

Ispitivanje istražnih bušotina za naftu i gas – principi i oprema

Danilo Tomović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Ispitivanje istražnih bušotina za naftu i gas – principi i oprema | Danilo Tomović | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007633>

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
Katedra za ekonomsku geologiju



Završni rad

Osnovne akademske studije

Ispitivanje istražnih bušotina za naftu i gas – principi i oprema

Kandidat:

Danilo Tomović
G87/20

Mentor:

Doc. dr Nikoleta Aleksić

Beograd, septembar 2023

Komisija:

Doc. dr Nikoleta Aleksić, Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, mentor

Prof. dr Aleksandar Kostić, Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, član

Prof. dr Vesna Karović Maričić, Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu,
član

Datum odbrane: _____

REZIME	1
1. UVOD	2
OPŠTI DEO	3
2. ISPITIVANJE BUŠOTINA	3
2.1 Metode ispitivanja istražnih bušotina za naftu i gas	3
2.2.1 Ispitivanje nezacevljenih bušotina	4
2.2.2 Ispitivanje zacevljenih bušotina	5
SPECIJALNI DEO	7
3. TESTIRANJE	7
3.1 Tipovi testiranja naftnih i gasnih bušotina	9
3.2 Oprema za izvođenje testiranja bušotine	10
3.3 Metode testiranja naftnih i gasnih bušotina	12
3.4 Tehnološki postupak testiranja naftnih i gasnih bušotina	15
4. OSVAJANJE	18
4.1 Uspostavljanje dotoka fluida u kanal bušotine	20
4.2 Oprema za izvođenje osvajanja bušotine	22
4.3 Metode osvajanja bušotine	23
5. HIDRODINAMIČKA ISPITIVANJA	26
5.1 Opremanja i princip izvođenja hidrodinamičkih merenja	26
5.2 Metode hidrodinamičkog ispitivanja	29
5.2.1 Metoda pada pritiska	29
5.2.2 Metoda porasta pritiska	31
5.2.3 Metoda interferencije	32
5.2.4 Metoda puls testa	34
6. ZAKLJUČAK	36

7. LITERATURA.....	37
--------------------	----

REZIME

Ispitivanje istražnih i razradnih bušotina za naftu i gas predstavlja kompleksan proces koji obuhvata niz tehnoloških i operativnih postupaka koji se izvode u cilju dobijanja pouzdanih parametara za karakterizaciju ležišta nafte i gasa. Ispitivanje bušotina može se vršiti kod istražnih i razradnih bušotina. Kod istražnih bušotina se vrši u cilju definisanja ležišta nafte i gasa, dok kod razradnih bušotina ono se izvodi u cilju definisanja proizvodnih parametara. Proces ispitivanja bušotine se vrši tokom i nakon bušenja. Postupci koji se izvode u cilju ispitivanja bušotina su: testiranje, osvajanje i hidrodinamička merenja u bušotinama. Kako bi proces ispitivanja bušotina bio relevantan i pouzdan neophodno je da pored razradnih inženjera u njemu učestvuje i geolozi, kojima je osnovni cilj proučavanje i detekcija produktivnih intervala i karakterizacija ležišta nafte i gasa.

Ključne reči: *ispitivanje istražnih bušotina, testiranje, osvajanje, hidrodinamička merenja.*

1. UVOD

Završni rad je podeljen u dve celine. Prvi deo predstavljen kao opšti, detaljno prikazuje metode ispitivanja istražnih i razradnih bušotina, kao i njihovu primenu u zavisnosti od procesa bušenja. Prikazane su metode ispitivanja koje se primenjuju u nezacevljenim i zacevljenim bušotinama, kao i kompozicija alata koja se primenjuje prilikom ispitivanja.

Druga celina predstavlja specijalni deo u kome se detaljnije prikazuje postupak testiranja, osvajanja i hidrodinamičkih merenja, oprema koja se koristi prilikom izvođenja postupaka, kao i način interpretacije rezultata. Takođe je jasno definisana uloga geologa prilikom ispitivanja bušotina. Detaljno je opisano i ilustrovano opremanje nezacevljenih i zacevljenih bušotina, kako površinskom tako i opremom u bušotini. Rezultati hidrodinamičkog merenja prikazani su dijagramima tokom različitih režima rada bušotine. Izvođenje i interpretacija hidrodinamičkih merenja predstavljaju krajnji rezultat ispitivanja istražnih bušotina.

Zahvalio bih se svom mentoru, Doc. dr Nikoleti Aleksić, na ukazanoj pomoći i izdvojenom vremenu uloženom u pružanje sveobuhvatnih informacija tokom izrade završnog rada, kao i Prof. dr Aleksandru Kostiću i Prof. dr Vesni Karović Maričić.

OPŠTI DEO

2. ISPITIVANJE BUŠOTINA

Ispitivanje istražnih bušotina za naftu i gas predstavlja proces, koji zahteva angažovanje mnogih servisnih delatnosti na osposobljavanju objekata istraživanja u bušotini. Ispitivanje istražnih i razradnih bušotina osnov je za definisanje ležišta. U okviru ispitivanja naftnih i gasnih bušotina primenjuju se sledeći postupci: testiranje, osvajanje i hidrodinamička merenja.

Ispitivanja mogu da se izvodi u nezacevljenim i zacevljenim bušotinama, najpre se vrši u nezacevljenim bušotinama, ako se definiše prisustvo ugljovodonika pristupa se ugradnji i cementaciji eksploatacione kolone prilikom čega otpočinje proces ispitivanja u zacevljenim bušotinama: testiranje, osvajanje i hidrodinamička merenja. Testiranja se mogu vršiti i u nezacevljenim i zacevljenim bušotinama.

2.1 Metode ispitivanja istražnih bušotina za naftu i gas

Metode ispitivanja u nezacevljenim bušotinama, kao i posle ugradnje kolone zaštitnih cevi, omogućavaju definisanje ležišta nafte i gasa i određivanje potencijalnih proizvodnih parametara bušotine. Jedan od najvažnijih istražnih operacija tokom bušenja je testiranje, odnosno ispitivanje prisustva akumuliranih fluida u perspektivnim formacijama. To testiranje se naziva i „oprobavanje sloja” njime se definitivno i pouzdano utvrđuje eventualno postojanje ležišta ugljovodonika te procenjuje njegov značaj. Osim identifikacije vrste fluida u ispitivanom sloju, testiranje omogućava rano određivanje važnih parametara, kao što su: fizičke osobine, hemijske osobine, početni gasni faktor (GOR), statički i dinamički pritisak, temperatura, jačina dotoka i opšti stepen (klasa) propusnosti (Kostić, 2020).

Testiranje se vrši u nezacevljenim i zacevljenim delovima bušotine dok se u zacevljenim vrši „osvajanje” i hidrodinamička merenja – nakon perforacije zaštitnih cevi. Testiranje nezacevljenih bušotina ima za cilj da pokaže da li vredi kompletirati bušotinu i ugraditi eksploatacionu kolonu (tubing) ili će se ona konzervirati / likvidirati. Postoje dva načina testiranja nezacevljenih bušotina: testiranje kroz bušaće šipke – DST („Drill Steam Test”) i testiranje na karotažnom kablju (Kostić, 2020).

2.2.1 Ispitivanje nezacevljenih bušotina

Ispitivanje nezacevljenih bušotina za naftu i gas prevashodno predstavlja postupak testiranja, koji se izvodi sa ciljem registrovanja i otkrivanja intervala sa povišenim pritiskom i temperaturom. Intervali sa povišenim pritiskom i temperaturom mogu da predstavljaju objekat ispitivanja (perspektivni sloj). Svako opremanje nezacevljenih bušotina uvek polazi od dna bušotine ka površini. Kompozicije alata za ispitivanje u nezacevljenim bušotinama zavisi od mesta oslanjanja opreme u bušotini (slika 1), a može biti:

	D (mm)	d (mm)	L (m)
Bušaće šipke	127,0	88,9	Do površin
Prelazni komad	158,7	63,5	0,50
Teška šipka	158,7	63,5	111,14
Cirkulaciona spojnica sa lomljivom pločicom	155,5	76,2	0,30
Teška šipka	158,7	63,5	27,94
Cirkulaciona spojnica sa lomljivim čepom	155,5	76,2	0,30
Teška šipka	158,7	63,5	27,47
Prelazni komad	155,5	63,5	0,40
Filter sa diznom	155,5	88,9	1,42
Tester ventil	127,0	25,4	2,93
Hidraulčko pokretni alat	127,0	30,5	0,90
Produžna spojnica	127,0	22,0	2,80
Nosač registratora pritiska	127,0	95,2	1,25
Hidraulički izbijač	127,0	48,0	2,37
Sigurnosna spojnica	127,0	25,4	0,85
Paker za nezacevljene bušotine	168,3	38,1	1,97
Prelazni komad	158,7	63,5	0,30
Teška šipka	158,7	63,5	5,60
Prelazni komad	158,7	63,5	0,30
Perforirani anker	146,0	120,0	6,00
Peta - nosač registratora pritiska /temperature	146,0	88,9	1,27

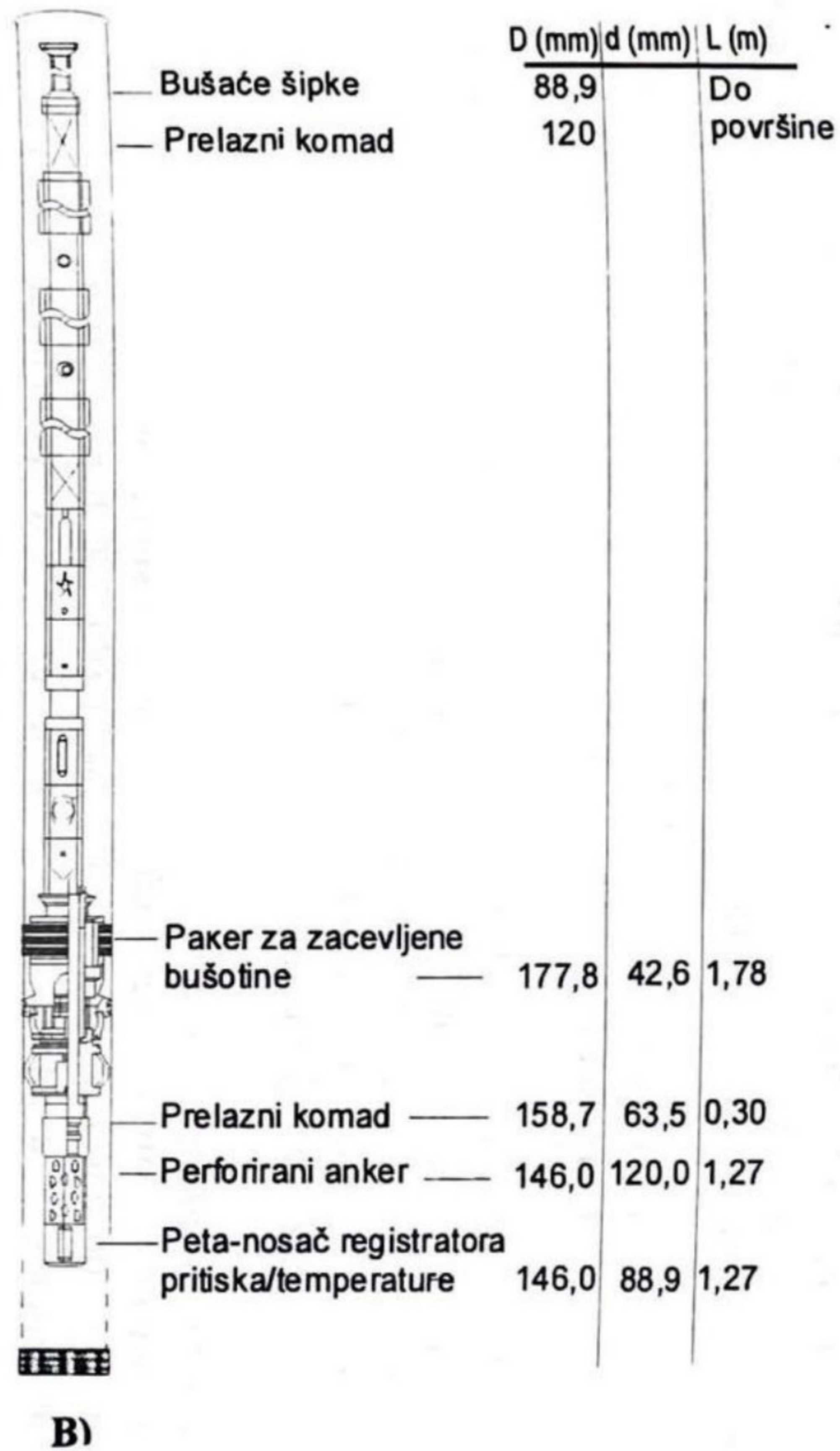
Slika 1: Kompozicija alata za testiranje u nezacevljenim bušotinama (Omerzu, 2005)

- Oslanjanje opreme na dno bušotine: osnovni element kompozicije alata prilikom oslanjanja na dno nezacevljene bušotine predstavlja peta za oslanjanje, koja se ugrađuje na dno kompozicije alata. Peta za oslanjanje služi kao oslonac kompletnoj kompoziciji alata i kao nosač registratora pritiska i temperature. Zbog svoje dvojakе funkcije u postupku ispitivanja, neophodno je da peta za oslanjanje bude proizvedena od kvalitetnog legiranog čelika, otpornog na napone izvijanja i pucanja (Omerzu, 2005).
- Oslanjanje opreme na zid bušotine: ispitivanje se sastoji u izboru i ugradnji perforiranog ankera u kojem su ugrađeni registratori pritiska i temperature i uređaj za oslanjanje na zid nezacevljene bušotine, ovaj uređaj se naziva zidni anker (Omerzu, 2005).

2.2.2 Ispitivanje zacevljenih bušotina

Prilikom ispitivanja zacevljenih bušotina osnovni postupci predstavljaju osvajanje bušotine i hidrodinamička merenja. Postupak testiranja se takođe može izvoditi u zacevljenim bušotinama, ali uz posebnu kompoziciju alata. Postupak ispitivanja zacevljenih bušotina izvodi se nakon otkrivanja produktivnog sloja, metodama testiranja nezacevljenih bušotina. Cilj ispitivanja zacevljenih bušotina predstavlja sagledavanje proizvodnih mogućnosti, kao i definisanje hidrodinamičkih parametara. (Omerzu, 2005).

Komponente kompozicije alata za testiranje u zacevljenim bušotinama (slika 2) za razliku od nezacevljene kompozicije se razlikuje u delu ispod pakera. Kompozicija alata iznad pakera identična je sastavu alata u nezacevljeni bušotinama. (Omerzu, 2005).



Slika 2: Kompozicija alata za testiranje u zacevljenim bušotinama (Omerzu, 2005)

SPECIJALNI DEO

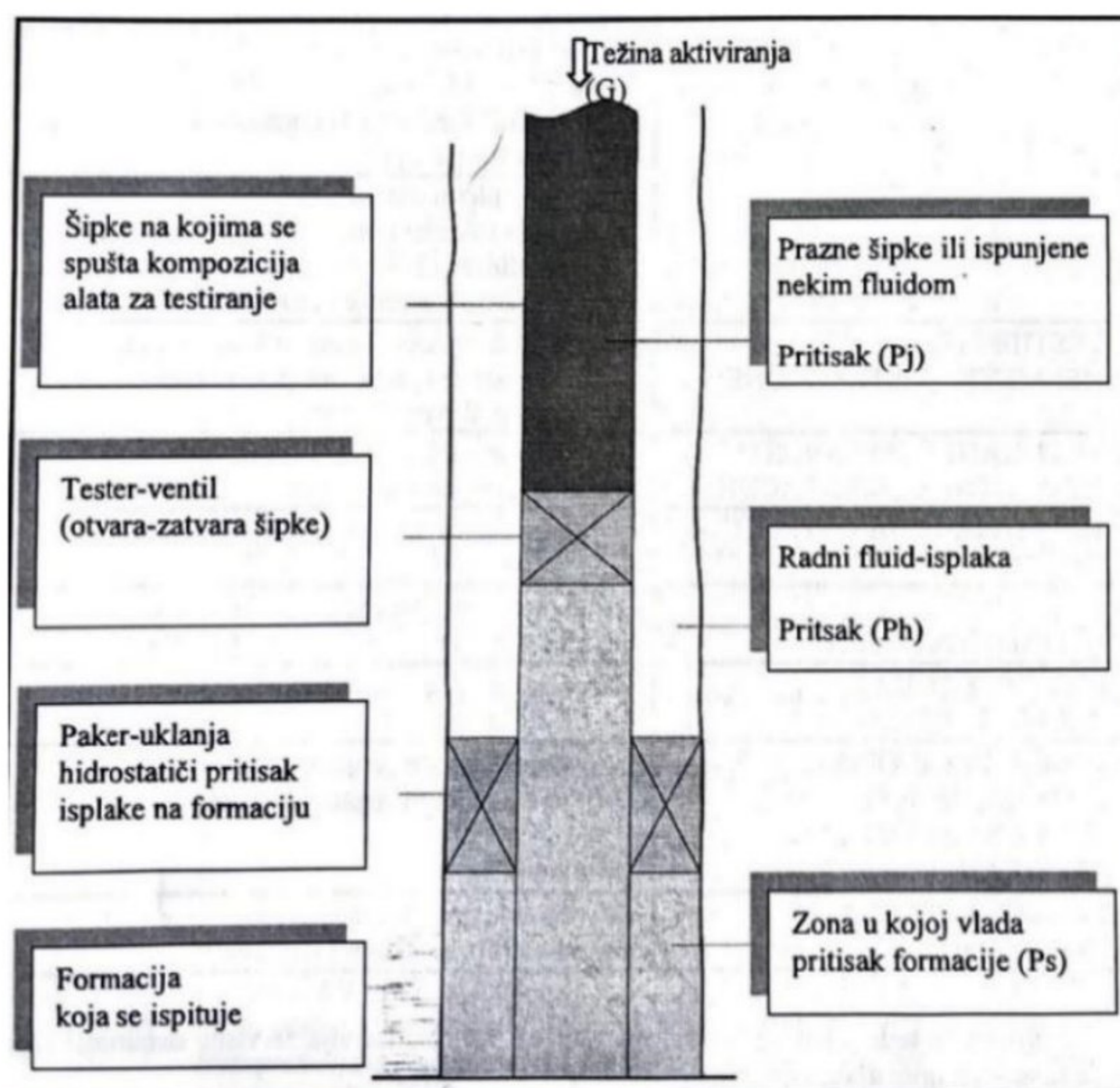
3. TESTIRANJE

Osnovu testiranja naftnih i gasnih bušotina predstavlja otkrivanje perspektivnog intervala, identifikovanje i uzorkovanje podpovršinskih fluida, plansko postupanje u radu sa opremom za testiranje i postizanje preliminarnih saznanja o proizvodnim parametrima. Opremanje bušotine radi ispitivanja podrazumeva ugradnju niza alata u bušotinu, kao i površinsko opremanje bušotine, pri čemu je neophodno koristiti sigurnu i bezbednu opremu tokom ispitivanja formacije. Kompozicija alata koja se ugrađuje u bušotinu u svrhu testiranja nazivamo kompozicija alata za testiranje. Svi uređaji na površini kojima se oprema bušotina za vreme ispitivanja formacije čine površinsko opremanje bušotine za testiranje.

Kompozicijom alata za testiranje manipuliše se upotrebom šipki bušaćeg ili remontnog postrojenja. Bušaće šipke imaju ulogu u operaciji testiranja da sprovedu formacijski fluid iz bušotine do površine. Kompozicija alata za testiranje spušta se u bušotinu koja je ispunjena radnim fluidom. Radni fluid ima uticaj na formaciju svojim hidrostatičkim pritiskom, koji je uvek mora biti viši od pritiska u sloju. Prilikom testiranja u bušotinu se spušta kompozicija alata za testiranje u koju je ugrađen alat koji nazivamo paker, a koji se aktivira neposredno iznad formacije koja se ispituje. Ovo aktiviranje deli bušotinu na dva dela: jedan deo je pod uticajem radnog fluida, dok je sa drugog dela uticaj radnog fluida uklonjen. U delu bušotine gde je uklonjen uticaj radnog fluida vlada pritisak iz formacije, a u gornjem delu hidrostatički pritisak. Razlika između pritiska u formaciji i pritiska u unutrašnjosti bušaćih šipki pokreće fluid iz formacije ka nižem pritisku u unutrašnjost bušaćih šipki. Pri testiranju se primenjuje kontrolisana razlika pritiska između formacijskog i pritiska u unutrašnjosti bušaćih šipki. Ovu razliku u pritiscima pri ispitivanju formacije nazivamo diferencijalni pritisak. Regulisanje ove razlike u pritiscima ostvaruje se putem hidrostatičkog pritiska nekim od inertnih fluida. U delu bušotine ispod pakera u formaciji je narušena ravnoteža pritiska prilikom čega se ostvaruje dotok fluida u bušaće šipke. Kompoziciji alata za testiranje uvek se ugrađuju dva ili više registratora pritiska, koji daju dijagramski prikaz

funkcionalne zavisnosti pritiska od vremena. Podaci koji se dobijaju testiranjem formacije imaju dvojak karakter. To su kvalitativni i kvantitativni podaci. Ovi podaci u postupku analize, pružaju značajna saznanja o ispitivanoj formaciji (Jelmert, 2013).

Princip testiranja formacija sastoji se u spuštanju kompozicije alata za testiranje u bušotinu ispunjenu radnim fluidom, neposredno iznad formacije. Sastav kolone za testiranje (slika 3) je opremljen sa dva osnovna alata: paker i tester ventil (Omerzu, 2005).

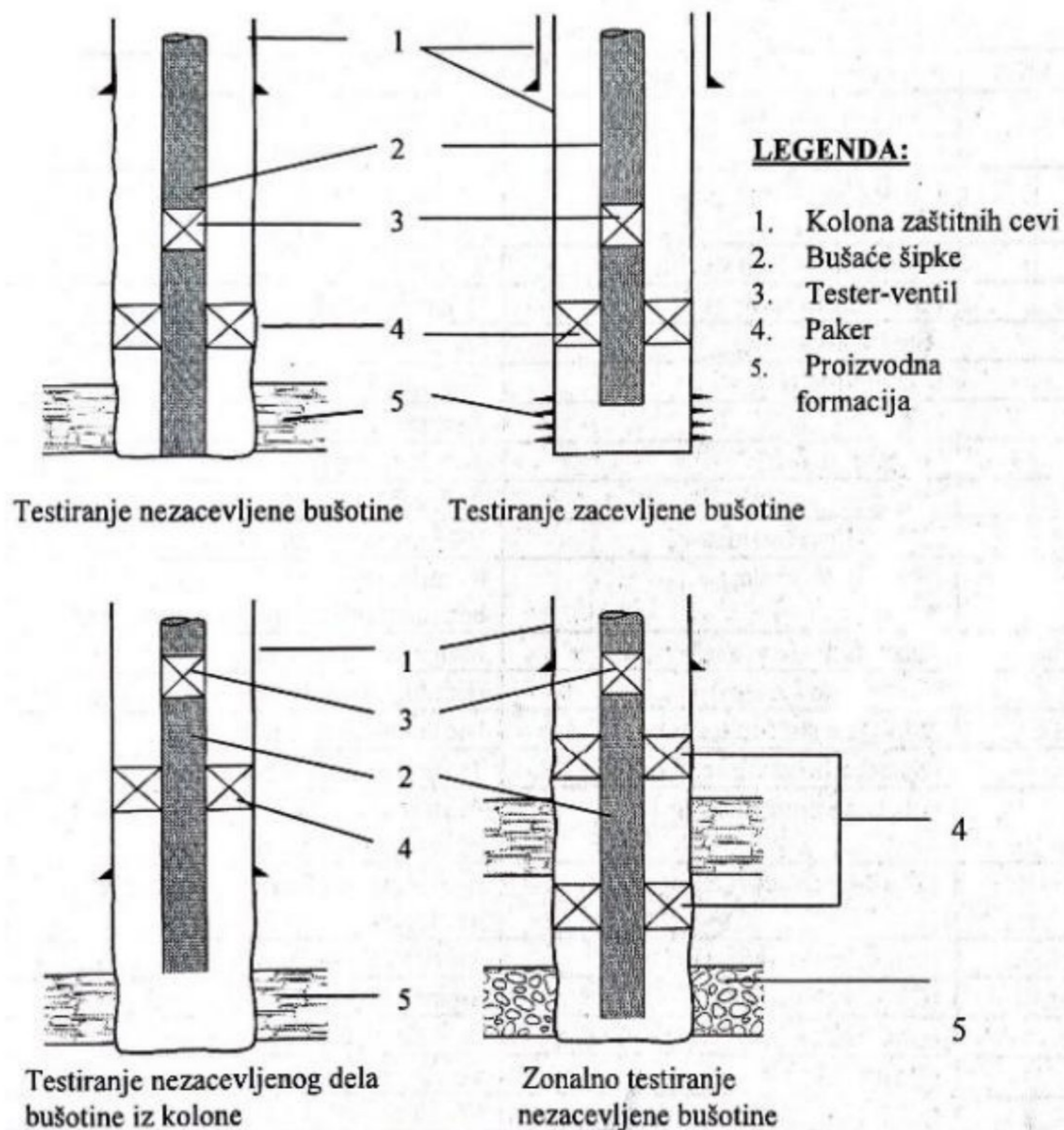


Slika 3: Sastav kolone alata za testiranje (Omerzu, 2005)

Kompozicija alata za testiranje se opterećuje težinom za aktiviranje (G). Opterećenjem kompozicije alata za testiranje, prvo se aktivira paker, pa nakon njega tester ventil. Paker uklanja uticaj pritiska hidrostatičkog stuba radnog fluida na formaciju (P_h), a otvoreni tester ventil omogućava formaciji da dotok fluida pod uticajem razlike pritiska u unutrašnjosti bušačkih šipki (P_j) i pritiska u formaciji (P_s). Osnovni način aktiviranja pakera i tester ventila je primena odgovarajuće težine, koju prenose bušaće šipke i istovremeno sprovode dobijeni formacijski fluid do površine. Više puta se tester ventil otvori i zatvori, pri aktiviranom pakeru u procesu testiranja formacije. Vremenski intervali otvaranja i zatvaranja moraju biti različiti i duži od prethodnog (Omerzu, 2005).

3.1 Tipovi testiranja naftnih i gasnih bušotina

Tipovi i sistemi testiranja mogu biti različiti, ali su zasnovani na sličnom principu: vreme trajanja testiranja, mesto i način aktiviranja pakera, princip rada tester ventila kao i dužina intervala testiranja. Najprihvatljivija klasifikacija je na osnovu mesta aktiviranja pakera i sistema testiranja koji se razvio proizvodnjom tester ventila. U osnovi, sva ispitivanja formacija metodom testiranja, izvode se u bušotinama na osnovu četiri postupka: testiranje u nezacevljenim bušotinama, testiranje nezacevljenog dela bušotine iz kolone, zonalno testiranje nezacevljene bušotine i testiranje zacevljene bušotine. Prikazani su tipovi testiranja (slika 4), kao i mesta postavljanja pakera u zavisnosti od tipa testiranja. (Omerzu, 2005).



Slika 4: Tipovi testiranja (Omerzu, 2005)

Moguće su kombinacije tipova testiranja prema sedištu pakera i načinu oslanjanja kompozicije alata za testiranje u bušotini. Formacije u nezacevljenim bušotinama testiraju se tako što se paker postavlja iznad formacije i ispituje interval od dna bušotine do pakera. U zacevljenim bušotinama paker se oslanja o zid kolone zaštitnih cevi iznad perforiranog intervala. Identičan je postupak i kada se ispituje nezacevljeni deo iz kolone. Ovaj slučaj je čest kada se nakon ugrađene kolone nastavkom bušenja ustanovi prisustvo perspektivnog intervala. Zonalnim testom se ispituje proizvodna formacija, pomoću dva pakera koji obuhvataju moćnost intervala. Razvojem opreme za testiranje omogućeno je da pored klasičnih bušotina testiranje bude moguće i u usmerenim bušotinama (Omerzu, 2005).

3.2 Oprema za izvođenje testiranja bušotine

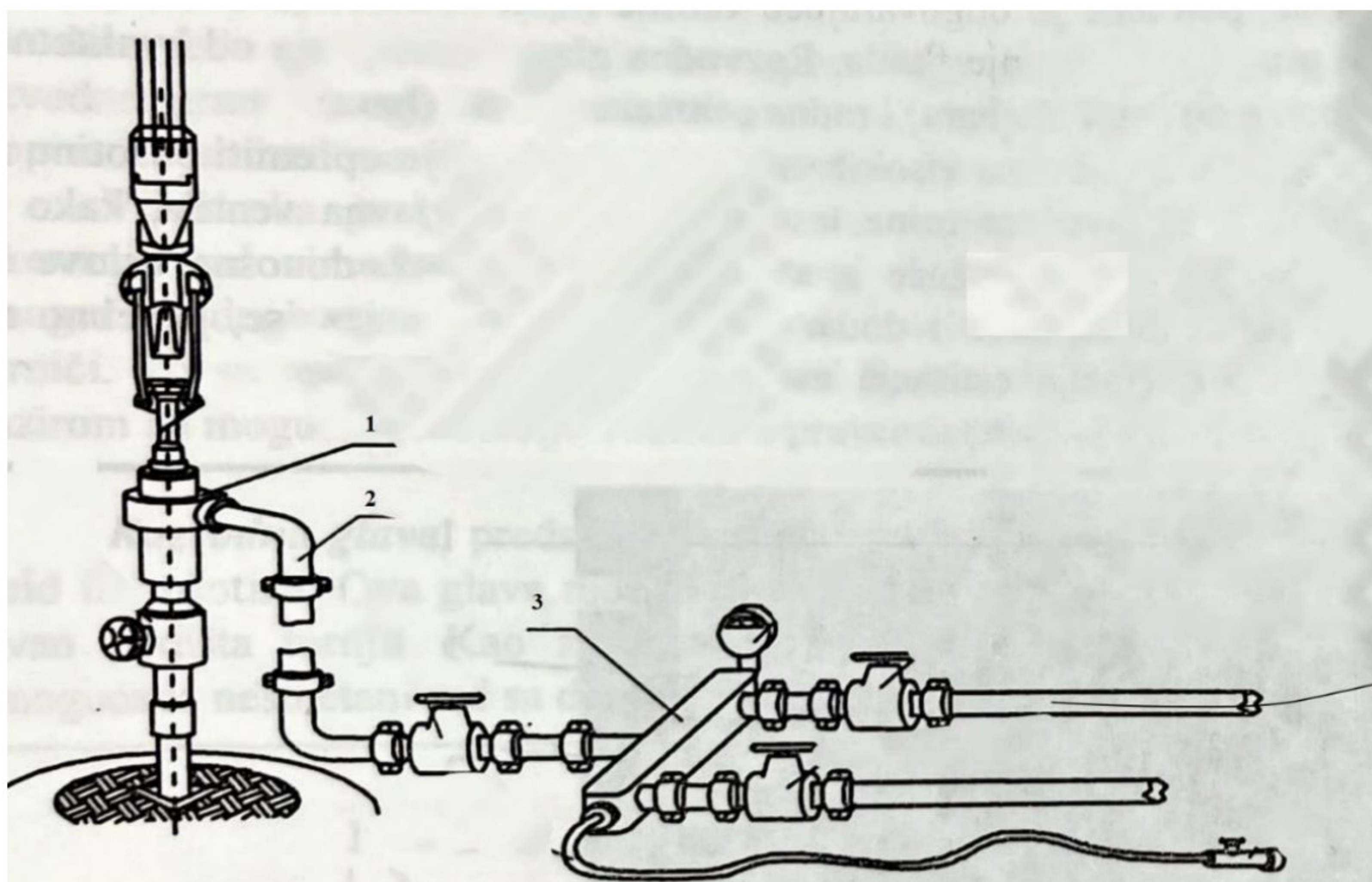
Postupak izrade kompozicije alata za ispitivanje formacije, za konkretni tip i uslove u bušotini nazivamo dizajniranje kompozicije alata za testiranje, ono predstavlja odabir opreme, sastavljanje i ugradnju opreme, a izvodi se u cilju opremanja bušotine za testiranje. Pravilnim dizajniranjem kompozicije alata za testiranje potrebno je obezbediti sigurne i bezbedne uslove za rad kako površinskim opremanjem bušotine tako i u bušotini. Neophodno je kontrolisati opterećenja kojima su izloženi alati kako bi se izbegla havarija. Upotrebom kvalitetnih mernih instrumentima potrebno je vršiti registrovanje dobijenih podataka. Sa aspekta primene metode, dizajniranje kompozicije alata je od izuzetne važnosti za izvođenje testiranja formacije. Alati u bušotini, koji čine kompoziciju alata za testiranje, dizajniraju se u odnosu na paker, kao oprema ispod ili iznad pakera. Postupak dizajniranja kompozicije alata za testiranje mora da se vrši prema: tipu i prečniku bušotine (tabela 1), izboru tester ventila, oslanjanja alata u bušotini i izbora površinske opreme (Omerzu, 2005).

Tabela 1: Tip i prečnik bušotine u odnosu na odabir opreme (Omerzu, 2005)

Sistem jedinica /prečnik	PREČNIK BUŠOTINE							
	NEZACEVLJENE				ZACEVLJENE			
USA (")	5 7/8	6	8 1/2	12 1/4	9 5/8	7	5 1/2	5
SI (mm)	149,2	152,4	216	311,15	244,5	177,8	139,7	127
D opreme	127 mm (5")						95,25 mm (3 3/4")	

Opremanje bušotine površinskom opremom (slika 5) prilikom testiranja naftnih i gasnih bušotina nije standardizovano, već se ono izvodi u skladu ispunjenja svih neophodnih mera sigurnosti. Izbor opreme zavisi od uslova ispitivanja:

- Niski pritisci do 100 (bar-a)
- Visoki pritisci preko 100 (bar-a)



Slika 5: Shematski prikaz površinske opreme (Omerzu, 2005)

Osnovni elementi svake površinske opreme su:

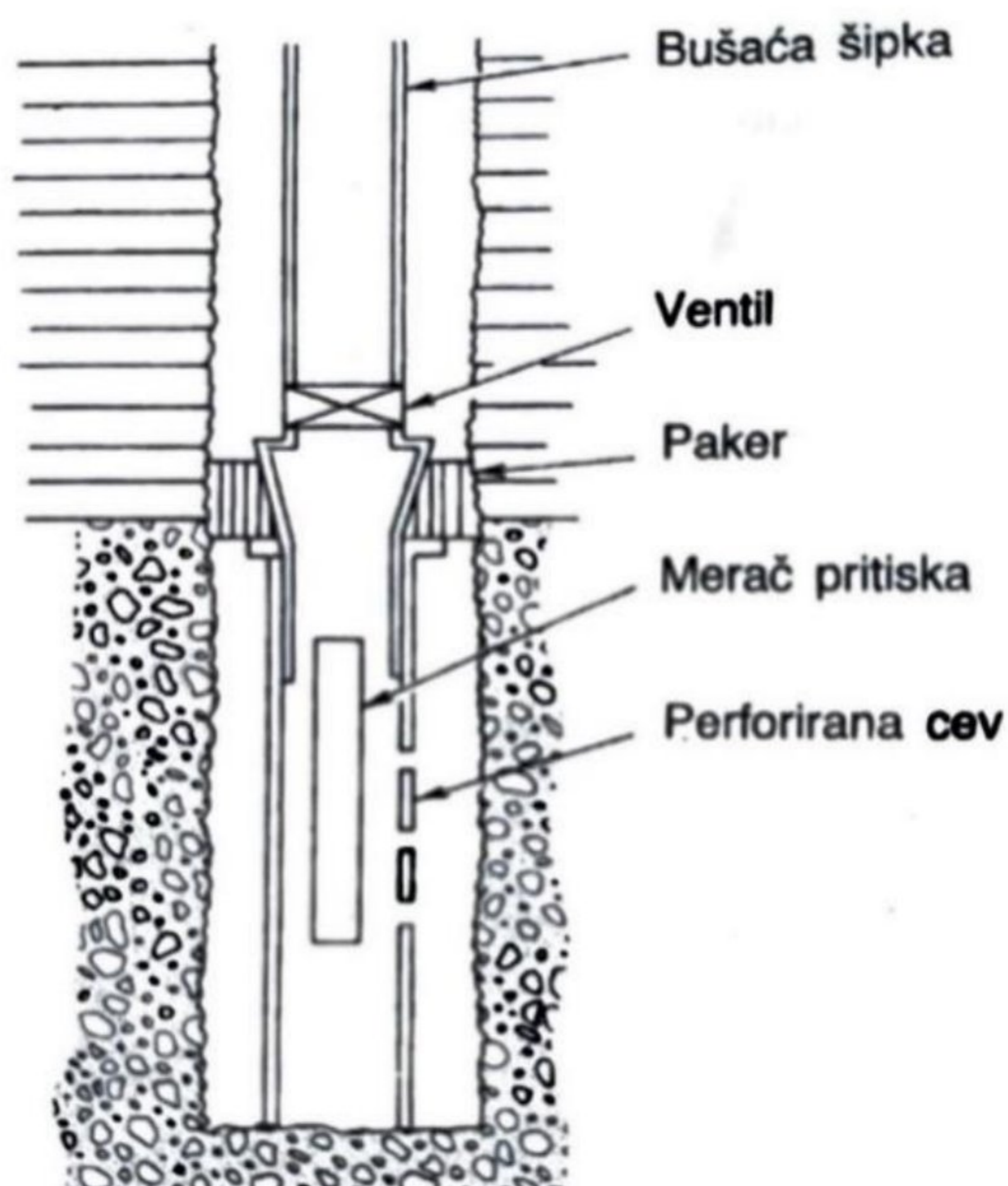
1. Kontrolna test glava - postavlja se na poslednju šipku na kojoj je spuštana oprema za testiranje, pre nego što se otvori tester ventil u bušotini. Postoje test glave niskog pritiska do 100 bar-a i visokog pritiska do 300 bar-a;
2. Odvodni vodovi – služe bezbednom odvođenju formacijskog fluida (koji je na površini dobijen testiranjem) do mesta odlaganja ili razvodne glave, gde se bezbedno mere dobijene količine fluida. Izrađeni su od kvalitetnog materijala, sposobni da izdrže pritiske od 1030 bar-a;
3. Razvodna glava – predstavlja sistem ventila na površini preko koje se usmerava dobijeni fluid iz bušotine. Ova glava može biti u sastavu kontrolne test glave ili kao posebna jedinica izvan podišta tornja. Kao zasebna jedinica izvan zone

opasnosti je najbolje rešenje jer omogućava nesmetani rad sa dobijenim fluidima (Omerzu, 2005).

3.3 Metode testiranja naftnih i gasnih bušotina

Primena metode testiranja naftnih i gasnih bušotina u nezacevljenim bušotinama nazivaju se nekonvencionalne metode testiranja i u njih spadaju: testiranje kroz bušaću šipku i testiranje na karotažnom kablju (Kostić, 2020).

Testiranje kroz bušaću šipku DST („Drill Stem Test”) sastoji se od sistema ventila, merača pritiska, perforirane cevi, pakera i hidrauličkog udarača, a u bušotinu se spušta pomoću bušaćih šipki (slika 6).



Slika 6: Shematski opreme DST-a (Dicky, 1986)

Postoji nekoliko različitih verzija „drilstem” testera čija upotreba zavisi od rastojanja perspektivnog horizonta od dna bušotine. Ukoliko je ovo rastojanje manje od oko 30 m, tester se može postaviti na završnu šipku sa perforiranom cevi koja dopire do dna bušotine. Kada se tester spusti, težina bušaće kolone iznad njega širi gumeni paker i izoluje deo bušotine ispod njega od ostatka bušotine. Nakon toga rotacijom bušaće

kolone otvara se tester ventil, čime se omogućava dotok fluida iz formacije koja se testira. Zbog izolacije pakerom, pritisak više nije uravnotežen težinom isplake, i fluidi iz formacije pritiču u tester i test kolonu. Posle 20 minuta testiranja, ventil se zatvara i bušaća šipka se vade zajedno sa fluidom u njima. Budući da pri testiranju gas izbija na površinu, on se mora spaljivati da ne bi došlo do havarije. Ukoliko perspektivni interval sadrži naftu, ona će biti pomešana sa filtratom isplake, kao i formacijskom vodom. Vode se, međutim, mogu razlikovati po salinitetu i drugim hemijskim osobinama.

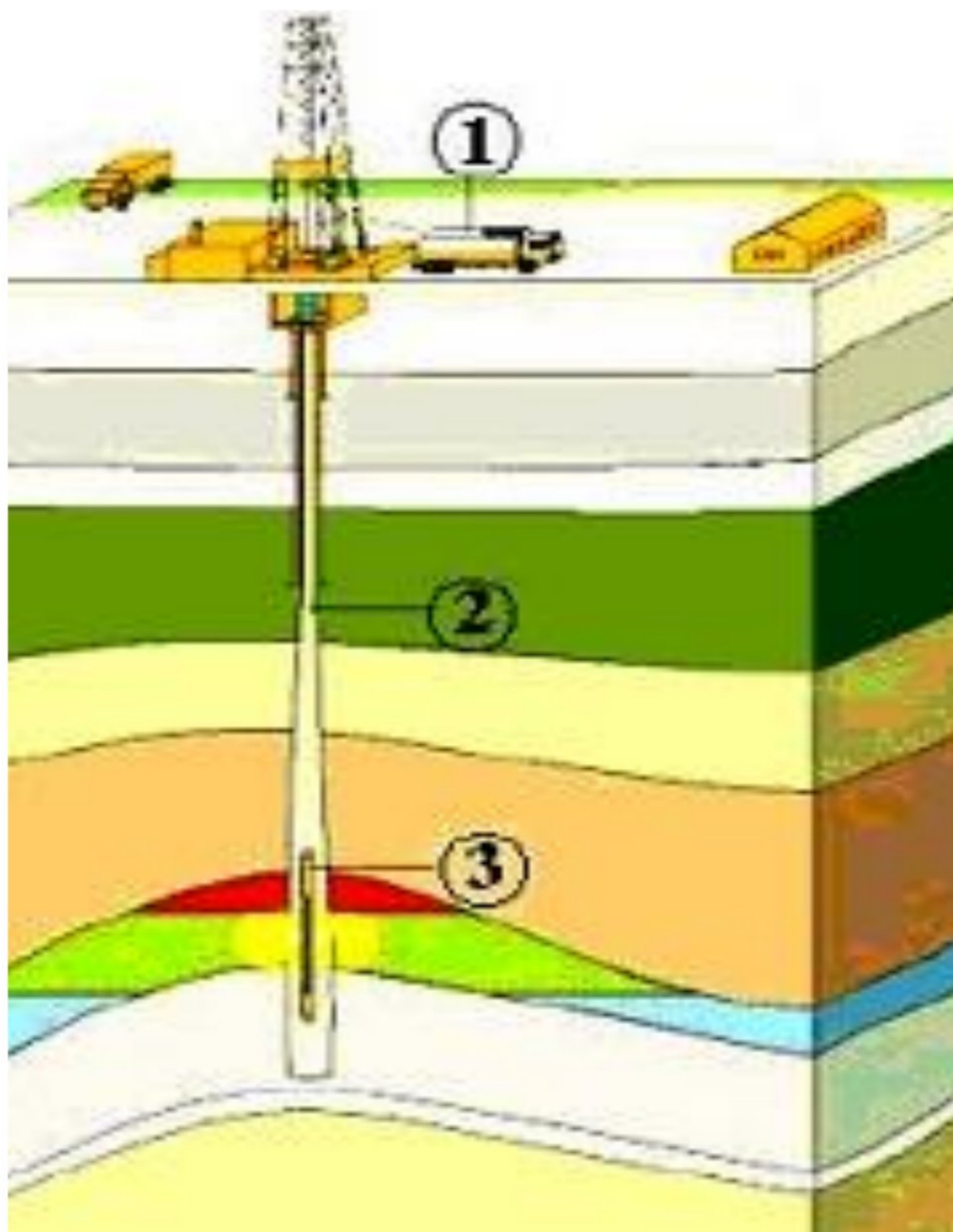
Ukoliko je rastojanje perspektivne formacije od dna bušotine veće, vrši se tzv. selektivno testiranje, sa pakerima za potpuno odvajanje sloja (u povlati i podini), ili čak razdvajanjem više slojeva. Ti selektivni testeri sadrže po dva gumena pakera koji izoluju određeni interval u bušotini. Tester se postavlja pomoću sistema čeličnih hvataljki (visećeg sidra), koje se zabijaju u zidove bušotine držeći paker iznad i ispod testiranog intervala. Perforirana cev se zatim postavlja između dva pakera i pristupa se testiranju.

U zavisnosti od metode testiranja, neophodno je da kanal bušotine na mestu postavljenog pakera bude očuvane geometrije, odnosno da ima povoljan prečnik, ravne i neispucane zidove. S porastom dubine raste potreba za navedenim preduslovima. Isplaka mora da cirkuliše najmanje jedan ciklus da bi se sve krhotine iznele iz bušotine. Za to vreme meri se težina isplake da bi se proverio hidrostatički pritisak. Rezultati testiranja formacije registruju se na površini, uz uzimanje svih relevantnih uzoraka fluida. Na poslednju bušaću šipku (na površini) postavlja se tzv. „kontrolna glava” za testiranje, koja sadrži ventil, površinsku diznu, manometar i posebno gumeno crevo za praćenje priteklih fluida i njihovo uzorkovanje. Pri testiranju se uzimaju uzorci svih dobijenih fluida radi laboratorijskih analiza (Kostić, 2020).

Dotok gasa kod DST metode testiranja obično se manifestuje čestim oscilacijama pritiska na površini izazvanim probijanjem kroz isplaku, ali se on u povoljnim slučajevima može ustaliti. Uzorci gasa uzimaju se desetak minuta od njegove pojave na površini kako bi se dobila pouzdanija slika o njegovom sastavu. Uzorak se preko pomenutog gumenog creva prenosi u staklenu ili čeličnu posudu, zavisno od pritiska. U slučaju da se na površini pojavi gazolin, što se manifestuje bojenjem plamena u narandžasto – crvenu boju, potrebno je uzorkovati i njega, pri čemu je zbog obično male količine poželjno hvatati ga tokom celog testiranja. Za analizu dovoljno je 0,5 l

uzorka. Kod testiranja naftonosnog sloja sa naftom većeg gasnog faktora (GOR), u početku se može dobiti samo manifestacija dotoka gasa ili čak samo dotok vode, o čemu treba voditi računa. Za kompletnu analizu uzorka nafte potrebno je bar 1 l čiste nafte, a obično se koristi plastični kanister zapremine od 3-5 l (Kostić, 2020). Nedostatak DST se ogleda u tome što iziskuje dosta vremena, izolovanost formacije pakerima nije uvek dobra, a takođe postoji i mogućnost „zaglave” alata.

Kablovski tester je specijalan uređaj kojim se upravlja preko kabla iz karotažnih kola. Tipičan sistem (slika 7) za testiranje sačinjen je od: 1 – Površinska jedinica (karotažna kola), 2 – Kabal za spuštanje testera, 3 – tester (Kostić, 2020).



Slika 7: Prikaz testiranja na karotažnom kablu (<httpswww.automatika.rs>)

Prilikom testiranja fluidi iz testirane formacije dotiču u poseban rezervoar u donjem delu sistema. Kada se tester dovede naspram perspektivnog horizonta, što se može kontrolisati pomoću krive SP ili gama karotaža, ostvaruje se kontakt uz zid bušotine papučom pakera. Zatim se u formaciju koja se testira ispaljuje jedno ili dva kumulativna punjenja koja prave dotočne kanale. Ove perforacije se izoluju od ostatka bušotine pomoću gumenog izolatora, pa se meri pritisak u zatvorenom stanju. Zatim se otvara ventil za dotok i fluidi iz formacije pritiču u rezervoar testera. Posle toga dotočni ventil se zatvara i ponovo se meri pritisak. Na kraju merenja papuča pakera se odvaja od zida bušotine i ceo tester se zajedno sa fluidom izvlači na površinu. Postoji više vrsta kablovskih testera:

- Ponovljeni test formacije (RFT) – služi za više testiranja pritisaka i uzorka fluida.
- Intervalni tester formacije (IFT) – koristi se za pojedinačna testiranja nezacevljenih ili zacevljenih bušotina.
- Tester za uzimanje više uzoraka (MTF) – služi za više testiranja nezacevljenih ili zacevljenih bušotina.

Prednosti kablovskog testiranja su u brzom pribavljanju rezultata. Njegova velika mana je, međutim, u ograničenoj zapremini rezervoara za fluid, pa se može desiti da se iz formacije sa dobrom propusnošću dobije uglavnom ili isključivo filtrat isplake. Razlog toga je što kod visokopropusnih formacija filtrat isplake prodire duboko u sloj, pa je originalni fluid potisnut. Za testiranje formacije velike propusnosti, potrebno je koristiti što veći rezervoar za fluide (Kostić, 2020).

3.4 Tehnološki postupak testiranja naftnih i gasnih bušotina

Operacija testiranja naftnih i gasnih bušotina sastoji se od grupe poslova: detaljno planiranje operacije testiranja, pravilno izvođenje i kvalitetna analiza podataka dobijenih testiranjem formacije. Osnovni radovi koje je potrebno obaviti pri operaciji testiranja bušotina i formacija predstavljaju skup tehnoloških postupaka koje je neophodno izvesti u celini:

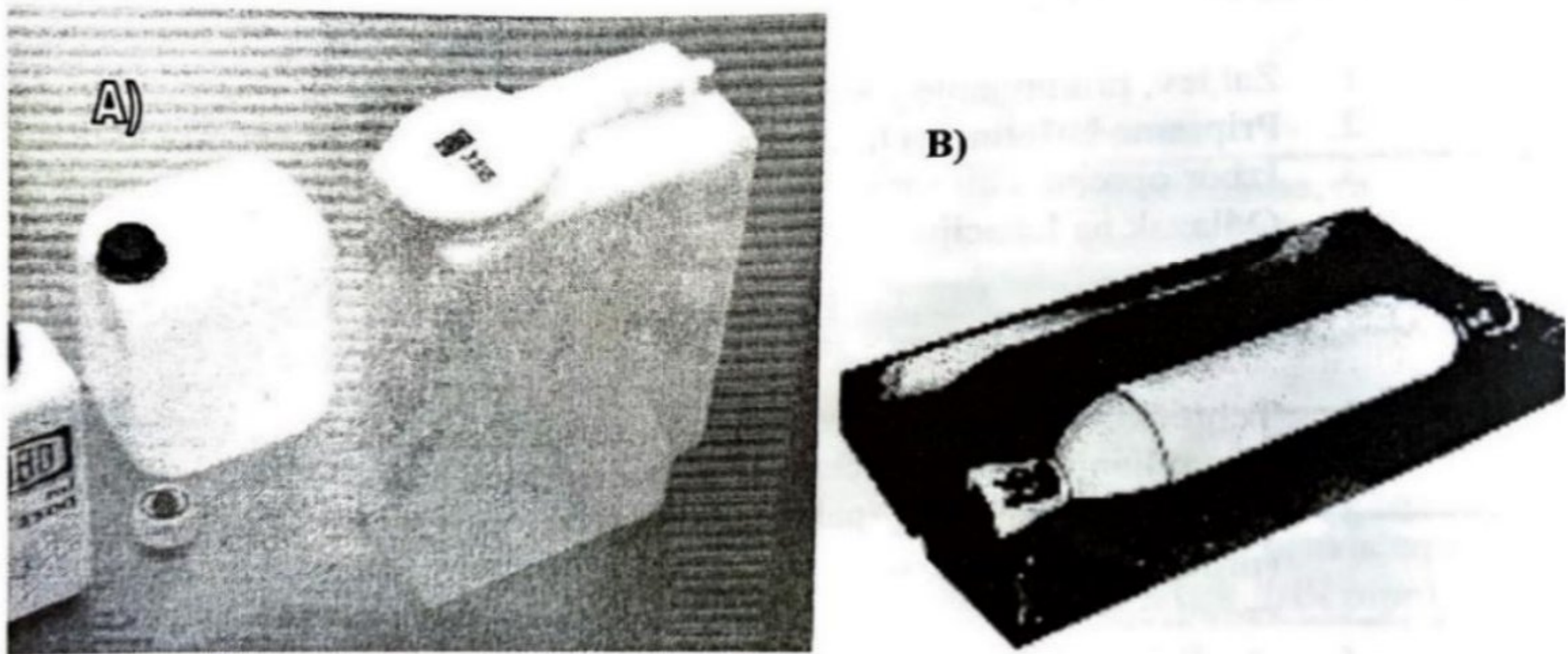
- Pre testiranja:
 - Prikupljanje poznatih podataka
 - Priprema bušotine za testiranje

- Izbor opreme
- Odlazak na teren
- Testiranje:
 - Provera mere sigurnosti
 - Sastavljanje alata
 - Aktiviranje opreme (paker i test – ventil)
 - Deaktiviranje opreme, vađenje i uzimanje uzorka
 - Vođenje zapisnika o operaciji (vrsta dobijenog fluida i ukupna količina protoka)
- Posle testiranja:
 - Rastavljanje opreme
 - Očitavanje karakterističnih tačaka za svaku fazu merenja
 - Izrada i interpretacija dijagrama
 - Izrada finalnog izveštaja

Ovaj postupak i redosled izvođenja radova odnosi se na izvođača radova.

Učešće geologa u pripremnim radovima na terenu pre operacije je veoma bitan sa aspekta uspešnosti izvođenja operacije, a sastoji se u sledećim postupcima koje geolog mora da izvede:

- Prikupiti podatke o testiranju u istoj formaciji u okolnom području.
- Odrediti mesto za ugradnju pakera koristeći podatke: operativnog geološkog dijagrama, elektrokarotaznog dijagrama, podatke mehaničke brzine bušenja, karakter jezgrovanja i odrediti efektivnu debljinu nabušenog intervala.
- Prikupiti podatke o salinitetu radnog fluida i aditivima koji su dodati u radni fluid.
- Izračunati zapreminu radnog fluida ispod pakera, kao i unutrašnju zapreminu bušaćih šipki.
- Pripremiti ambalažu (slika 8) za uzimanje i označavanje uzoraka (A – plastični kanister u slučaju tečnog fluida i B – gasna boca u slučaju gasovitog fluida).

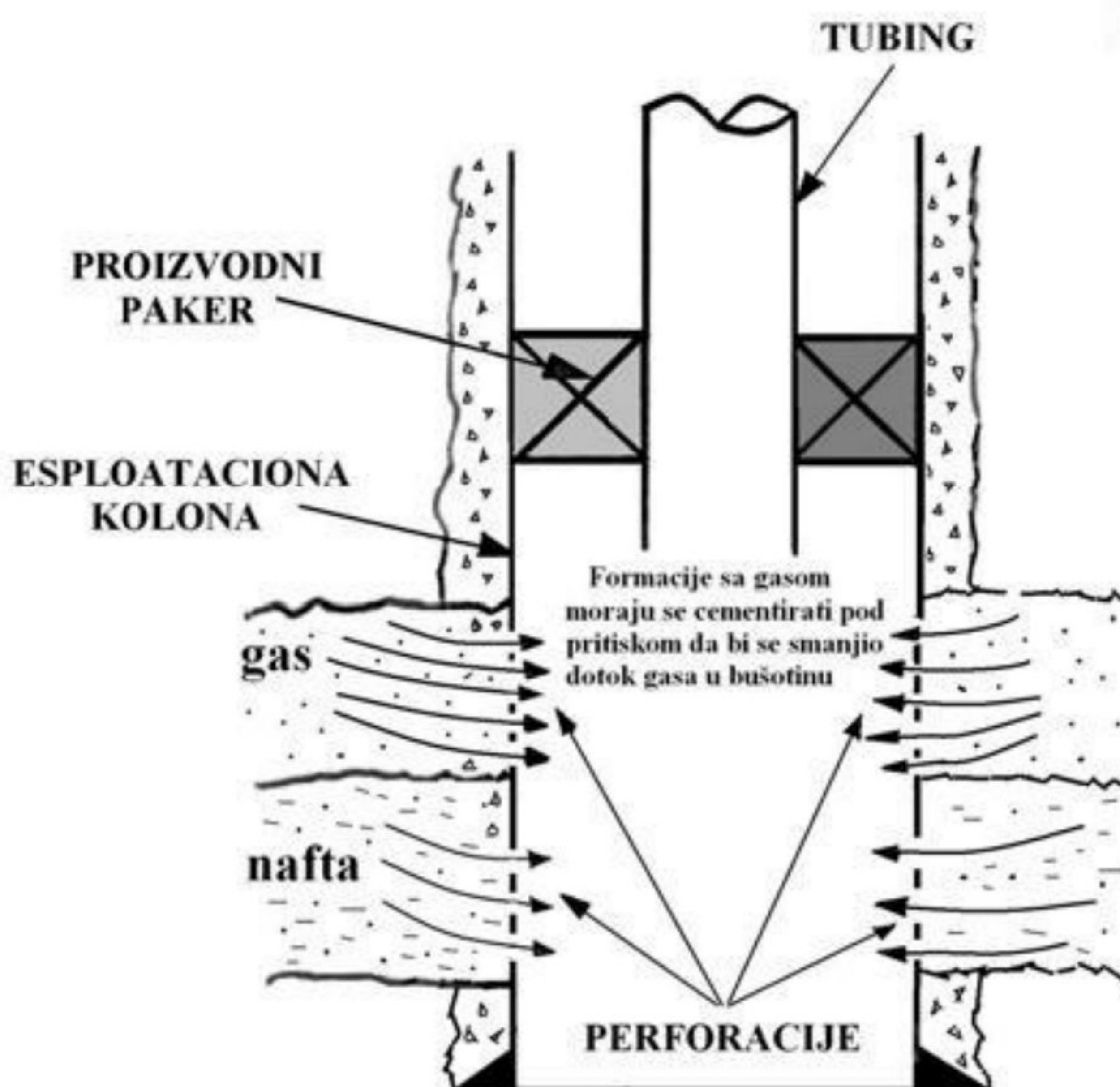


*Slika 8: Ambalaža za uzimanje uzoraka: A – kanister i B – gasna boca
(Omerzu, 2005)*

Navedene postupke geolog mora pripremiti unapred kako bi se rezultati testiranja mogli smatrati validnim. Geolog tokom testiranja mora da obeleži uzorke određenim oznakama: datum uzimanja uzorka, naziv bušotine, vrsta uzorka, način uzimanja uzorka, mesto uzetog uzorka, pritisak u boci (u slučaju da je fluid u gasovitom agregatnom stanju) i interval testiranja (Omerzu, 2005).

4. OSVAJANJE

Osvajanje bušotine predstavlja skup operacija koje se izvode nakon završetka bušenja, a neophodne su za ostvarivanje eksploatacije ugljovodonika. Proces osvajanja mora biti izuzetno optimizovan kako sa aspekta tehničke opremljenosti tako i ekonomske isplativosti. Osvajanje podrazumeva uspostavljanje kontakta sa pribušotinskom zonom produktivnog sloja (perforiranjem), izazivanje pritoka slojnih fluida u kanal bušotine (slika 9). Osvajanje bušotine predstavlja preduslov za utvrđivanje proizvodnih parametara i izvođenje hidrodinamičkih merenja (Kovinčić i Knežević, 2014).



Slika 9: Pritok fluida u kanal bušotine (Kovinčić i Knežević, 2014)

Osvajanje bušotine predstavlja primenu kompleksnih tehnoloških operacija u cilju izazivanja dotoka i obezbeđivanja potrebne produktivnosti u skladu sa mogućnostima sloja koji je predmet ispitivanja. Nakon završetka bušenja, otvaranja sloja i perforacije kolone zaštitnih cevi (sekundarno otvaranje sloja) zona pored dna i

površina otvorenog sloja mogu da budu zaprljane tankom glinenom suspenzijom ili glinenim kolačem. Osim toga, delovanje na stene udarnim talasima koji se odlikuju širokim dijapazonom frekvencija tokom perforiranja, može doći do nepovratnih fizičko-mehaničkih oštećenja u slojevima finodisperzne porozne sredine. Usled toga dolazi do formiranja zone sa smanjenom propusnošću ili sa potpunim odsustvom propusnosti (Kovinčić i Knežević , 2014).

Na proces osvajanje bušotine značajno utiče i sam karakter proizvodnog fluida, koji može biti nafta, gas, voda ili mešavina tečne i gasovite faze. Dakle, neophodno je poznavanje hemijskih i fizičkih karakteristika proizvodnog fluida. Prilikom osvajanja bušotine važno je steći informacije o samom kolektoru, njegovim strukturnim karakteristikama i mineralnom sastavu. Poznavanje navedenih karakteristika je ključno da bi se izvršilo osvajanje bušotine i odabrao optimalan način eksploatacije. Nakon određenog vremena eksploatacije može doći do intervencija u samoj bušotini usled pada proizvodnje, koje se izvode u cilju ostvarenja optimalne proizvodnje. Ovakvi radovi označeni su kao remontni i obuhvataju sledeće:

- Kapitalni remont: odnosi se na radove na novoizbušenim bušotinama i bušotinama koje su u proizvodnji, zatim kada se otvaraju intervali (perforacije), vrši dopucavanje postojećeg intervala, kada se rade otvaranje novih intervala, kada se radi zatvaranje intervala, kada se rade izolacije intervala (cementni čep i mostovni čep), kada se rade zahvati na sloju (stimulacije, hidrauličko frakturiranje, izolacija vode, borba sa peskom). Jednom rečju, kapitalni remont podrazumeva intervenciju na pribušotinskoj zoni produktivnog sloja (na perforiranom intervalu) (Kovinčić i Knežević , 2014).
- Tekući remont: podrazumeva zamenu oštećene bušotinske opreme, zamenu oštećenog tubinga, klipnih šipki, čišćenje taloga, remont dubinske pumpe, remont gas lift ventila, remont gravel pak opreme, instrumentacije razne bušotinske opreme i sve ostale intervencije u kanalu bušotine u kojima se ne interveniše na pribušotinskoj zoni produktivnog sloja na perforiranom intervalu, već se održava oprema unutar bušotine i otklanjaju se havarije (Kovinčić i Knežević , 2014).

Radovi na remontu novoizbušenih bušotina, počinju montažom preventerskog sklopa, perforiranjem produktivnog intervala, osvajanjem i gušenjem bušotine. Pošto je najčešće ponavljana operacija osvajanje i gušenje bušotine, neophodna su nam osnovna saznanja o konstrukciji bušotine (odnosu tubing / casing), pritiscima, zapreminama, hidraulici, termo tehnicima, kontroli pritiska kod dotoka fluida iz sloja u bušotinu i radnim fluidima, koje koristimo u remontnim radovima. Sve radove, nakon bušenja, koji se izvode na bušotinama, počevši od novoizbušenih bušotina, pa tokom celog veka eksploatacije, izvodi pogon za remont (remontno postrojenje). Cilj osvajanja predstavlja obnavljanje prirodne propusnosti kolektora po celoj dužini zone sloja pored dna i dobijanje proizvodnje iz bušotine u skladu sa njenim potencijalnim mogućnostima. Sve operacije na uspostavljanju pritoka i osvajanje bušotine, svode se na formiranje depresije na dnu, to jest na formiranje pritiska koji je manji od ležišnog pritiska. Pri tome u kolektorima sa pogodnim petrofizičkim karakteristikama depresija mora da se postigne brzo i da bude velika, dok u manje pogodnim kolektorima depresija se postiže postepeno i ne sme biti velika. Bušotine se osvajaju nakon bušenja, perforiranja ili remonta, prilikom čega dolazi do punjenja bušotine radnim fluidom. Tokom perforiranja represija pritiska na sloj (razlika između pritiska na dnu i ležišnog pritiska) ne sme da bude veća od 5% u odnosu na ležišni pritisak. Radi obavljanja remonta bušotina se puni vodom ili slanim rastvorom (Kovinčić i Knežević, 2014).

4.1 Uspostavljanje dotoka fluida u kanal bušotine

Razumevanje mehanike fluida je od velikog značaja za sprovođenje postupka osvajanja bušotina. Uspostavljanje dotoka fluida predstavlja cilj osvajanja bušotine i osnov je za dalja ispitivanja. Ono podrazumeva da se u zacevljenoj bušotini eksploatacionom kolonom cevi (casing), cementiranoj, uspostavi kontakt sa pribušotinskom zonom produktivnog sloja (perforiranjem - napucavanjem casinga), izazivati prtok slojnih fluida u kanal bušotine, osvojiti bušotinu (dovođenjem do pune proizvodnje). Ovo znači da se uspostavljanjem kontakta sa pribušotinskom zonom, izjednačuje pritisak u sloju i bušotini. U bušotini, imamo slojni pritisak P_{sl} , na dnu bušotine, a P_n (atmosferski pritisak) na ustima bušotine (površini zemlje), sa značajnim razlikama u pritiscima ($P_{sl} > P_n$). Da bi znali krajnju razliku u pritiscima na površini i na

dnu bušotine, a i u bilo kojoj tački po dubini bušotine koristimo sledeću zakonitost, izraženu formulom :

$$P_h = \frac{\gamma H}{10}$$

P_h – hidrostatički pritisak ili pritisak na dnu bušotine (Kg/cm^2); γ – gustina fluida (Kg/dm^3); H – dubina (m).

Formula predstavlja osnovu za iskazivanje vrednosti pritiska na dnu bušotine, pri čemu se mogu računati pritisci u bušotini na bilo kojoj dubini i sa bilo kojom gustinom fluida. Primena formule je ograničena isključivo na statičke uslove tj. kada je bušotina zatvorena. Ukoliko imamo cirkulaciju fluida unutar bušotine tada uvodimo parametre koji utiču na pritisak na dnu bušotine. Usled cirkulacije fluida dolazi do trenja fluida i zidova bušotine, kao i uticaja pritiska koji vlada na površini. U tom slučaju koristi se sledeća formula:

$$P_{db} = P_h + P_p - P_t$$

P_{db} – Pritisak na dnu bušotine u uslovima cirkulacije fluida (bar); P_h – hidrostatički pritisak u bušotini (bar); P_p – pritisak na površini (bar); P_t – pritisak trenja (bar).

Za razliku od fluida u tečnom agregatom stanju, kod kojih se stišljivost može gotovo zanemariti, kod fluida u gasovitom agregatom stanju stišljivost je izuzetno bitna fizička osobina. Fluidi u gasovitom agregatom stanju menjaju zapreminu pod dejstvom pritiska i na njih deluje Bojl – Mariotov gasni zakon. Gasni zakon pokazuje da je proizvod pritiska i zapremine uvek isti. Kada u bušotinu uđe izvesna količina gasa on zauzima izvesnu zapreminu pod dejstvom pritiska na dnu bušotine. Kada gas počne da se kreće ka površini dolazi do smanjenja pritiska, a do povećanja zapremine. Obavezno je dobro poznavanje i kontrola pritiska gasova u bušotini kako prilikom osvajanja bušotine tako i pri eksploataciji (Boyun, et al., 2007).

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{constant}$$

P_1 – Pritisak na dnu bušotine (bar) ; V_1 – Zapremina gasa na dnu bušotine (dm^3) P_2 – Pritisak na određenoj dubini u bušotini (bar) ; V_2 – Zapremina na određenoj dubini u bušotini (dm^3) (Boyun, et al., 2007).

4.2 Oprema za izvođenje osvajanja bušotine

Oprema za postupak osvajanja bušotine sačinjena je od opreme na površini i opreme koja čini kompozicija alata koja se spušta u bušotinu. Odabir opreme prilikom osvajanja bušotine uslovljen je odabranom metodom osvajanja.

Oprema za postupak osvajanja klipovanjem (slika 10) se sastoji od remontnog postrojenja koje čini radni bubanj i sajla za klipovanje na koju je povezana oprema za klipovanje. Elementi koji čine opremu za klipovanje su: gume za klipovanje, klipne šipke i komore za klipovanje, koja sprečava prosipanje fluida iz bušotine. Gume za klipovanje su ojačane čeličnom žicom i različite su konstrukcije.



Slika 10: Oprema za klipovanje (Kovinčić i Knežević, 2014)

Azotno postrojenje (slika 11) je opremljeno rezervoarom sa tečnim azotom, (-195.83 °C), grejačem azota, specijalnom pumpom visokog radnog pritiska (350 bar-a). Osvajanje bušotina može se vršiti kombinacijom rada savitljivog tubinga i azotnog postrojenja, tako što se savitljivi tubing, uz montažu svojih preventera, spusti na određenu dubinu, a zatim kroz savitljivi tubing, iz azotnog postrojenja, vrši utiskivanje azota.

4.3 Metode osvajanja bušotine

Prilikom osvajanja bušotine mogu se primeniti različite metode kako bi se uspostavio dotok fluida iz pribušotinske zone. Metode koje se najčešće koriste u praksi su: ispiranje bušotine, klipovanje, zamena radnog fluida sa azotom i osvajanje azotom upotrebom savitljivog tubinga (Kovinčić i Knežević , 2014).

Ispiranje bušotine je način koji podrazumeva zamenu tečnosti veće gustine sa, tečnošću manje gustine. Zamena tečnosti se obično obavlja u skladu sa sledećom šemom: isplaka – voda – nafta – kondenzat. Postoji dva načina ispiranja bušotine: direktno i povratno. Prilikom kojih dolazi do upotrebe pumpnokompresorskih cevi, koje povezuju nadzemnu opremu i pumpni agregat. Pomoću njih se vrši ispiranje pod pritiskom, a zatim se upumpava tečnost. Tečnost iz bušotine dospeva u posudu za sabiranje tečnosti. Tečnost se upumpava pomoću cementacionog agregata ili pumpnog uređaja. Ovaj metod se koristi za osvajanje bušotina sa velikim ležišnim pritiskom ukoliko postoje kolektori koji se mogu lako osvojiti. Maksimalno smanjivanje pritiska iznosi najviše 25% pritiska koji formira stub isplake, što predstavlja ograničenje ovog postupka (Kovinčić i Knežević , 2014).

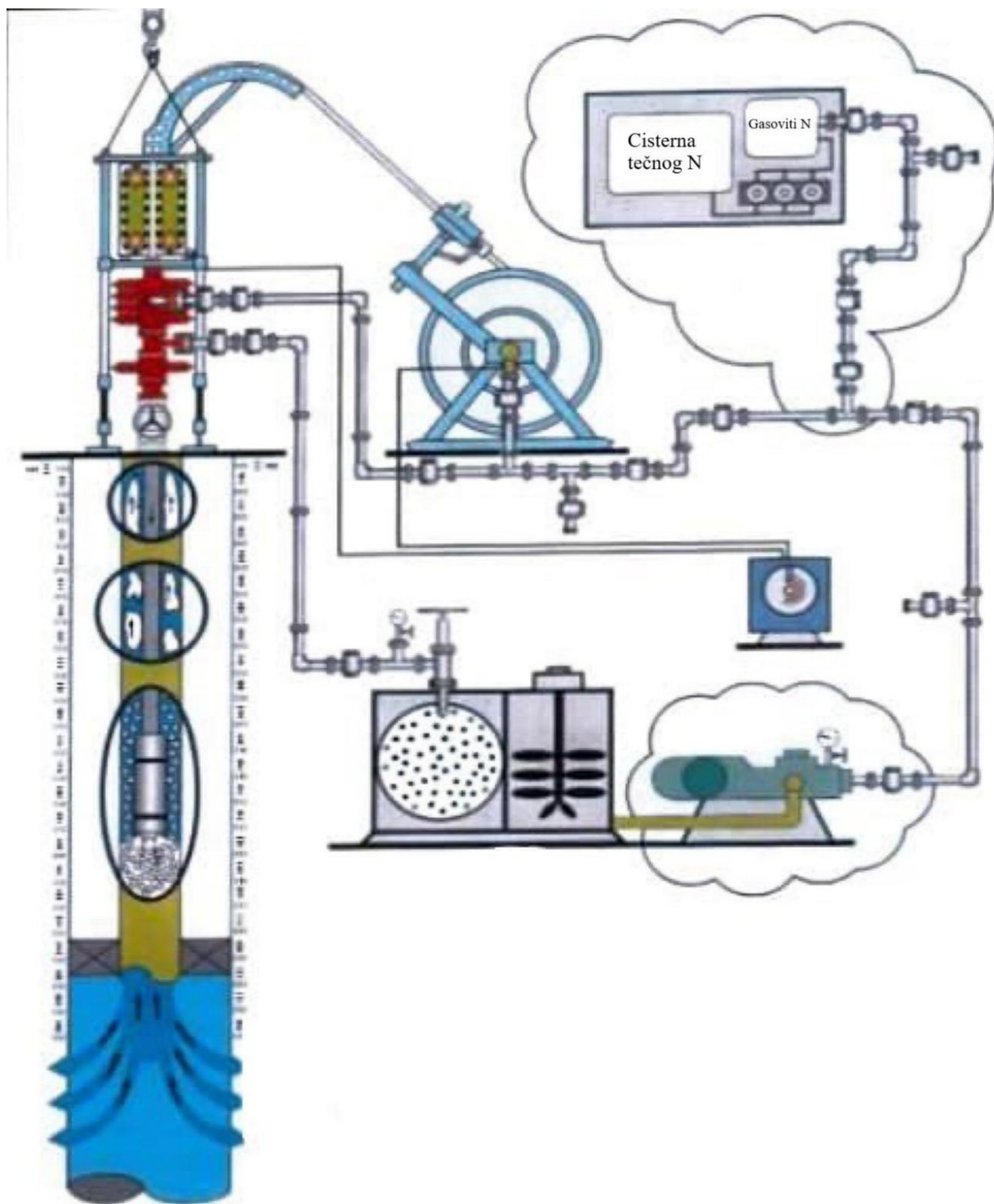
Klipovanje je jedna od osnovnih metoda osvajanja bušotina. Osnovni postupak klipovanja je da, kada klipna šipka (guma za klipovanje) zaroni u fluid, koji se nalazi u tubingu, zadizanjem na gore iznese iz tubinga fluid u približnoj unutrašnjoj zapremini tubinga. Nivo fluida se postepeno smanjuje, po nekoliko desetina metara, time se postepeno smanjuje depresija na sloj. Dubinu zaranjanja klipa, nivo i intenzitet (brzinu) klipovanja određuje dežurni geolog. Posle isklipovane određene količine fluida, odnosno posle sniženja nivoa, čeka se vreme porasta nivoa tj. vreme koje je potrebno da se vidi efekat postignute razlike u pritiscima. Remontno postrojenje treba da je opremljeno dubinometrom (merač dubine klipa). Ukoliko nema dubinomer, ručno se na klipnoj sajli markiraju (šlinga) dubine. Nivo fluida se registruje klipom, klipnom sajlom, koja se uvije kad klip udari u nivo. Eventualne havarije prilikom osvajanja klipovanjem mogu biti: intenzivno klipovanje – nedovoljno čekanje na dotok, zaranjanje klipa duboko u fluid i pravljenje velike depresije što sve može dovesti da bušotina naglo proradi, da klip šipka „izleti” iz bušotine i izazove povreda radnika.

Ukoliko remontno postrojenje nema bubanj za klipovanje, klipovanje se izvodi pomoću alata na žici (Kovinčić i Knežević , 2014).

Zamena radnog fluida azotom tj. istiskivanje fluida iz bušotine upotrebom azotnog postrojenja (slika 11) je mnogo brža, ali i skuplja operacija osvajanja bušotine. Osvajanje bušotina azotom se izvodi tako što se azot, pumpom, utiskuje u tubing pod pritiskom, uz otvoreni casing. Nakon utisnute proračunate količine azota, u bušotini se nalazi onoliko manje fluida koliko je upumpano azota. Postepenim rasterećenjem pritiska, liftiranjem fluida, koje se vrši preko regulacione dizne, azot izlazi u atmosferu, a nivo fluida, a time i pritisak fluida na sloj opada, sve dok sloj ne počne sam da proizvodi fluid. Efekat je identičan kao kod klipovanja (Omerzu, 2005).

Metoda osvajanja azotom preko savitljivog tubinga obuhvata dva načina izvođenja:

- Kontinuirano utiskivanje koje predstavlja najefikasniju metodu za postizanje stanja neravnoteže tj., stanje kada je slojni pritisak veći od hidrostatičkog pritiska fluida. Ova tehnika omogućuje azotu da se disperguje u bušotini, tako da olakšani fluid u međuprostoru omogućuje sporu i kontrolisanu proizvodnju iz sloja. Princip metode savitljivog tubinga se sastoji iz toga što se spušta na utvrđenu dubinu u bušotini, odakle se vrši liftiranje fluida dok sloj ne počne sam da proizvodi fluid (Kovinčić i Knežević , 2014).
- Utiskivanje sa prekidima - Ova tehnika se primenjuje tako što se savitljivi tubing spusti na utvrđenu dubinu ispod nivoa fluida u bušotini pre nego što se krene sa utiskivanjem azota. U ovom slučaju, pritisak pumpanja azota mora biti veći od hidrostatičkog pritiska fluida u bušotini iznad tačke utiskivanja. Kada pritisak utiskivanja azota prevaziđe hidrostatički pritisak, azot ulazi u međuprostor i započinje operaciju gas lifta. Kako se hidrostatički pritisak stuba fluida iznad tačke utiskivanja smanjuje, protok kompresovanog gasa (azot) u savitljivom tubingu se ubrzava, izazivajući efekte slične kao kod povećanja cirkulacije azota (Kovinčić i Knežević , 2014).



Slika 11: Azotno postrojenje (Kovinčić i Knežević, 2014)

5. HIDRODINAMIČKA ISPITIVANJA

Hidrodinamička merenja se izvode u cilju dobijanja podataka o jednoj bušotini, odnosno ležištu. Količina nafte i gasa koja se dobija određenom metodom eksploatacije vremenom počinje da se smanjuje. Za to može biti više razloga, a tri osnovna su: slabljenje energije sloja, oštećenje pribušotinske zone (stvarni skin) i smanjenje propusnosti ugrađene opreme (pseudo skin). U slučaju slabljenja slojne energije, bušotina se mora pripremati za neku od sekundarnih metoda proizvodnje nafte, jer se propusnost sloja ne može povećati u tolikoj meri da obezbedi ekonomičnost nastavka eksploatacije eruptivnom metodom. U preostala dva slučaja, slojna energija je još uvek dovoljna za eksploataciju potrebnih količina nafte i gasa, ali je propusnost oslabljena u tolikoj meri, da je pad proizvodnje nafte i gasa prevelik za ekonomičan nastavak proizvodnje eruptivnom metodom. Da bi se takve poteškoće prilikom eksploatacije izbegle vrše se ispitivanja hidrodinamičkog karaktera. Kroz hidrodinamička ispitivanja rada naftnih i gasnih bušotina treba da se dođe do različitih podataka o karakteristikama proizvodnog sloja i da se odredi uticaj stepena nesavršenosti bušotine na njenu proizvodnju. Vrše se ispitivanja bušotina i slojeva, sa osnovnim ciljem određivanja koeficijenta poroznosti i propusnosti sloja, stepena skin faktora (faktora oštećenja stena pribušotinske zone), geometrije ležišta, početne i trenutne vrednosti slojnog pritiska, količine proizvedene nafte pri određenom prečniku ugrađenih dizni i konstantnom pritisku itd. Dakle, hidrodinamičko ispitivanje naftnih i gasnih bušotina podrazumeva proizvodnu bušotinu sa ustaljenim (konstantnim) protokom – ustaljeni režim rada, ili sa serijom različitih veličina protoka (pri čemu jedan od njih može biti i $q = 0$, odnosno bušotina je zatvorena), kada se simultano registruju vrednosti promene pritiska u bušotini, korišćenjem opreme za merenje pritiska na dnu bušotine (Hođžić, 2019).

5.1 Opremanja i princip izvođenja hidrodinamičkih merenja

Oprema za izvođenje postupka hidrodinamičkih merenja sastoji se od: dubinske (bušotinske) i površinske opreme. Dubinska oprema sačinjena je od kompozicije alata koju čine: dubinski mehanički manometar, dubinski mehanički termometar, memorijski merač temperature i pritiska i dubinski uzimač uzorka fluida. Dok se površinska oprema

sastoji od: manipulativne cevi sa zaptivačem, motornog graničnika, grejača fluida i trofaznog horizontalnog separatora.

Za merenje pritiska u bušotini koristi se konvencionalni mehanički manometar, poznat pod imenom amerada (slika 12). Princip rada amerade za merenje pritiska u bušotini u okviru hidrodinamičkih merenja zasniva se na merenju razlike pritisaka na površini i u bušotini. Senzorski deo manometra je izložen pritisku u bušotini, a sekcija za registraciju je na atmosferskom pritisku. Izrađen je tako da ne dolazi do kontakta sa fluidom u toku spuštanja. Proizvođači su JRC, Ruster, Drexel i dr (Hođžić, 2019).



Slika 12: Mehanički manometar (<https://www.reservoirgroup.com>)

Tehničke karakteristike instrumenta su: prečnik 1 ¼'' (32 mm), dužina sa sekcijom 1,86 m, za pritiske do 350 bara i termometrom. Postoje amerade precnika od 1'' i ¾'', za manje tubinge. Na prirubnicu kolone eruptivnog uređaja montira se manipulaciona cev – lubrikator, u koju se stavlja instrument koji se spušta na žici. Instrument se za žicu vezuje navojem, što je najslabije mesto na žici, jer se u slučaju zaglave, otkine i instrument ostane u bušotini, mada se lako vadi alatom za instrumentaciju. Granica kidanja žice je oko 600 kg. Idealno merenje sa ameradom je u zoni perforacije, mada se tubing retko kada spušta u samu zonu perforacije, već je

njegova peta uvek malo iznad. Pritisak se meri stepeničasto, odnosno svodi se na sredinu perforiranog intervala, odnosno na željenoj dubini se određuje na osnovu prethodnih vrednosti. Ako se meri produktivnost bušotine, interval satnog mehanizma je 48-72 sata, dok za merenje porasta pritiska treba malo više vremena. Postoje i manometri za permanentnu ugradnju na kablju koji ide uz zid tubinga. Problem permanentnog manometra je visoka cena (Hođžić, 2019).

Razlikuju se dve osnovne metode ispitivanja eruptivnih bušotina, i to: ispitivanje po krivama porasta pritiska, kada je proizvodnja bušotine zaustavljena i ispitivanje pri raznim ustaljenim režimima rada. Ispitivanja po krivoj porasta pritiska vrše se zbog određivanja karakteristika sloja (Hođžić, 2019).

Kod ustaljenog režima rada, vrši se ispitivanje pri raznim prečnicima dizni, u cilju određivanja proizvodnih karakteristika bušotine. Kod ispitivanja eruptivnih bušotina pri ustaljenom režimu rada meri se: proizvodnja nafte, proizvodnja peska, proizvodnja gasa, proizvodnja vode, procenat zavodnjenosti i veličina gasnog faktora. Hidrodinamička merenja se vrše u dva slučaja:

- Pre početka eksploatacije – kada se izvode u cilju uzimanja uzorka fluida (primarni razlog), merenja početnog ležišnog pritiska, procene minimalne zapremine ležišta, ocene propusnosti bušotine i skin efekta i identifikacije granice ležišta.
- U fazi eksploatacije – sa ciljem potvrđivanja vrednosti propusnosti bušotine i skin efekta, utvrđivanja ponašanja fluida, određivanja srednjeg ležišnog pritiska, potvrđivanja vrednosti granica ležišta i procene hidrauličke povezanosti pornog sistema.

Nakon završetka bušenja bušotine, opremanja i osvajanja, a pre početka eksploatacije, vrše se neophodna hidrodinamička merenja i ispitivanja radi određivanja rezervi i kapaciteta bušotine. Takođe i tokom eksploatacije ležišta hidrodinamička ispitivanja se nastavljaju kroz stalnu kontrolu rada bušotine i promene stanja unutar ležišta. Hidrodinamička merenja bušotina su zasnovana na njenoj sposobnosti da ima dotoka fluida iz ležišta, zatim da se prilikom zatvaranja bušotine može konstatovati porast fizičkih parametara. Za sve ovo vreme vrši se praćenje promena pritiska i temperature na dnu, u kanalu bušotine i na površini, kao i merenje protoka fluida nafte,

gasa i vode u funkciji vremena. Registrovani pritisci u funkciji vremena se analiziraju zajedno sa količinama protoka da bi se dobili neki ili svi od sledećih ležišnih parametara: pritisak u bušotini (P_{ws}), početni pritisak u ležištu (P_i) pritisak na granici ležišta (P_e), propusnost (k), moćnost kolektora (h), skin faktor (s), drenažna površina (A), Dietz-cov faktor geometrije ležišta (CA) (Hođžić, 2019).

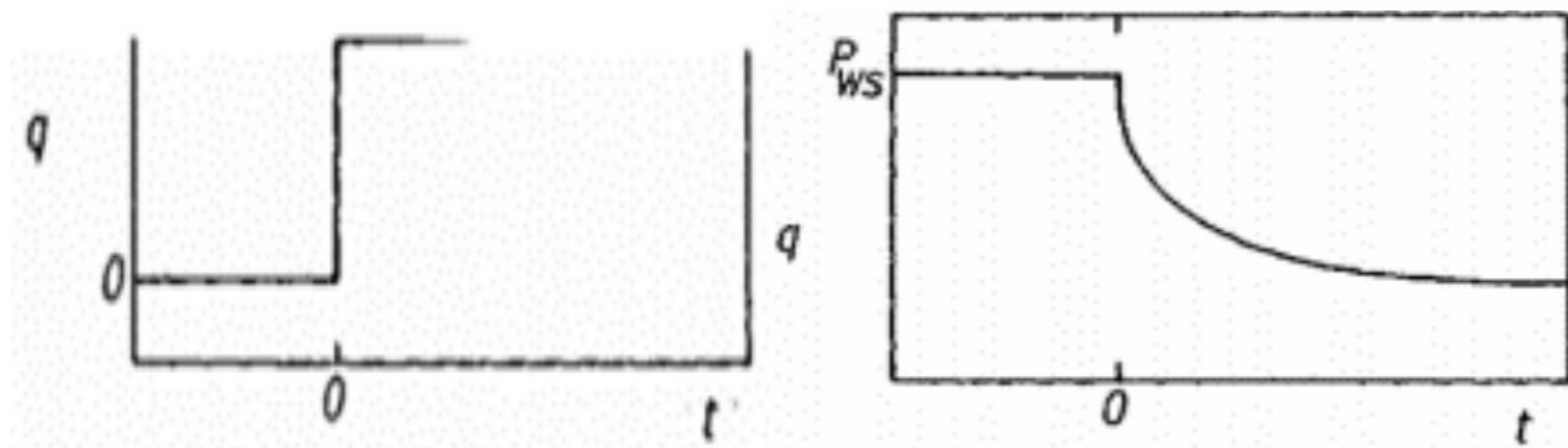
5.2 Metode hidrodinamičkog ispitivanja

U osnovi svih metoda su formule hidrodinamike koje opisuju vezu između produktivnosti i pritiska. Metode koriste kao svoju podlogu teoriju protoka fluida kroz poroznu sredinu. Uglavnom se koriste metode hidrodinamičkog ispitivanja: metoda pada pritiska, metoda porasta pritiska, test interferencije i puls test.

5.2.1 Metoda pada pritiska

Ispitivanje istražnih bušotina metodom sa padom pritiska se obavlja pri konstantnoj proizvodnji pri čemu se registruje pad pritiska na dubini posmatranog intervala u funkciji vremena. Podaci dobijeni tokom osvajanja bušotine su potrebni radi određivanja uticaja i veličine efekta punjenja bušotine. Ispitivanje obično počinje zatvaranjem bušotine tokom vremena koje je dovoljno za izjednačavanje pritiska u celom ležištu, tj. za postizanje statičkog ležišnog pritiska (u starim ležištima to često neće biti potrebno), nakon čega se bušotina pusti u proizvodnju i održava konstantni kapacitet (protok) tokom merenja uz neprekidno merenje dinamičkog pritiska na dnu bušotine. Ova metoda je ekonomična zbog kontinualne proizvodnje za vreme merenja, ali njen nedostatak je teško održavanja konstantne proizvodnje. Analizom rezultata HD merenja padom pritiska određuju se: propusnost kolektor stena, skin faktor, veličina drenažne zone. Interpretacija rezultata metode pada pritiska zahteva konstruisanje dva dijagrama (slika 13), a to su:

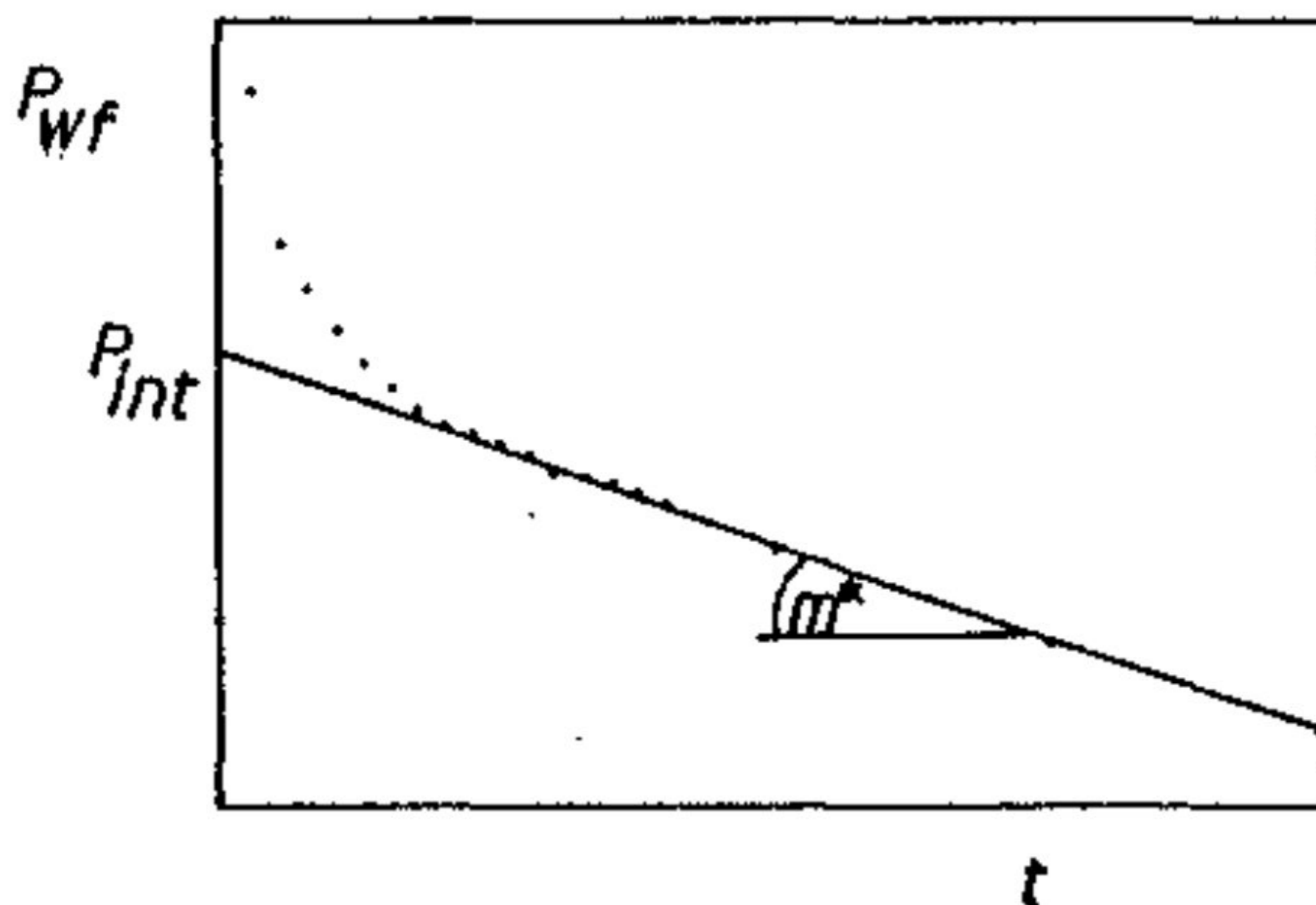
- Log-log koordinatama
- Semi-log koordinatama



Slika 13: Interpretacija rezultata metode pada pritiska (Heinemann, 1978)

Dijagram pada pritiska omogućava određivanje koeficijenta punjenja bušotine na osnovu vrednosti poremene temperature i pritiska. Podaci o ležištu nisu merodavni sve dok se na ovom dijagramu za jediničnu promenu u vremenu ne izvrši jedinična promena u pritisku (Heinemann, 1978).

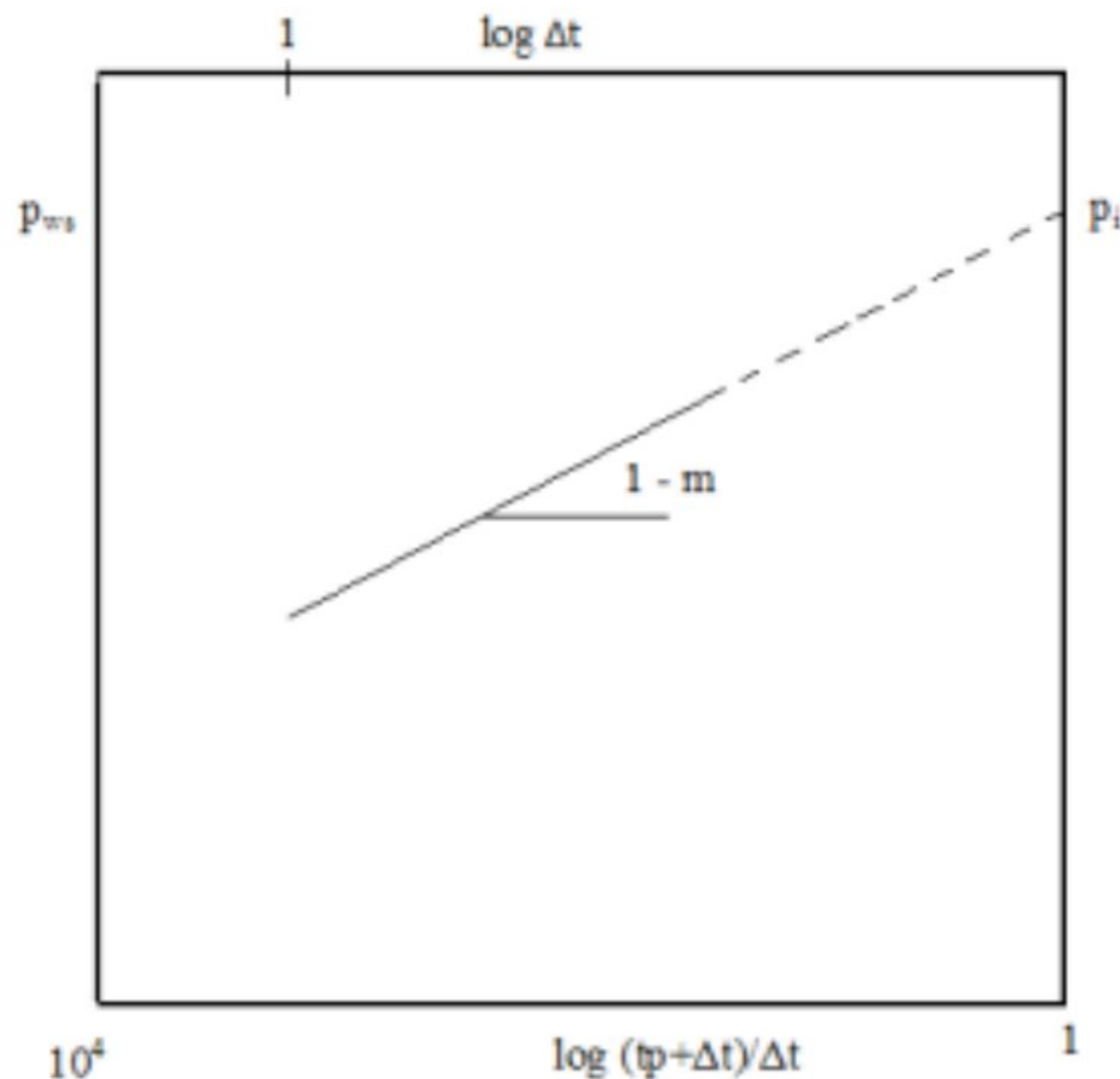
Limit test predstavlja posebnu vrstu ispitivanja metodom pada pritiska koja omogućava određivanje zapremine drenažne zone, odnosno veličine i granica ležišta. To je ustvari produženi test pada pritiska: Prilikom dugog merenja pad pritiska, u jednom momentu ćemo dobiti odziv granice ležišta jer će se pritisak distribuirati sve do granice ležišta. Iz ovog testa dobijamo položaj granice, i ako nam je poznata debljina izračunavamo zapreminu drenažne zone. Zapreminu drenažne zone množimo sa vrednošću poroznosti i dobijamo pornu zapreminu u kojoj se nalaze fluidi, relacija. Kako se nafta ne nalazi u celokupnoj pornoj zapremini množenjem sa zasićenjem naftom dobijamo količinu nafte u drenažnoj zapremini, a to su rezerve nafte u drenažnoj zoni. Kada se to uradi za svaku bušotinu dobijamo rezerve za celo ležište. (slika 14): Linearni dijagram (slika 14) pruža očitavanje vrednosti m^* i P_{int} , dok semi-log dijagram određuje m i P_{1h} . Zapremina i koeficijent drenažne zone određuje se pomoću određenih jednačina (Heinemann, 1978).



Slika 14: Interpretacija rezultata limit testa (Heinemann, 1978)

5.2.2 Metoda porasta pritiska

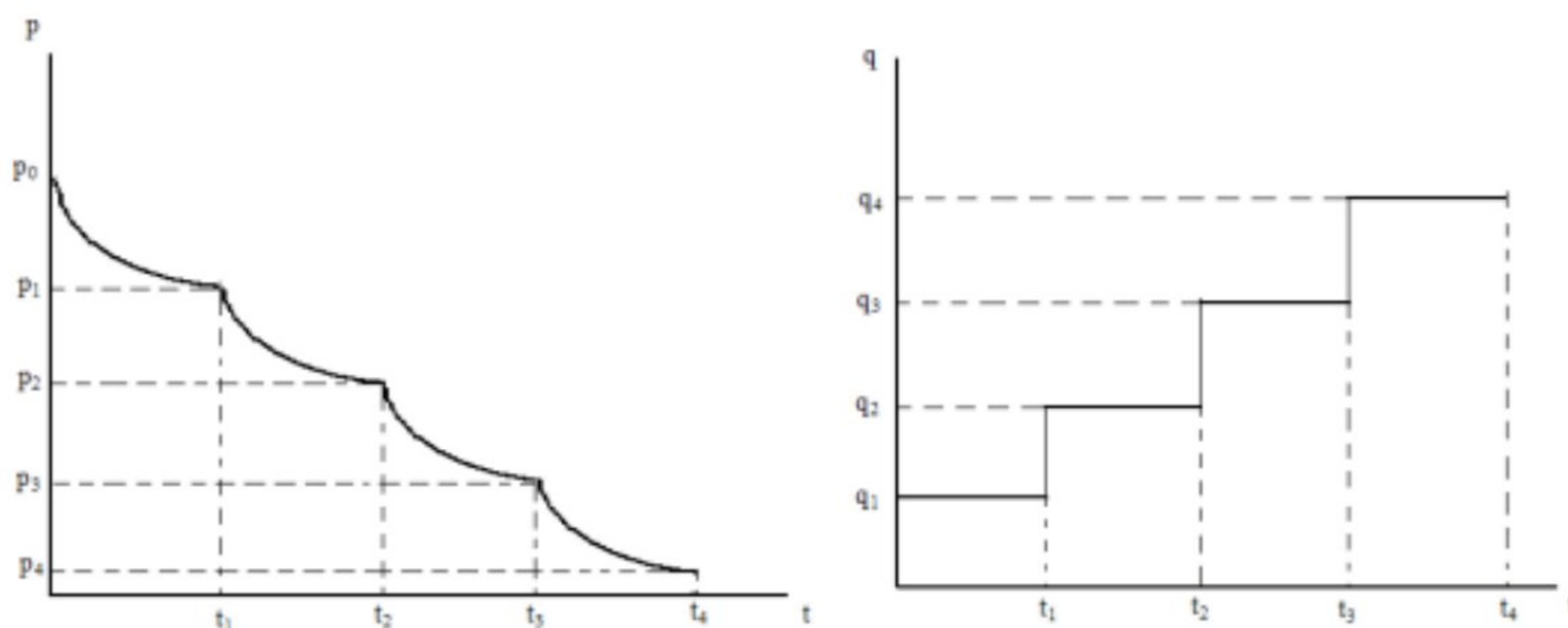
Ispitivanje naftnih i gasnih bušotina metodom porasta pritiska realizuje se instrumentalnim merenjem vrednosti pritiska u bušotini po njenom zatvaranju, a koja je proizvodila konstantnu količinu fluida. Vršiti se interpretacija rezultata testova porasta pritiska sa Hornerovog dijagrama u semi-log koordinatnom sistemu, odnosno P_{ws} prema $\log (tp+\Delta t)/\Delta t$, MDH analizom ili pomoću Muskat-ovog dijagrama. Najjednostavnija procedura merenja zahteva konstantnu proizvodnju fluida ili uspostavljanje pseudostacionarnog protoka pre zatvaranja bušotine, a zatim momentalno zatvaranje bušotine, odnosno prekid proizvodnje i registraciju promena pritiska u toku perioda ispitivanja. Dubinski manometar sa satnim mehanizmom spušta se na nivo produktivnog intervala ili neposredno iznad njega, gde se aktivira i snima porast pritiska u funkciji vremena. Na osnovu evidentiranih podataka merenja proizvodnje fluida i promena pritiska tokom vremena, konstruišu se odgovarajući dijagrami (slika 15) (Heinemann, 1978).



Slika 15: Dijagram konstruisan na osnovu podataka dobijenih metodom porasta pritiska (Heinemann, 1978)

5.2.3 Metoda interferencije

Bušotina se mora ispitati najmanje na tri režima proizvodnje. Proizvodnju treba meriti svakog sata. Pored merenja nafte, meri se i količina gasa, procenat vode i procenat peska. Manometar kod svakog merenja mora biti spušten na istu dubinu. Promena režima rada bušotine vrši se promenom otvora (prečnika) dizne, a dva susedna merenja ne trebaju se razlikovati za više od 20 – 30 %. Rezultati merenja se prikazuju dijagramski, s tim što se može prikazati promena pritiska sa vremenom, pri konstantnim vrednostima proizvodnje za vremenske intervale t_1 do t_n , ili promena količine proizvedenog fluida, za iste vremenske intervale (slika 16) (Heinemann, 1978).

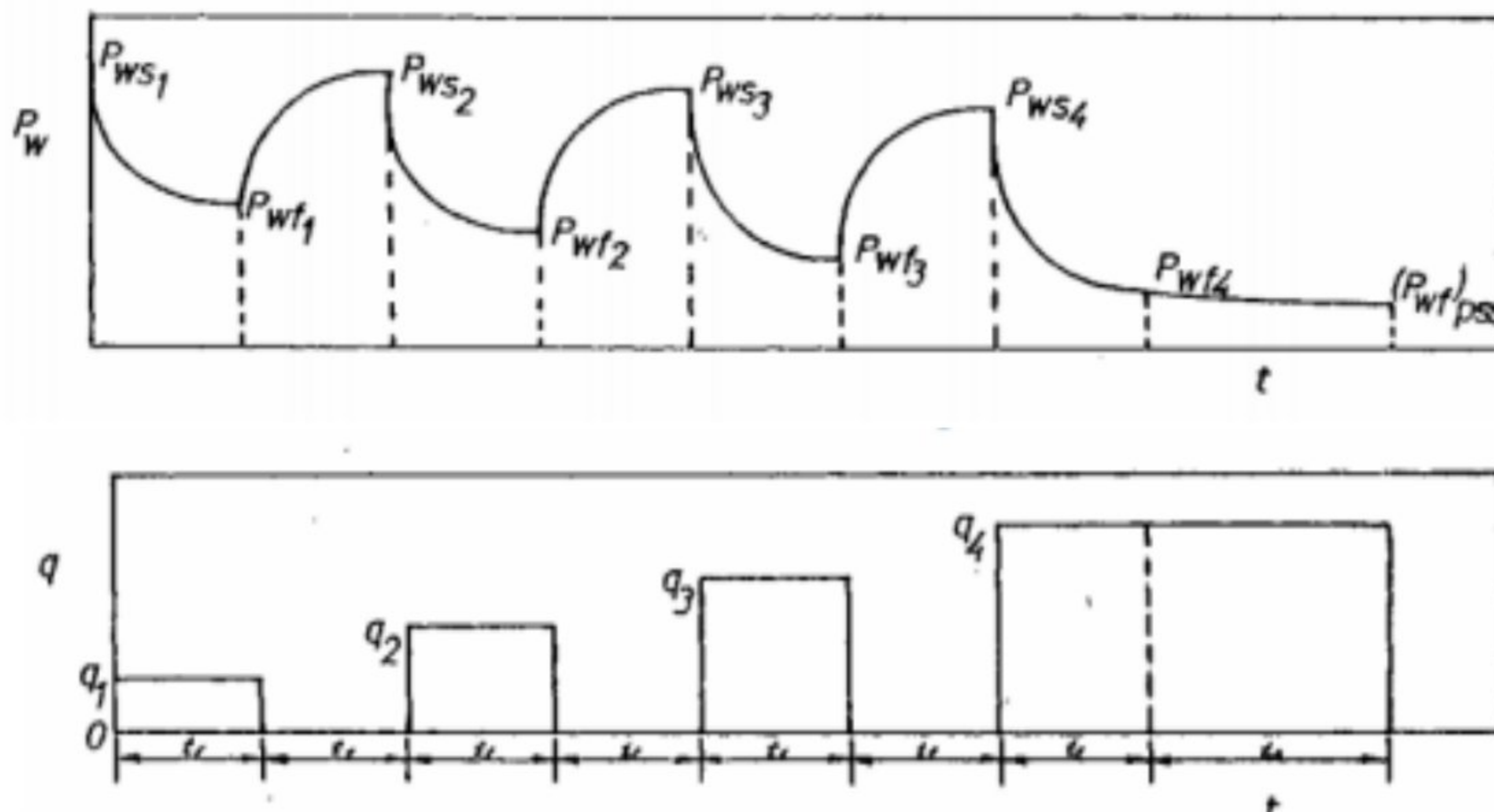


Slika 16: Dijagram konstruisan na osnovu podataka dobijenih metodom pada pritiska (Heinemann, 1978)

Pošto se merenja izvode tako da se obično sa manje proizvodnje fluida prelazi na veću proizvodnju. Vrednost pritiska izmerenog na dnu bušotine, odnosno na peti ugrađenog tubinga, za svaki sledeći interval trebala bi biti merenja i imati manju vrednost odnosno, trebala bi konstantno opadati sa povećanjem prečnika dizne, za svaki interval merenja. Vrednost pritiska trebala bi da opada tako da je $\Delta p = \text{const.}$, pri čemu je Δp razlika između dva uzastopna merenja. Ukoliko promena pritiska (Δp) između dva uzastopna merenja nije ista, bušotina je pogodna za izvođenje stimulacijskih radova. Isto tako, sa svakim povećanjem prečnika dizne, proizvedena količina fluida iz ležišta bi trebala rasti, ali za svaki prečnik zadržati istu vrednost tokom merenog intervala, odnosno treba da je $q_1 = \text{const}$, $q_2 = \text{const}$, ..., $q_n = \text{const}$. Primeti li se opadanje proizvodnje bušotine u pojedinim intervalima merenja, to će automatski upućivati na smanjenje propusnosti sloja i potrebu za njegovom obradom (Heinemann, 1978).

Postoji i varijacija metode ispitivanja bušotina pri konstantnom režimu proizvodnje, nazvana „metodom modifikovanog izohronalnog testa”. Razlika između nje i opisane metode je u tome što se, između svakog merenja (dakle, između vremenskih intervala t_1 i t_2 , zatim t_2 i t_3) (slika 17), bušotina zatvara, i to uvek za isti vremenski interval, koji je obično jednak dužini intervala merenja. U periodu dok je bušotina zatvorena, proizvodnja pada na nulu (na primer, ne skače direktno na vrednost q_2 , nego postoji određeni vremenski interval t pri kom je $q = 0$), a pritisak raste do vrednosti koja je nešto malo niža od vrednosti pritiska sa početka prethodnog intervala (na primer, ne vraća se na vrednost p_0 , nego na nešto nižu vrednost od te). Nakon

zamene dizne, bušotina se ponovo otvara i proizvodnja se povećava (na primer, na vrednost q_2 , a pritisak ponovo lagano opada (na primer, na vrednost p_2). Postupak se ponavlja za svaki sledeći interval merenja. U slučaju da testovi produktivnosti nisu mogući (na primer, za ležišta sa režimom rastvorenog gasa), moguće je predvideti produktivnost bušotine korišćenjem krive karakteristike pritoka nafte u bušotinu - IPR kriva (Heinemann, 1978).



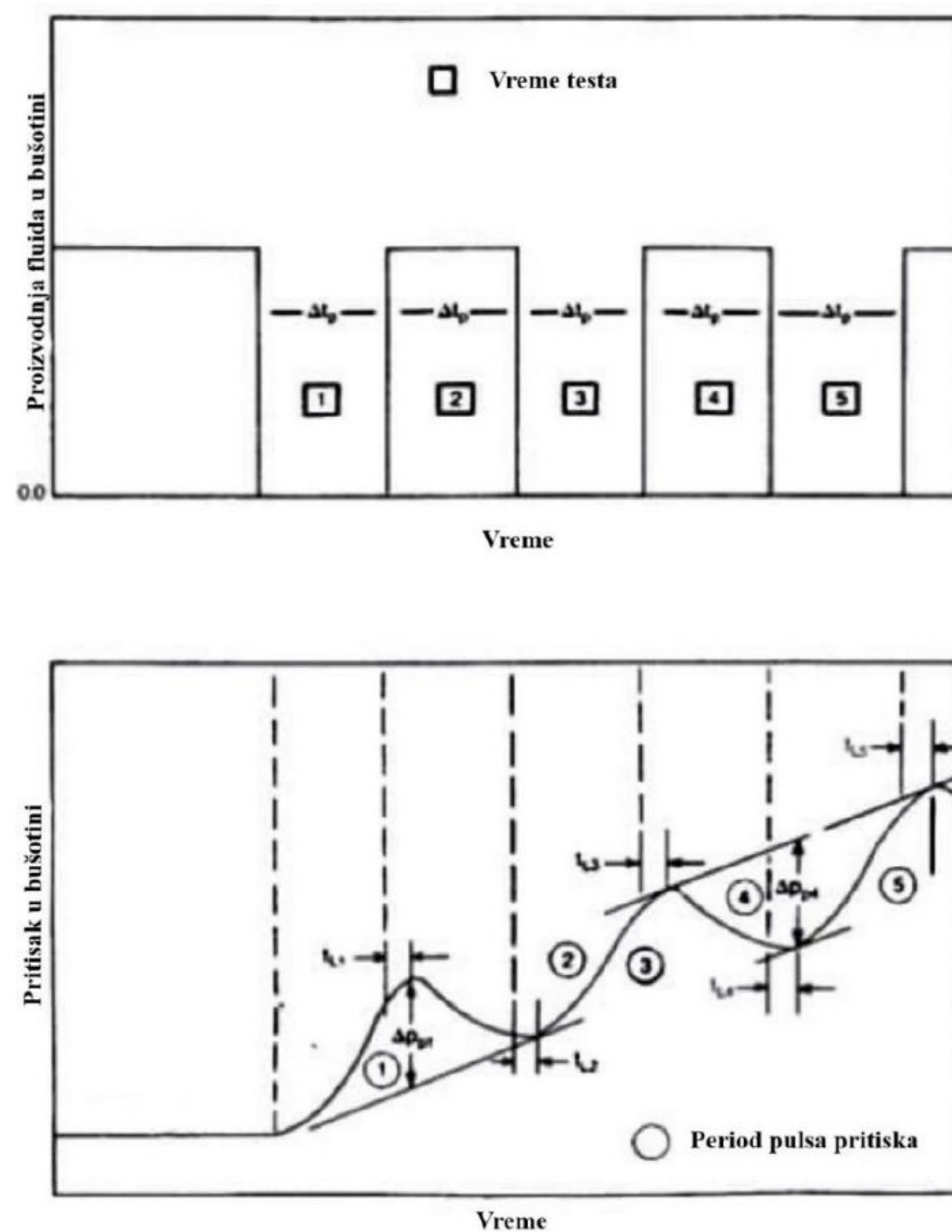
Slika 17: Interpretacija pritiska i proizvodnje metodom modifikovanog izohronog testa (Heinemann, 1978)

5.2.4 Metoda puls testa

Metoda puls testa ima prednost nad ostalima, jer pokriva veći deo kolektora. Tokom puls testa menja se količina proizvodnje u proizvodnoj bušotini i istovremeno prati uticaj ove promene na pritisak. Vršiti se serija kratkih perioda promene proizvodnje ili injektiranja na aktivnoj bušotini. Usled toga dolazi do pulsiranja tj. do promene pritiska što se meri na mernoj bušotini upotrebom kvarcnog manometra. Prednost puls testa je kratko trajanje. Prednosti ispitivanja bušotina metodom puls testa u odnosu na ispitivanje metodom interferencije je znatno kraće vreme ispitivanja (nekoliko sati do nekoliko dana), pa prema tome i minimalni prekid normalnog rada i manje problema u interpretaciji rezultata ispitivanja zbog slučajnih smetnji koje utiču na odziv pritiska u mernoj bušotini. Ispitivanje metodom puls testa omogućava, osim utvrđivanja

uzajamnog uticaja pritiska i proizvodnje fluida, i dobijanje podataka o propusnosti, srednjoj poroznosti u ispitivanom području i proizvoda poroznosti i kompresibiliteta.

Prilikom puls testa proizvodna bušotina ima pulsirajuću proizvodnju tj. naizmenično radi i ne radi. Svi periodi proizvodnje moraju biti isti, kao i vremena kada je aktivna bušotina zatvorena. Postoji samo razlika između vremena proizvodnje i zatvaranja. Takav rad bušotine se na dijagramu promene pritiska u mernoj bušotini manifestuje u vidu pulseva koji čine sinusoidu. U idealnom slučaju sinusoida ima istu visinu i isti raspon. Visina sinusoide po ordinati predstavlja promenu pritiska, a širina sinusoide na apcisi je razlika vremena između kraja jednog pulsa i reakcije pritiska na to. Proizvodnja je poznata kao i vremena rada odnosno zaustavljanja. Postoje dva parametra puls testa koji utiču na ponašanje pritiska, prvo je razlika u vremenu između kraja jednog pulsa i reakcije pritiska t_L , dok je drugi amplituda pritiska ΔP . Amplituda pritiska se određuje povlačenjem tangente između dva pika vrednosti odgovora pritiska ΔP (Heinemann, 1978).



Slika 18: Interpretacija puls testa (Heinemann, 1978)

6. ZAKLJUČAK

Skup operacija koje se izvode prilikom ispitivanja istražnih i razradnih bušotina predstavljaju celinu koja se sukcesivno izvodi. U radu je detaljno opisano testiranje bušotina koje predstavlja osnovnu operaciju koja se izvodi u perspektivnim delovima nezacevljenih i zacevljenih bušotina sa ciljem identifikovanja produktivnog sloja, što predstavlja osnov za definisanje ležišta i dalja ispitivanja. Prikazane su različite metode testiranja bušotine kao i metodološki postupak izvođenja testiranja. Neophodno je da se pre samog izvođenja testiranja izvrši opremanje površinskom i opremom u bušotini sa ciljem da se minimizuje negativni uticaj na rezultat testiranja i merenja u bušotini.

Osvajanje predstavlja postupak uspostavljanja dotoka fluida u kanal bušotine. Priliko čega je neophodno poznavanje mehanike fluida, kao i poznavanje uticaja pritisaka koji vladaju u kanalu bušotine. Pravilnim osvajanjem bušotine obezbeđuje se dalje ispitivanje u bušotinama. Uloga geologa prilikom izvođenja ispitivanja bušotina je neophodna zbog praćenja izvođenja ispitivanja kao i uzorkovanja zbog daljeg laboratorijskog ispitivanja fluida.

Najznačajniji postupak ispitivanja bušotina predstavlja izvođenje hidrodinamičkih merenja i interpretaciju parametara dobijenih na osnovu rezultata izvođenjem merenja. Hidrodinamički parametri predstavljaju osnov za dalju razradu ležišta kao i primenu određenog režima eksploatacije ležišta. U zavisnosti od uslova u ležištu mogu se primenjivati različite metode hidrodinamičkih ispitivanja.

Ispitivanje istražnih i razradnih bušotina predstavlja veoma važnu operaciju u procesu pripreme ležišta za proizvodnju i pruža potrebne parametre za određivanje dinamike eksploatacije ležišta nafte i gasa, a pored toga ispitivanja pružaju pravilno određivanje osobina kolektor stena. Sa aspekta ulaganja, istražni radovi u bušotini predstavljaju dosta povoljan vid ispitivanja za razliku od ostalih metoda istraživanja nafte i gasa. Kao takvi istražni radovi su neizostavni su prilikom istraživanja. Razvoj metoda ispitivanja istražnih i razradnih bušotina izuzetno je primetan, naročito u pogledu akvizicije i interpretacije rezultata dobijenih ispitivanjem.

7. LITERATURA

1. **Boyun Guo, William C. Lyons, Ali Ghalambor., 2007:** *Petroleum Production Engineering*. Louisiana: Elsevier Science & Technology Books.
 2. **Dickey, P., 1986:** *Petroleum Development Geology*. Tulsa, Oklahoma: PennWell.
 3. **Heinemann, Z., 1978:** *Hidrodinamika u poroznim sedimentima*. Leoben: Institut za razradu ležišta.
 4. **Hodžić, S. N., 2019:** *Osnove eksploatacije ugljovodonika*. Tuzla : Rudarsko - geološko - građevinski fakultet u Tuzli.
 5. **Jelmert, T. A., 2013:.** *Introductory to production petroleum*. Orlando: Bookon.
 6. **Kostić, A., 2020.** *Ležišta i istraživanje nafte i gasa / Aleksandar V. Kostić. – 2. izd. – Beograd: Univerzitet, Rudarsko-geološki fakultet, 2020 (Jagodina: Zlatna knjiga). – 260 str. : ilustr. ; 25 cm.*
 7. **Kovinčić Milan i Knežević Vesna., 2014:** *Rad na remontnom postrojenju*. Novi Sad: NIS a.d.
 8. **Omerzu, Z., 2005:** *Testiranje naftnih i gasnih formacija*. Novi Sad: DIT NIS - Naftagas.
- Web sajтови:**
9. **Karotažni kabal.** URL: <https://www.automatika.rs/projekti/svi/projekti/hardverska-realizacija-upravljacke-elektronike-elektrolog-sonde.com>
 10. **Manometar.** URL: https://www.reservoirgroup.com/wpcontent/uploads/2019/04/QM200M_DS.pdf.com

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Данило Томовић

Број индекса Г 87/20

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

ИСПИТИВАЊЕ ИСТРАЖНИХ СУВОТИНА ЗА НАФТУ И ГАС
- ПРИНЦИПЧ И ОПРЕМА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 14.09.2023.

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Данило Бранислав Томовић
Број индекса Г87/20
Студијски програм ИСТРАЖИВАЊЕ ЛЕЖИШТА МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА
Наслов рада ИСПИТИВАЊЕ ИСТРАЖНИХ ЈУГОТНИА ЗА НАРТУ
И ГАС - ПРИНЦИПИ И ОПРЕМА
Ментор НИКОЛЕТА АЛЕКСИЋ

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 14.09.2023.

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

ИСПИТИВАЊЕ ИСТРАЖНИХ СЛУШОТИНА ЗА НАФТУ И ГАС
- ПРИНЦИПИ И ОПРЕМА

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (заокружити једну од две опције):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, 14.09.2023.

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-