljedećom formulom:

$$P_{TUBZ} = P_{sl} - P_{hipp} - P_{hsf} \ [kPa] \tag{4.3}$$

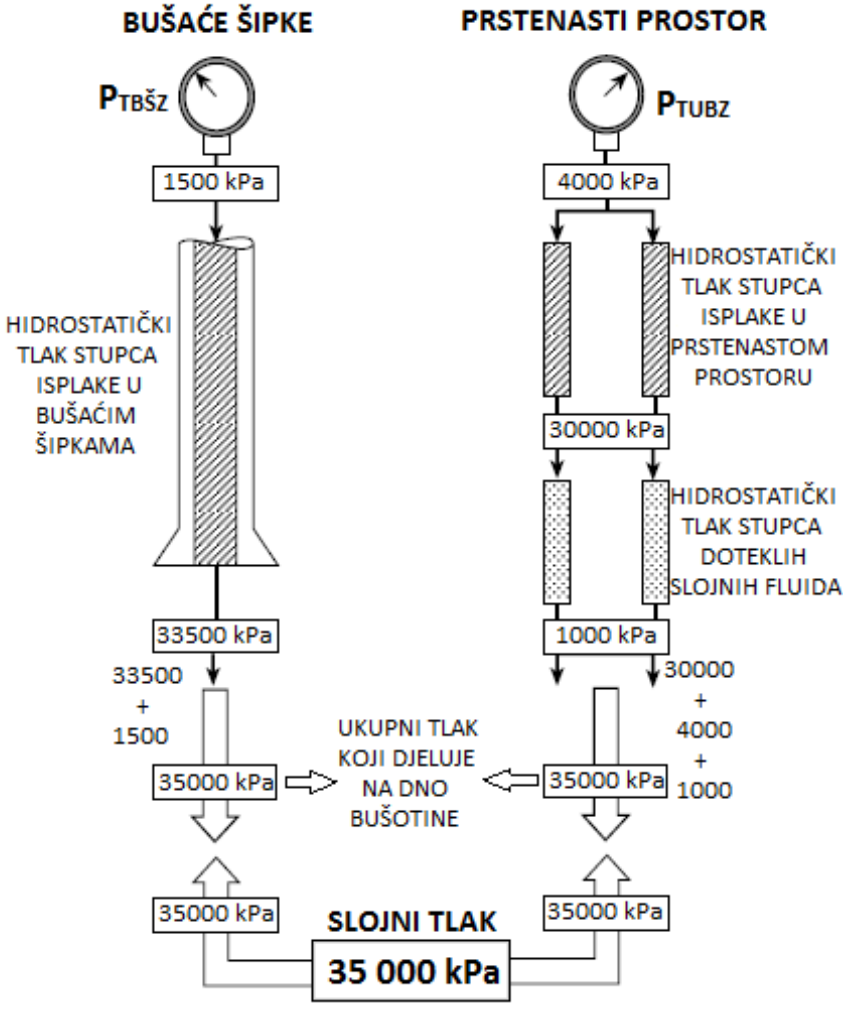
gdje su:

P_{TUBZ} – tlak očitan na ušću nakon zatvaranja [kPa];

P_{sl} – slojni tlak [kPa];

P_{hipp} – hidrostatički tlak isplake u prstenastom prostoru [kPa];

P_{hsf} – hidrostatički tlak koji ostvaruje slojni fluid u prstenastom prostoru [kPa].



Slika 4-2. Pojednostavljeni prikaz odnosa tlakova na ušću i bušaćim šipkama temeljen na principu U-cijevi (Aberdeen Drilling School, 2002).

Stvarna vrijednost gustoće doteklih slojnih fluida nije poznata, no pouzdano je manja od gustoće isplake. Stoga će tlak očitan na ušću bušotine gotovo uvijek biti veći od tlaka očitanog na bušaćim šipkama, a kolika će njihova razlika biti ovisi o intenzitetu dotoka do kojeg je došlo prije zatvaranja. Teoretski slučaj da je $P_{TBŠZ}$ jednak ili nešto veći od P_{TUBZ} je

pokazatelj da se u prstenastom prostoru nalazi puno razrušenih krhotina stijena, a volumen dotoka vrlo mali.

4.2. Smanjeni tlak cirkulacije (P_{TCS})

Smanjeni tlak cirkulacije se definira kao bilo koje smanjenje tlaka u odnosu na tlak cirkulacije prilikom radova dok je bušotina otvorena. Prati se i bilježi rutinski od strane bušaće ekipe, uglavnom jednom u smjeni ili nakon manevra, tako da njegova vrijednost bude poznata za slučaj kad se bušotina mora zatvoriti. Očitava se na manometru podesive sapnice, a nova očitanja se moraju napraviti nakon promjene gustoće i reoloških svojstava isplake, promjene dubine bušotine, nakon promjene promjera mlaznica dlijeta ili sastava bušaćeg alata. Bušotina se ugušuje pri smanjenom tlaku cirkulacije jer (Crosco d.o.o., 2014):

- su manji otpori protjecanja u prstenastom prostoru;
- zbog manjeg tlaka je i manja mogućnost erodiranja podesive sapnice;
- više je vremena za kondicioniranje isplake;
- manje je vremena za migraciju plina prema površini;
- više je vremena za otplinjavanje isplake.

Kad se pristupa ugušivanju dotoka, smanjuje se dobava pumpe. Cirkuliranje isplake smanjenom dobavom osnova je svih metoda ugušivanja osim kod „*bullheading*“ metode koja se primjenjuje samo u iznimnim slučajevima. U pravilu se dobava smanjuje u rasponu od polovine do trećine dobave koja se koristila prilikom bušenja. Ako se dobava smanji na polovinu smanjeni tlak cirkulacije je čak četiri puta manji (Crosco d.o.o., 2014). Smanjenjem broja hodova u jedinici vremena ostvaruje se smanjena dobava, a novi (smanjeni) tlak cirkulacije se približno izračunava prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{ntc} = P_{stc} \times \left(\frac{n_n}{n_s}\right)^2 \quad [kPa] \tag{4.4}$$

gdje su:

P_{ntc} – novi tlak cirkulacije [kPa];

P_{stc} – stari tlak cirkulacije [kPa];

n_n – novi broj hodova pumpe [hod/min];

n_s – stari broj hodova pumpe [hod/min].

Određenom smanjenom tlaku cirkulacije pribraja se tlak očitan na bušaćim šipkama te njihov zbroj definira početni tlak cirkulacije:

$$P_{TCP} = P_{TCS} + P_{TBŠZ} \ [kPa] \tag{4.5}$$

gdje je:

P_{TCP} – početni tlak cirkulacije [kPa].

Cirkulacijom se kanal čisti od doteklih fluida te se nakon toga utiskuje prethodno pripremljena otežana isplaka. Kako se utiskuje otežana isplaka tako početni tlak cirkulacije (P_{TCP}) postepeno pada do vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije (P_{TKC}), kada je otežana isplaka došla do dna bušotine. U tom trenutku na manometru na bušaćim šipkama se očitava konačni tlak cirkulacije, a računski, ovisno o gustoći otežane isplake i smanjenom tlaku cirkulacije, se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{TCK} = P_{TCS} \times \frac{\rho_{oi}}{\rho_i} \ [kPa] \tag{4.6}$$

gdje su:

P_{TCK} – konačni tlak cirkulacije [kPa];

P_{TCS} – smanjeni tlak cirkulacije [kPa];

ρ_{oi} – gustoća otežane isplake [kg/m^3];

ρ_i – gustoća isplake [kg/m^3].

Održavanjem konačnog tlaka cirkulacije na bušaćim šipkama, otežana isplaka cirkulira prstenastim prostorom prema površini, te se ponovno uspostavlja primarna kontrola tlaka. Nakon što je otežana isplaka došla do površine, zaustavlja se cirkulacija i ako u međuvremenu nije došlo do novog dotoka, tlakovi na ušću bušotine bi trebali biti jednaki nuli (P_{TUBZ}=$P_{TBŠZ}$=0).

4.3. Općenito o metodama ugušivanja

Prije primjene i provođenja određenih metoda ugušivanja, sam odabir kojom metodom će se bušotina ugušivati ovisi o nekoliko pokazatelja (Krištafor, 2015):

- nalazi li se alat u bušotini ili ne;
- je li je alat blizu dna bušotine;
- dostupnost kapaciteta za izradu otežane isplake;

- je li moguća cirkulacija;
- je li došlo do oštećenja ili prihvata alatki;
- radi li se o vertikalnom ili horizontalnom kanalu itd.

Kako bi se dotok djelotvorno ugušio kraj niza bušaćeg alata mora biti blizu dna bušotine kako bi se mogao pratiti tlak na dno bušotine i kako ne bi bila potrebna prekomjerna gustoća isplake. Ukoliko dođe do dotoka kada su šipke udaljene od dna bušotine, treba poduzeti korake kako bi se niz alata spustio na dno. Općenito se koriste dvije metode:

1. Stripiranje (engl. *stripping*) je postupak spuštanja bušaćeg alata u bušotinu pod tlakom, nakon što je bušotina zatvorena. Ako je oko alatki zatvoren samo prstenasti preventer, bušaće šipke će se polagano i oprezno spuštati, a brtva prstenastog preventera će se proširiti kako bi se propustila spojnica. Za slučaj zatvaranja čeljusnim preventerima, potrebno je naizmjenično manipulirati preventerima u svrhu propuštanja spojnice.
2. Potiskivanje alatki (engl. *snubbing*) proces je spuštanja alatki u bušotinu kada težina alatki nije dovoljna za stripiranje odnosno spuštanje prema dnu. Sila koja se mora primijeniti na alatke ovisi o tlaku u bušotini koji djeluje na alatke prema gore i o trenju između alatki i brtvi preventera, koje ovisi tipu preventera i tlaku zatvaranja.

4.3.1. Bušaća metoda

Najčešće korištena metoda u praksi je bušaća (engl. *driller's method*), a razlog tome je u njezinoj jednostavnosti, uključujući proračun, a s gušenjem se praktički može započeti čim se tlakovi na ušću stabiliziraju. Provodi se u dvije cirkulacije. Cilj prve je uz postojeću gustoću isplake, održavanjem definiranog početnog tlaka cirkulacije na bušaćim šipkama, očistiti kanal od slojnih fluida, a drugom cirkulacijom pomoću otežane isplake uspostaviti primarnu kontrolu. Koristi se uglavnom na manjim kopnenim postrojenjima kad je bušač ograničen sredstvima i opremom te kada je vjerojatni uzročnik dotoka klipovanje. Glavni nedostaci su razvijanje povećanih tlakova u prstenastom prostoru, a zato što se izvodi u dvije cirkulacije zahtijeva više vremena za provođenje te može doći do oštećenja sapnice. Zbog razvijanja većih tlakova u kanalu posebno treba biti oprezan kada se radi o plinskom dotoku.

4.3.2. Inženjerska metoda

Primjenom inženjerske metode (engl. *wait and weigh*) se u jednoj cirkulaciji treba očistiti kanal bušotine od slojnih fluida te ugušiti bušotina. Na temelju tlaka očitanog na bušaćim

šipkama se računa potrebna gustoća otežane isplake, priprema se dovoljan volumen u isplačnim bazenima, te se nakon toga uz smanjeni kapacitet i prigušenu cirkulaciju kreće utiskivati u bušotinu. Cilj je kroz jednu cirkulaciju očistiti bušotinu od slojnih fluida i uspostaviti primarnu kontrolu tlaka. Osnovna prednost inženjerske metode je razvijanje manjih tlakova u prstenastom prostoru, koja se gubi u situaciji kad je volumen unutar bušaćeg alata veći od volumena otvorenog kanala (tzv. kratki „open-hole“) (Crosco d.o.o., 2014). Nadalje, zbog samo jedne cirkulacije manipulacija sapnicom kraćeg je trajanja nego kod bušaće metode, pa je i manja vjerojatnost njenog oštećenja. Nedostatak je što priprema za početak ugušivanja traje dulje, a ako tijekom ugušivanja dođe do novog dotoka gubi se prednost jedne cirkulacije.

4.3.3. Kombinacija bušaće i inženjerske metode

Istodobna metoda (engl. *concurrent method*) kombinira karakteristike prethodno spomenutih metoda. Tijekom cirkuliranja dotoka prema površini, isplaka se istovremeno, ali postupno, otežava prema potrebnoj gustoći za gušenje i stabilizaciju dotoka. Prednost primjene istodobne metode se očituje u kombinaciji nekih prednosti prethodno navedenih metoda, dok je nedostatak složenost provedbe, a i proračuna.

4.3.4. Volumetrijska metoda

Volumetrijska metoda (engl. *volumetric method*) se primjenjuje u svim slučajevima kada nije moguća cirkulacija, a razlozi mogu biti (Krištafor, 2015):

- začepljenje niza bušaćeg alata;
- lom bušaćeg alata;
- bušaći alat je izvan bušotine;
- kvar isplačne pumpe itd.

Nadalje, koristi se u slučaju kada bušaći alat nije na dnu, a zbog dotoka plina i postepenog porasta tlaka u kanalu zbog njegove migracije prema površini, nema vremena za stripiranje. Princip volumetrijske metode je ispuštanjem određenih količina isplake održavati konstantan tlak na dno bušotine ili bar u određenim granicama kako ne bi došlo do frakturiranja nekog od raskrivenih slojeva. Pritom je bitno da se iz bušotine ispuštaju točno izračunati obroci isplake čiji stupac odgovara povećanju tlaka na dno. Cilj metode nije ugušivanje, nego praćenjem promjene tlaka na ušću (P_{TUBZ}) i na temelju očitanja odrediti i mjeriti volumen isplake koji se periodično ispušta, dok plin ne dođe do površine.

4.3.5. Metoda malog tlaka na sapnici

Koristi se kod dotoka koji se potencijalno može pojaviti prilikom bušenja kroz slabopropusne formacije, a primjenjuje se:

1. kad se javi dotok nakon vađenja, a da se prije toga bušilo ispod ravnoteže (engl. *underbalance drilling*) u poznatim slabopropusnim formacijama. Tako se rutinski postupa u nekim područjima u svrhu postizanja većih mehaničkih brzina bušenja;
2. da bi se izbjeglo oštećenje naslaga u slabopropusnim, ali raspucalim naslagama;
3. kada tlak na ušću prijeti prijeći ograničenja opreme ušća;
4. kada tlakovi početnog zatvaranja prijete prijeći gradijente frakturiranja naslaga ispod uvodne kolone koja je ugrađena preplitko, kako bi se izbjeglo povezivanje frakture s površinom.

Zadnja dva navoda rezultat su slabog planiranja konstrukcije bušotine i treba ih izbjeći (Krištafor, 2015).

4.3.6. Metoda vraćanja dotoka u sloj

Metoda vraćanja dotoka u sloj (engl. *bullheading method*) je u biti utiskivanje dotoka natrag u formaciju utiskujući isplaku s površine, a može se primjenjivati bez obzira da li je plin blizu površine ili ne. Ako je veliki dio kanala bušotine nezacijevljen može rezultirati podzemnom cirkulacijom, ali ne predstavlja veći problem u kratkim otvorenim kanalima. Ponekad je korištenje ove metode nužnost u svrhu spašavanja bušotine ako površinska oprema propušta ili je poddizajnirana. Koristi se kada (Saudi Aramco, 2002):

- je dotok toliko velik da ga je nemoguće iskontrolirati uobičajenim metodama;
- su tlakovi na površini previsoki;
- kada nema alatki na dnu, a volumetrijska metoda nije dovoljno pouzdana i izvediva;
- dotok sadrži veći udio sumporovodika koji predstavlja opasnost po osoblje;
- je onemogućen povratni tok isplake jer je došlo do loma alata i ostalih uzroka nemogućnosti optoka itd.

Tijekom utiskivanja isplake u zatvorenu bušotinu tlak će rasti do vrijednosti frakturiranja sloja, a nakon toga će se smanjivati kako se dotok utiskuje u sloj i zamijenjuje isplakom veće gustoće. Efikasnost ove metode utvrđena je u nekim fazama remonta kada se utiskivanje provodi u zacijevljenoj bušotini s perforiranom kolonom i iznad perforacija ugrađenim pakerom.

5. HIDRAULIČKI KONTROLNI SUSTAV

Hidraulički kontrolni sustav vrši upravljanje i kontrolu rada svih komponenti preventerskog sklopa. Zatvaranje i otvaranje preventera, te hidrauličkih ventila i daljinski upravljive sapnice, obavlja se radnom tekućinom tlaka prilagođenog radnom tlaku pojedinog preventera. Kontrolni sustav u biti predstavlja zatvoren sustav visokog tlaka protoka radne tekućine. Na većini postrojenja koristi se radni tlak od 206,9 bar, a ovisno o potrebi postoje sustavi radnih tlakova od 69, 138 i 365 bar (API RP 53, 1997). Osnovni dijelovi sustava su:

- hidraulička jedinica;
- kontrolni paneli s pripadajućom opremom;
- upravljački vodovi.

U glavnom spremniku hidrauličke jedinice se pod atmosferskim tlakom skladišti pripremljena radna tekućina. Prema preporukama API RP 53 standarda, radni volumen spremnika mora biti jednak najmanje dvostrukom volumenu iskoristive radne tekućine akumulatorskog sklopa, što u praksi iznosi oko 1 m^3. Iz glavnog spremnika radna tekućina se hidrauličkim pumpama utiskuje u akumulatorske boce unutar kojih se nalazi gumeni mijeh ispunjen dušikom koji je komprimiran na tlak predpunjenja od 69 bar. Utiskivanjem radnog fluida u boce mijeh se dodatno komprimira dok se ne postigne radni tlak sustava čime je osigurana hidraulička energija, i sustav je spreman za upotrebu. Upravljačkim komandama na kontrolnim panelima ili na samom razdjelniku hidrauličke jedinice regulira se radni tlak tekućine koja se konačno kroz hidrauličke upravljačke vodova upućuje na funkciju otvaranja ili zatvaranja određene komponente preventerskog sklopa. Radna tekućina kojom je preventer bio otvoren ili zatvoren se naposljetku vraća natrag u glavni spremnik.

5.1. Hidraulička jedinica

Hidraulička jedinica je sastavni dio svakog sustava za sprječavanje erupcija, a osnovna zadaća joj je omogućiti hitno zatvaranje preventera na preventerskom sklopu kako bi se spriječila erupcija. Ona predstavlja izvor radne tekućine za čitav hidraulički kontrolni sustav, a glavni izvor energije kojom se ona potiskuje dolazi iz akumulatora. Nadalje sastoji se još od sustava za pripremu te spremnika za skladištenje radne tekućine, sklopa hidrauličkih pumpi i kontrolnog razdjelnika. U slučaju erupcije je preopasno kontrolirati erupciju kod samog ušća te je zato prema preporukama standarda API RP 53 definirano da se hidraulička

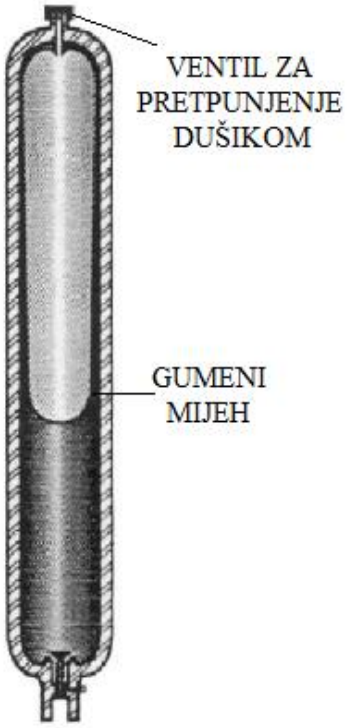
jedinica mora nalaziti na sigurnoj udaljenosti od ušća, minimalno 30 metara. Nadalje, preporuke standarda API RP 16E nalažu da se kod zatvaranja čeljusnih preventera čeljusti trebaju zatvoriti unutar 30 sekundi od aktivacije na jednom od panela, i to neovisno o veličini samog preventera. Kod preventerskog sklopa odobalnih postrojenja, koji je postavljen na dnu mora, dozvoljeno je dodatnih 15 sekundi zbog vremena potrebnog da pilot signal stigne od površine do dna mora.

Kako bi se mogao odrediti potrebni kapacitet hidrauličke jedinice odnosno dostatna količina radnog fluida potrebno je definirati sljedeće volumene i tlakove (Apave Mare d.o.o., 2015):

- akumulirani volumen hidrauličkog fluida – je volumen hidrauličkog fluida koji se može utisnuti u bocu u rasponu između tlaka predpunjenja i maksimalnog radnog tlaka akumulatora;
- iskoristivi volumen hidrauličkog fluida – je volumen fluida koji se može dobiti iz akumulatorskih boca između maksimalnog radnog tlaka akumulatora i minimalnog izračunatog radnog tlaka zatvaranja ili 14 bar iznad tlaka predpunjenja. Gleda se koji je tlak veći;
- minimalni izračunati tlak zatvaranja – je najmanji tlak potreban za zatvaranje čeljusnih preventera koji se dobije ako se maksimalni očekivani tlak na ušću bušotine podijeli s koeficijentom zatvaranja čeljusnih preventera koji se koriste;
- minimalni tlak zatvaranja preporučen od proizvođača – je najmanji tlak potreban za zatvaranje čeljusnih ili prstenastih preventera koje preporuča proizvođač.

5.2. Akumulatorski sklop i proračun

Akumulatori su zapravo čelične boce, najčešće cilindričnog oblika, koje se pomoću hidrauličkih pumpi pune radnim fluidom. Nadalje za njihov rad koristi se ekspanzija dušika. Osnovno načelo rada akumulatorskih boca je da pri smanjenju volumena plina, zbog utiskivanja radnog fluida, raste tlak u boci do potrebnog radnog tlaka sustava. Postoji nekoliko vrsta izrade akumulatora, a u praksi se najčešće koriste akumulatorske boce tipa mijeha ili zračnice (engl. *bladder type*)(slika 5-1).

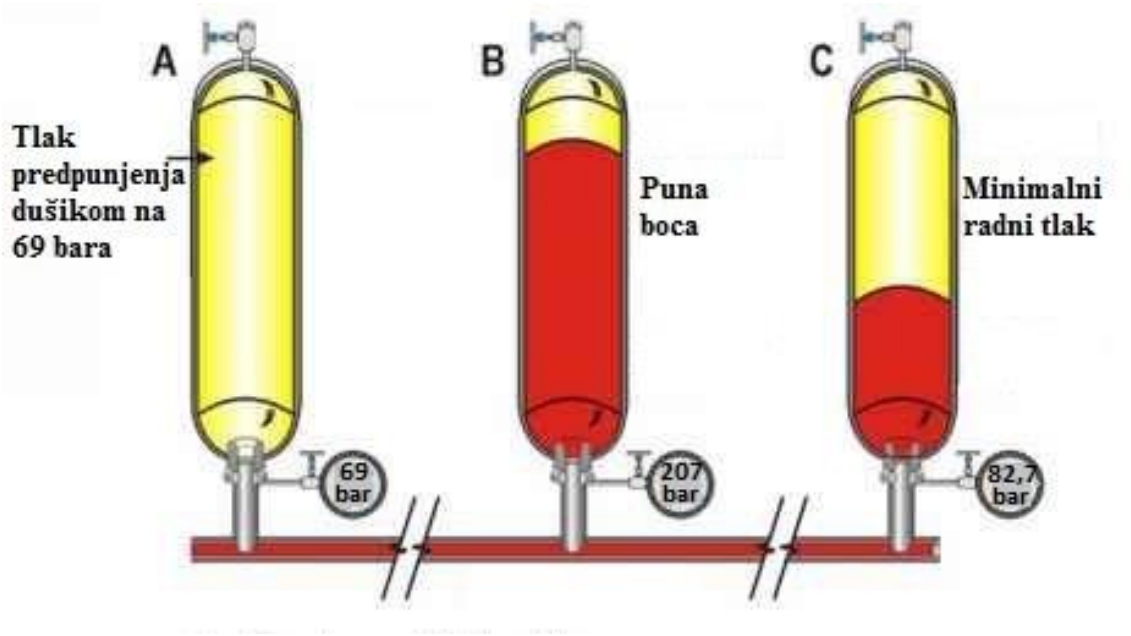


Slika 5-1. Akumulatorska boca s mijehom (Rig Train, 2001).

Unutar boce akumulatora nalazi se gumena komora ili mijeh unutar koje se tlači dušik na tlak predpunjenja čija maksimalna vrijednost najčešće iznosi 69 bar za sustave radnog tlaka od 137 bar ili više (API RP 16E, 1990). Dušik se koristi jer je inertan, nekorodirajući i nezapaljiv. Utiskivanjem radne tekućine u bocu gumena komora ili mijeh se dodatno tlači dok se ne postigne željeni radni tlak sustava (slika 5-2), nakon čega se pumpe automatski isključuju. Standardni volumen boce je oko 0,0379 m^3 (11 galona). Pomoću Boyle-Mariotteovog zakona se definira odnos volumena i tlaka idealnog plina koji glasi:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \tag{5.1}$$

Kod navedene jednadžbe podrazumijeva se da promjene temperature nema, čime su vrijednosti tlaka i volumena promatranog fluida obrnuto proporcionalni u zatvorenom sustavu kao što je akumulatorska boca. Iako se plin unutar mijeha akumulatorskih boca ponaša kao realan, a ne idealan plin, moguće je koristiti navedenu jednadžbu jer su odstupanja za potrebe praktičnog proračuna zanemarivo male.



Slika 5-2. Kritični tlakovi u akumulatorskoj boci (Apave Mare d.o.o., 2015).

Na slici 5-2 prikazane su tri akumulatorske boce pod različitim uvjetima:

A) Tlak predpunjenja dušika na vrijednost od 69 bar.
B) Mijeh s dušikom dodatno stlačen utiskivanjem radnog fluida na radni tlak od 207 bar.
C) Prikaz boce pod minimalnim radnim tlakom od 82,7 bar.

Prema slici 5-2 i iz Boyle-Mariotteovog zakona za idealni plin može se izraziti sljedeće:

$$P_A \times V_b = P_B \times V_{Bn} = P_C \times V_{Cn}$$

gdje su:

P_A – tlak u boci A;

P_B – tlak u boci B;

P_C – tlak u boci C;

V_b – ukupni volumen boce;

V_{Bn} – volumen dušika u boci B;

V_{Cn} – volumen dušika u boci C.

Iz navedenog se izražava volumen dušika u boci B:

$$V_{Bn} = \frac{P_A \times V_b}{P_B}$$

A volumen dušika u boci C:

$$V_{Cn} = \frac{P_A \times V_b}{P_C}$$

Ako se iskoristivi volumen fluida (V_{nf}) u boci izrazi razlikom volumena dušika iz boce C i B dobiva se:

$$V_{nf} = \frac{P_A \times V_b}{P_C} - \frac{P_A \times V_b}{P_B}$$

Iz čega slijedi zaključak da iskoristivi volumen hidrauličkog fluida ovisi o minimalnom tlaku zatvaranja preventera, te o maksimalnom radnom tlaku sustava, a izvlačenjem volumena boce iz razlomaka gornje jednadžbe, jednadžba za njegov izračun glasi:

$$V_{hf} = \left(\frac{P_A}{P_C} - \frac{P_A}{P_B}\right) \times V_b \ \ [m^3] \tag{5.2}$$

gdje su:

V_{hf} – iskoristivi volumen hidrauličkog fluida [m^3];

P_A – tlak predpunjenja dušika [bar];

P_B – maksimalni radni tlak sustava [bar];

P_C – minimalni tlak potreban za zatvaranje preventera [bar];

V_b – volumen boce [m^3].

Volumen iskoristivog fluida boce u prosjeku iznosi oko 50% volumena boce, što iznosi oko 0,019 m^3 (5 galona). Vrlo je važno jednom mjesečno provjeravati tlak predpunjenja dušikom (mora iznositi 69 bar ± 10%) (API RP 16E, 1990). Ako je potrebno promijeniti mijeh, zbog konstrukcije ulaznog mehanizma to neće biti izvedivo dok je boca pod tlakom, bilo radne tekućine ili dušika. Ta važna mjera opreza sprječava slučajne povrede osoblja.

6. ZAKLJUČAK

Kontrola tlaka je u centru pažnje u svakoj fazi izrade i održavanja bušotine, a nadalje i tijekom eksploatacije ležišta. Prilikom izrade projekta potrebno je uzeti u obzir i predvidjeti što je više faktora moguće, temeljenih na prijašnjim iskustvima, kako bi izrada kanala prošla optimalno odnosno bez nenamjernog gubitka primarne kontrole tlaka ni u jednom trenutku. Prije svega treba definirati maksimalno očekivani tlak u bušotini kako bi se odgovarajuće dimenzionirao preventerski sklop te spriječila eventualna katastrofa tj. nekontrolirana erupcija.

Ne postoji univerzalna shema primjenjiva kod izrade svakog kanala bušotine, jer svaka bušotina nosi karakteristične izazove u smislu susretanja s različitim veličinama tlaka kao npr. nabušivanje sloja s povišenim tlakom ili plinske leće. No postoji praksa temeljena na desecima godina iskustva iz koje su proizišli proračuni i formule kako bi proces izrade bušotine tekao bez problema i neželjenih posljedica te straha od erupcije. Upravo u realnim situacijama do izražaja dolazi iskustvo voditelja projekta, vođe smjene i bušaćeg osoblja, koji će pravovremenim reakcijama osigurati navedenu uspješnost projekta i uštedjeti kompaniji nepotrebne dodatne troškove.

Održavanje hidrostatičkog tlaka isplake u odgovarajućem rasponu znači kontrolirati bušotinu, a povećanje razine u isplačnom bazenu i prelijevanje isplake kroz bušaće šipke, ili na izljevnoj cijevi, kada su pumpe isključene, neposredni su pokazatelj dotoka. Uočavanjem posrednih pokazatelja kao što su povećanje mehaničke brzine bušenja, povećanje broja hodova pumpe ili natega i torzije, promjena oblika i veličine krhotina ili pojava plina u isplaci – iskusnom vođi smjene biti će dovoljni da naredi zatvaranje bušotine kako bi se volumen doteklog fluida sveo na minimum. U svrhu navedenog je optimalno korištenje jedinice za geološki nadzor. Zatvaranje bušotine pomoću preventera indikator je pristupa sekundarnoj kontroli tlaka, a ako je volumen dotoka minimalan i sam postupak gušenja će proći s neznatnim teškoćama. Sama radnja zatvaranja preventera ovisi o hidrauličkom mehanizmu i ispravnosti hidrauličkog kontrolnog sustava, odnosno je li proračunat dovoljni volumen i tlak radnog fluida kako bi se zatvorile sve potrebne komponente preventerskog sklopa. Stoga je bitno periodički vršiti provjere zatvaranja i održavanja hidrauličkog kontrolnog sustava kako bi bili spremni čim prilika tako naloži.

Bitno je svakom proračunu i korištenju najjednostavnijih jednadžbi pristupiti s oprezom te provjeriti rezultat, jer u kontroli tlaka i najmanja greška može imati kobne posljedice. Cilj

svakog projekta je minimaliziranje troškova, ali ono nikada ne smije biti na uštrb sigurnosnih sustava kao što je preventerski sklop. Određeni sigurnosni faktori se moraju poštivati kako ne bi došlo do poddimenzioniranja bilo koje komponente u sustavu.

7. LITERATURA

1. Aberdeen Drilling School and Well Control Training Center., 2002., „Well Control: For the Man on the Rig“, Aberdeen.

2. Apave Mare d.o.o., 2015., Kontrola tlaka u bušotini, Površinski i podvodni BOP (Prijevod s engleskog), Offshore and Maritime Training center, Rijeka.

3. API RP 16 E, October 1990, Recommended Practice for Design of Control Systems for Drilling Well Control Equipment.

4. API RP 53, 3rd Edition, March 1997, Recommended Practices for Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells.

5. CROSCO d.o.o., Centar za kontrolu tlaka, 2014., Kontrola tlaka u bušotini, predavanja uz praktične vježbe, Zagreb.

6. International Well Control Forum, 2011., Formula Sheet.

7. Krištafor, Z., 2015., Bilješke s kolegija Kontrola tlaka u bušotini, RGNf, Zagreb.

8. Lapeyrouse N. J., 2nd Edition, 2002., Formulas and Calculation for Drilling, Production and Workover.

9. Plavec, R., Strojarstvo na bušenju; Borzatti, J., Grdešić, D., Sprečavanje erupcija, 1972., Priručnik za duboko bušenje, II. dio, Ina-Naftaplin, Zagreb.

10. Rig Train, 2001., Drilling & Well Services Training.

11. Saudi Aramco, 3rd Edition, October 2002., Well Control Manual, Drilling and Workover, Saudi Arabia.

IZJAVA

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

_____