Mjerenje neutronskom karotažom u nezacijevljenom i zacijevljenom kanalu bušotine

Martić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:505762

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

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

MJERENJE NEUTRONSKOM KAROTAŽOM U NEZACIJEVLJENOM I ZACIJEVLJENOM KANALU BUŠOTINE

Završni rad

Ana Martić

N 4252

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

MJERENJE NEUTRONSKOM KAROTAŽOM U NEZACIJEVLJENOM I ZACIJEVLJENOM KANALU BUŠOTINE

ANA MARTIĆ

Završni rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Neutronska karotaža je jedna od metoda karotažnih istraživanja kojima mjerimo fizikalna svojstva nabušenih stijena i fluida u porama. To je jedna od metoda izazvane radioaktivnosti. U prirodi ne postoje slobodni neutroni, pa se kao izvori neutrona koriste umjetno izazvane nuklearne reakcije. U svrhu istraživanja ovim metodama koriste se sonde koje koriste brze neutrone ili pulseve brzih neutrona. Metoda se temelji na činjenici da je vodik izrazito učinkovit u usporavanju brzih neutrona, stoga je usporavanje brzih neutrona povezano s postojanjem jezgre vodika u stijeni. Prvo se je mogućnost detekcije vodika u stijeni povezivala s poroznošću stijene, no kasnije je zaključeno da se neutronskom karotažom zapravo ne može mjeriti poroznost s potrebnom točnošću, jer se vodik u stijeni ne nalazi samo u vodi u pornom prostoru, već se može nalaziti i u zaglinjenim naslagama, koje povećavaju izmjerenu poroznost. Također, mjerenje poroznosti pomoću detekcije vodika je jako otežano u sloju zasićenom plinom, koji će dati manje vrijednosti poroznosti zbog male koncentracije vodika. Danas se neutronska karotaža koristi za procjenu vodikovog indeksa (HI) i za otkrivanje slojeva zasićenih plinom. Neutronska karotaža može se primjenjivati i u nezacijevljenim i u zacijevljenim bušotinama, no za mjerenja u zacijevljenim bušotinama potrebno je koristiti posebne sonde koje mogu dati kvalitetniju sliku o svojstvima stijene i pornog fluida koji se nalazi iza zaštitnih cijevi.

Ključne riječi: neutronska karotaža, poroznost, svojstva stijene, porni fluid, mjerenje, ugljikovodici, neutron

Završni rad sadrži: 28 stranica, 18 slika, dvije tablice i 6 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: 1. Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ocjenjivači: 1. Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. Doc. dr. sc. Vladislav Brkić, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
3. Doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Datum obrane: 22.09.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Sadržaj

1. Uvod **1**

2. Radioaktivne metode karotažnih mjerenja **2**

2.1. Raspad radioaktivnih atoma *2*

3. Neutroni **3**

4. Reakcije neutrona **4**

4.1. Osnovne reakcije neutrona s jezgrama *5*

5. Izvori neutrona **7**

6. Karakteristike makroskopskog udarnog presjeka **8**

7. Duljina migracije neutrona **10**

8. Detektori neutrona **11**

9. Karakteristike stijena koje mjerimo neutronskom karotažom **13**

10. Sonde za neutronsku karotažu **14**

10.1. Sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu *15*

10.2. Kalibracija sonde *17*

11. Pulsna neutronska karotaža **18**

12. Primjena pulsne neutronske karotaže **20**

12.1 Pulsna neutronska karotaža u zacijevljenim i nezacijevljenim bušotinama *21*

12.2.Metoda određivanja zasićenja plinom pomoću pulsne neutronske karotaže u zacijevljenim bušotinama *21*

12.3.Sonde za pulsnu neutronsku karotažu *22*

13. Zaključak **27**

14. Popis literature **28**

Popis slika:

Slika 2-1. Reakcija s emitiranom α-česticom……...2
Slika 2-2. Reakcija s emitiranom β-česticom ……..……..……...…2
Slika 2-3. Emitiranje gama-zračenja …….……..…….…….……...…3
Slika 3-1. Građa neutrona……..…..……..…….…..…..4
Slika 4-1. Podjela neutrona u ovisnosti o brzini i kinetičkoj energiji……...…...…….5
Slika 4-2. Grafički prikaz vjerojatnosti gubitka energije neutrona u sudaru s jezgrom određene mase……6
Slika 8-1. Sonda za kompenziranu neutronsku karotažu……...……12
Slika 9-1. Strukturalni prikaz kaolinita……...…….……13
Slika 9-2. Krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće…….....14
Slika 10-1. Sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu…...……..……15
Slika 10-2. Usporedba ponašanja neutrona i gama-zraka u stijenama male i velike poroznosti…….…16
Slika 10-3. Prikaz ponašanja neutrona i gama-zraka ovisno o poroznosti……...17
Slika 11-1. Grafički prizak mjerenja dvojnom pulsnom neutronskom karotažom…….....19
Slika 11-2. Grafički prizak postupka mjerenja dvojnom pulsnom neutronskom karotažom u 3 intervala…….....….20
Slika 12-1. Shematski prikaz uređaja za neutron-gama karotažu…….…...23
Slika 12-2. Grafički prikaz ovisnosti parametara R13CAP o poroznosti……..……..……24
Slika 12-3. Grafički prizak ovisnosti parametra R13IN o poroznosti……..24
Slika 12-4. Grafički prizak osjetljivosti parametara za ispitivanje zasićenja plinom o poroznosti……...…….25

Popis tablica:

Tablica 6-1. Parametri apsorpcije termičkih neutrona s obzirom na pojedini element……..……..……9
Tablica 6-2. Prikazuje broj potrebnih sudara neutrona s elementima prikazanim u tablici, kako bi mi se energija smanjila s 4 MeV do 0,4 eV…….…….…...10

Popis korištenih oznaka i pripadajućih SI jedinica:

E – energija (MeV)

A – atomska masa (Dalton)

R – jačina reakcije (n/cm^3)

Ni – gustoća čestica (mol/cm^3)

Σ_i – makroskopski udarni presjek (cm^{-1})

σ – udarni presjek (m^2)

L_m – duljina migracije neutrona (cm)

R13CAP - omjer detekcije gama-zraka koje su posljedica uhvata neutrona na bližem detektoru i rezultata na daljem detektoru gama-zraka nastalih apsorpcijom neutrona

R13IN - omjer bližeg detektora gama-zraka i daljeg detektora gama zraka tijekom perioda bombardiranja stijene neutronima

Popis kratica

HI – vodikov indeks

C/O karotaža – ugljik/kisik karotaža

PNC – pulsna neutronska karotaža

GSEP - parametar evaluacije zasićenja formacije plinom

FNXS (fast neutron cross section) – udarni presjek brzih neutrona

CNL – sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu

TDT – vrijeme potrebno za uhvat neutrona

D-T – deuterij - tricij

1. Uvod

Korištenje neutrona pri istraživanju ležišnih stijena je metoda koja se dugo koristi u karotažnim mjerenjima. Prva sonda za neutronsku karotažu pojavila se nedugo nakon Drugog svjetskog rata, a osnovni cilj bio je određivanje poroznosti stijena. Od tada je ova metoda karotažnog istraživanja jako napredovala, te danas sonde za neutronsku karotažu koriste detekciju neutrona u cilju određivanja vodikovog indeksa nabušenih stijena. Postoje i sonde koje koriste pulseve brzih neutrona kako bi se analizirala mogućnost uhvata emitiranih neutrona, kao i sonde za detekciju gama zračenja koje nije prirodno gama zračenje nego je posljedica bombardiranja stijene brzim neutronima. Ključni dio korištenja ovih metoda je razumijevanje informacija prikupljenih na detektorima sondi s obzirom na interakciju neutrona i jezgre atoma, a koje je potaknula pojedina metoda.

Sonda za neutronsku karotažu je bio prvi nuklearni uređaj koji se koristio za procjenu poroznosti nabušenih stijena. Metoda se temelji na činjenici da je vodik izrazito učinkovit u usporavanju brzih neutrona. Stoga je usporavanje brzih neutrona do energije termičkih neutrona te naposlijetku i uhvat neutrona povezano s postojanjem jezgre vodika u stijeni. Nažalost, kasnije je ustanovljeno da mjerenje poroznosti neutronskom karotažom može biti nepouzdano zbog kasnije objašnjenih utjecaja uvjeta u bušotini. Zato se danas neutronska karotaža i pulsna neutronska karotaža koriste za određivanje drugih svojstava ležišnih stijena, kao što su vodikov indeks ili plinom zasićeni slojevi.

Prednost neutronske karotaže je što se može izvoditi i u zacijeljenim bušotinama uz gotovo jednaku kvalitetu podataka. Ovaj rad prikazat će koje sve informacije o stijeni možemo dobiti koristeći metode neutronske karotaže i pulsne neutronske karotaže u slučajevima zacijevljene i otvorene (nezacijevljene) bušotine.

2. Radioaktivne metode karotažnih mjerenja

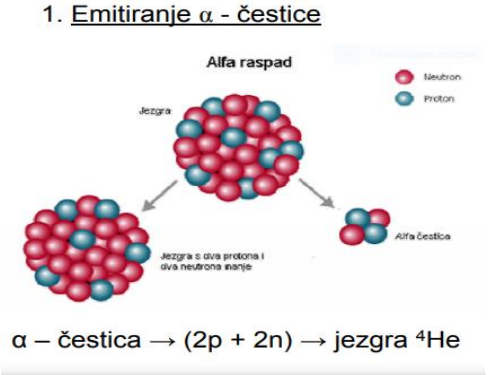
Metode karotažnih mjerenja su metode kojima mjerimo fizička svojstva nabušenih stijena i fluida koji se nalaze u porama stijena. Metode koje se koriste pri karotažnim mjerenjima su metode mjerenja električne vodljivosti i otpornosti, akustične metode, elektromagnetske metode te radioaktivne metode. Prilikom ispitivanja radioaktivnim metodama mjeri se prirodna ili pobuđena radoaktivnost. Prirodna radoaktivnost u stijenama potječe od radioaktivnih izotopa u stijenama; izotopa urana, torija i kalija. Metode mjerenja prirodne radioaktivnosti su gama-karotaža i spektralna gama-karotaža, dok su metode mjerenja izazvane radioaktivnosti gama-gama karotaža (karotaža gustoće i litologije) te neutronska karotaža.

2.1. Raspad radioaktivnih atoma

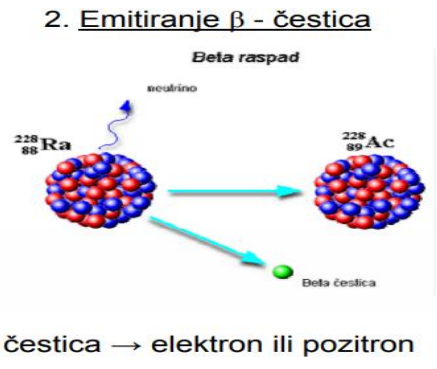
Rezultat spontanog raspada radioaktivnih izotopa je energija koja se oslobađa u tri glavna oblika, to jest u obliku α-čestica, β-čestica i γ-zračenja. α-čestice i β-čestice su subatomske čestice koje imaju energiju i naboj te mogu direktno reagirati s elektronima kroz coulombove sile pa se nazivaju direktno ionizirajućim zračenjem.

α-čestica je pozitivno nabijena i ima značajnu masu. Sastoji se od 2 protona i 2 neutrona (2p+2n). Identična je jezgi atoma helija te ima jako slabo prodiranje u materijal. Energije pri kojima se emitiraju α-čestice su između 4 i 5 MeV (slika 2-1.)

β-čestice su brzi pozitroni ili elektroni. β-čestica se emitira u dva slučaja: prvi slučaj je kad neutron iz jezgre postaje elektron, proton ili neutrino, tad su elektron (β-čestica) i neutrino izbačeni iz jezgre velikom brzinom. Drugi slučaj pri kojem se emitira β-čestica je prilikom transformacije protona u neutron (slika 2-2).



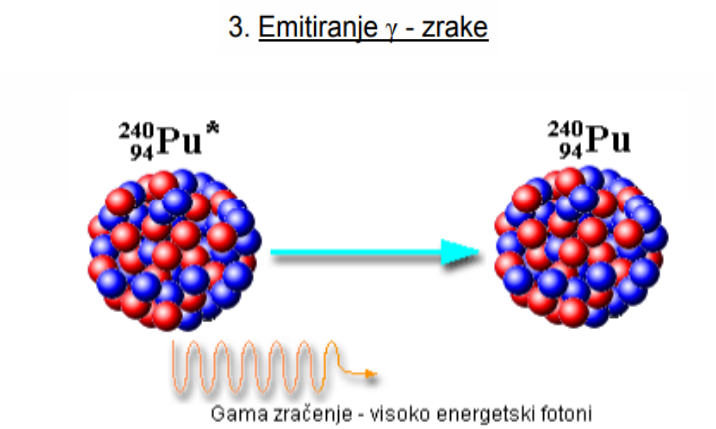
Slika 2-1.Reakcija s emitiranom α-česticom



Slika 2-2. Reakcija s emitiranom β-česticom

Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje velike energije. Gama zrake su električki neutralne pa ne reagiraju s elektronima te se nazivaju indirektno ionizirajućim zračenjem. Gama zračenje nije kontinuirani tok energije, već niz snopova energije γ-fotona. One se emitiraju kad jezgra u pobuđenom stanju emitira energiju. Energija gama-zraka je između 0,01-10 MeV.

Uz gama-zračenje moguće je emitiranje i α-čestica i β-čestica. Posljedica emitiranja α-čestica i β-čestica je nastanak jezgre s novim atomskim brojem. Raspad je završen emitiranjem α-čestica i β-čestica, ako je novonastala jezgra u stabilnom stanju. Ako novonastala jezgra nije u stabilnom stanju, nego je u pobuđenom stanju, ona će emitirati γ-fotone radi postizanja stabilnosti.



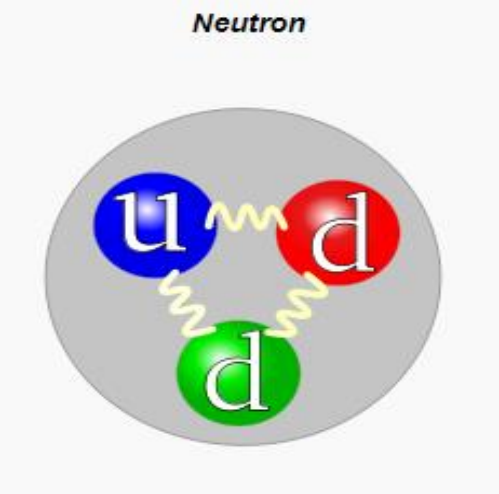
Slika 2-3.Emitiranje gama-zračenja

3. Neutroni

Neutronska karotaža je karotaža koja koristi izvore neutrona na način da bombardira stijene brzim neutronima. Neutroni su električki neutralne subatomske čestice, čija je masa gotovo jednaka masi jezgre vodika ($m=1{,}67482 \times 10^{-27}$), a poluvrijeme raspada neutrona iznosi 12,3 minuta.

Neutron je građen od jednog gornjeg kvarka i dva donja kvarka. Gornji kvark ima naboj +2/3 e, a svaki od dva donja kvarka ima naboj od -1/3 e, što ukupno čini neutralnu česticu. Neutron vezan u atomskim jezgrama je uglavnom stabilan, dok se neutron u beta-emiterima (jezgrama s viškom neutrona) raspada kao slobodni neutron.

Posljedica njihove električke neutralnosti je pojava da oni ne međudjeluju s atomskim omotačima, što znači da ne gube kinetičku energiju ionizirajući atome, već prolaze kroz tvar sve dok se izravno ne sudare s atomskom jezgrom. Radoaktivnim raspadom neutroni emitiraju β-česticu i pretvaraju se u proton.



Slika 3-1. Prikaz građe neutrona koja se sastoji od kvarkova.
(https://hr.wikipedia.org/wiki/Neutron)

4. Reakcije neutrona

Jačina reakcije neutrona (R) u kontaktu sa sredstvom ovisi o četiri glavna parametra.

Prvi parametar je gustoća neutrona, *n*, koja je omjer broja neutrona raspoređenih u određenom volumenu.

Drugi parametar je brzina neutrona, *v*. Produkt ove dvije veličine naziva se tok neutrona (flux), a izražava se kao broj neutrona po kvadratnom centimetru u sekundi. Jačina reakcije također ovisi i o nuklearnoj gustoći jezgre atoma (*Ni*) s kojom neutroni reagiraju.

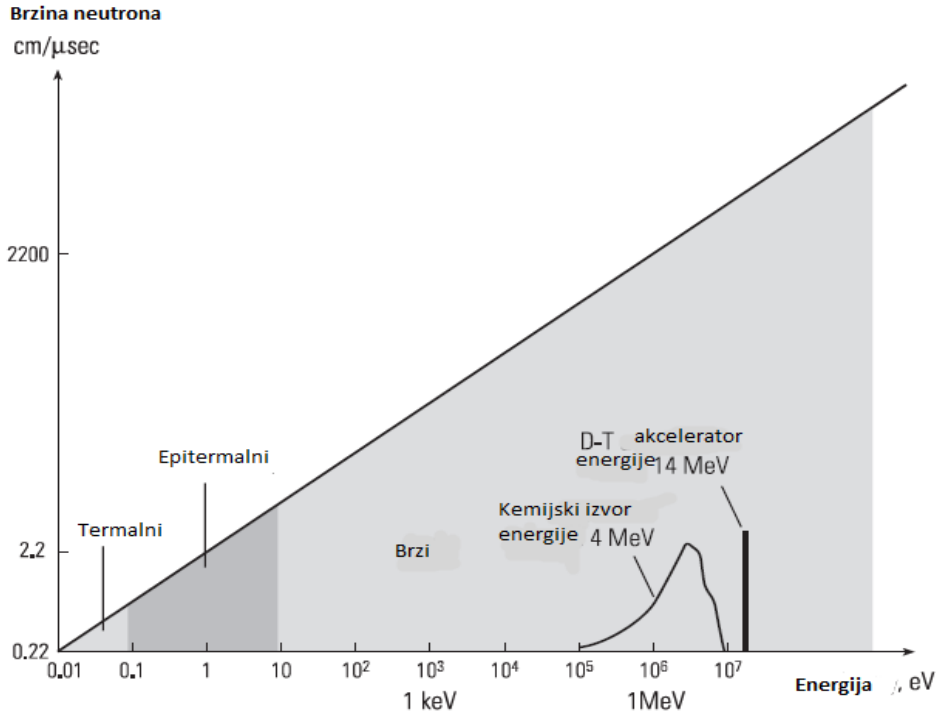
Zadnji parametar o kojem ovisi jačina reakcije neutrona je udarni presjek (σ). Konačno, jačina reakcije neutrona u kontaktu sa sredstvom je produkt sva četiri navedena parametra (Ellis &, Singer, 1987.):

$R = n\, v\, Ni\, \sigma$ (4-1)

Nuklearna gustoća jezgre atoma ovisi o volumetrijskoj gustoći (ρ), i molekularnoj masi (M) te se računa prema (Ellis &, Singer, 1987.): $Ni = \frac{6{,}02 \times 10^{23}}{M} \rho$ (4-2)

Važan kriterij prema kojem se kategoriziraju neutroni je njihova kinetička energija. Tako, ovisno o energiji, neutroni se dijele na brze, srednje brze i spore neutrone, a spori se još dijele na epitermičke i termičke neutrone.

Brzi neutroni su neutroni energije veće od 100 keV. Srednje brzi neutroni su neutroni čija se kinetička energija kreće između 100 eV i 100 keV, a spori neutroni su oni čija kinetička energija iznosi manje od 100 eV. Epitermički neutroni, koji zajedno s termičkim neutronima čine podskup sporih neutrona, imaju kinetičku energiju koja je između 0,1 i 100 eV. Energija termičkih neutrona je najniža te iznosi oko 0,025 eV.



Slika 4-1. Podjela neutrona u ovisnosti o brzini i kinetičkoj energiji
(Ellis &, Singer, 1987.)

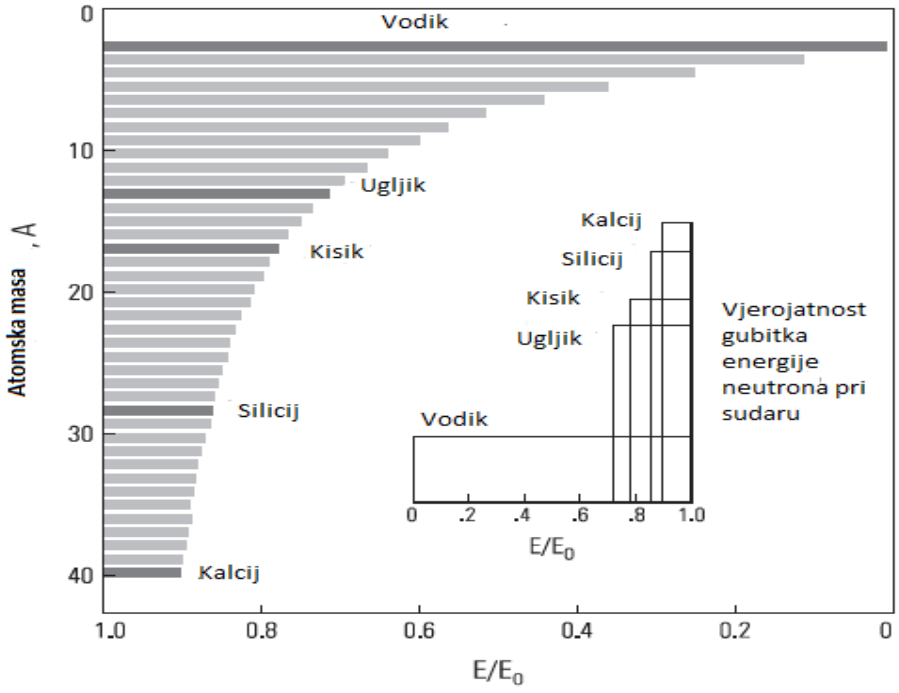
4.1. Osnovne reakcije neutrona s jezgrama

Postoje četiri osnovne vrste reakcija neutrona s jezgrom. Koja će se vrsta reakcije dogoditi ovisi o energiji neutrona. Prve dvije su poznate kao reakcije usporavanja neutrona, tj. reakcije pri kojima se energija neutrona smanjuje. To su reakcije usporavanja neutrona koje se dogode kad se neutron sudari s jezgrom atoma. Moguća dva ishoda te situacije su elastično ili neelastično raspršenje. U reakcijama usporavanja atoma sudjeluju brzi atomi velike kinetičke energije (neutroni čija je kinetička energija veća od 100 keV).

Pri elastičnom raspršenju na jezgru se prenosi samo kinetička energija, bez pojave zračenja, a brzina neutrona se smanjuje. Gubitak kinetičke energije ovisi o veličini jezgre, pri čemu masa jezgre uzrokuje manji gubitak kinetičke energije. Brzim i srednje brzim neutronima se, nakon procesa elastičnog i neelastičnog raspršenja, kinetička energija smanjuje do te razine da oni postaju termički ili epitermički neutroni. Najčešći gubici energije pri elastičnim sudarima s jezgrama koje nisu vodikove iznosi 15-20% smanjenja početne energije neutrona.

Neelastično raspršenje se događa kad se neutron sudari s jezgrom atoma koja ima približno jednaku masu neutronu. Najčešći primjer za masu jednaku neutronu je jezgra vodika, pa na usporenje brzih neutrona najučinkovitije djeluje jezgra atoma vodika. Pri sudaru se na jezgru prenosi sva kinetička energija i dio unutarnje energije, a pojavljuje se i gama-zračenje, kao popratna reakcija.

Usporavanje neutrona ovisi o fizičkim parametrima koji se mogu korelirati s parametrima stijene i fluida u pornom prostoru. Kako je vodikova jezgra masom gotovo jednaka masi neutrona te se brzi neutroni najučinkovitije usporavaju pri sudaru s tom jezgrom, to dovodi do zaključka da je na taj način lako detektirati koncentraciju vodikovih atoma, a posljedično i odrediti poroznost stijene, jer se vodik u stijeni najčešće nalazi u fluidima.



Slika 4-2. Prikaz vjerojatnosti gubitka kinetičke energije neutrona u ovisnosti o masi jezgre atoma u sudaru. Prikazani su gubici kinetičke energije s obzirom na masu jezgara atoma u rasponu od jezgre Ca do jezgre H (Ellis &, Singer, 1987.)

Osim usporavanja neutrona, jezgra na neutrone djeluje na način da ih apsorbira to jest događa se uhvat neutrona. U reakcijama uhvata neutrona sudjeluju spori, termički neutroni. Postoje dva različita tipa reakcije u kojima jezgra zarobljava neutron.

Prva takva reakcija je radijativni uhvat, reakcija još poznata pod nazivom termalna apsorpcija, jer u njoj sudjeluju neutroni termičke energije. U toj reakciji neutron je uhvaćen u jezgru, a reakcija rezultira nastankom subatomskih čestica. Te subatomske čestice brzo prelaze u niže energetsko stanje te emitiraju gama-zrake. Termički uhvat se događa u poroznim stijenama zbog prisutnosti vodika i kalcija. Često postojeće koncentracije nekih drugih snažnih apsorbera (osim H i Ca) mogu utjecati na tok termičkih neutrona te promijeniti njihov očekivani tok pri predviđenoj poroznosti. Jedan od takvih snažnih apsorbera koji može poremetiti tok termičkih neutrona je klor (Cl), koji se često nalazi u slanoj vodi.

Druga reakcija je reakcija u kojoj uhvat neutrona rezultira nastankom subatomskih čestica. Te subatomske čestice su alfa čestice, beta čestice, protoni ili neutroni.

5. Izvori neutrona

Izvori neutrona su prirodne ili umjetno izazvane nuklearne reakcije, no slobodni neutroni se gotovo nikada ne nalaze u prirodi. Kemijska reakcija koja je rezultirala otkrićem neutrona bila je bombardiranje berilija alfa-česticama.

$$^{4}Be + {}^{2}He \rightarrow {}^{6}C + n + 5.76\,\text{MeV}\,. \qquad (5\text{-}1)$$

Slična reakcija se može dobiti alfa česticama čiji su izvori plutonij, radij, americij ili polonij. Elementi koji se mogu bombardirati su berilij, bor ili litij.

Druga metoda induciranja nastanka neutrona koristi ione deuterija i tricija. Reakcija se odvija na način da se deuterij i tricij, inače izotopi vodika, bombardiraju ionima tricija i deuterija.

$$^{2}D + {}^{3}T \rightarrow {}^{4}He + n + 17.6\,\text{MeV}\,. \qquad (5\text{-}2)$$

Prednosti metode induciranja neutrona je taj što reakcija rezultira neutronima velike energije koji se mogu koristiti kao izvori u različitim mjerenjima. Još jedna od prednosti je ta da se izvor može kontrolirati na način da se može zaustaviti i pokrenuti po potrebi. Takav tip

izvora koji se može kontrolirati je puno sigurniji od prirodnih radioaktivnih izvora koje je nemoguće kontrolirati. Kontrola vremena rada izvora otvara novi prostor za različita mjerenja u ovisnosti s vremenom trajanja izvora.

6. Karakteristike makroskopskog udarnog presjeka

Jedna od važnih karakteristika stijene je makroskopski udarni presjek, koji se definira kao umnožak udarnog presjeka (σ_i) i broja atoma po kubičnom centimetru (N), (Ellis, Singer 1987.).

$$\Sigma_i = N\,\sigma_i = \frac{N_{Av}\,\rho_b}{A}\,\sigma_i\,, \tag{6-1}$$

N_{Av} je oznaka za Avogadrov broj, ρ_b označava gustoću matriksa, dok A označava atomsku masu. Mjerna jedinica u kojoj se prikazuje makroskopski udarni presjek (Σ_i) je cm^{-1}. Recipročna vrijednost makroskopskom udarnom presjeku je parametar slobodnog puta. Slobodni put je udaljenost koju pojedina elementarna čestica prijeđe između dvaju uzastopnih sudara s okolnim česticama. Razmatrajući slobodni put u vapnencu (0, 20, 40, i 100 jedinica poroznosti) kao funkciju energije brzih neutrona, primijećena je vrlo mala ovisnost energije brzih neutrona i slobodnog puta.

Tek kad su razmatrani usporeni neutroni manje kinetičke energije pokazano je da je karakteristika slobodnog puta postala zamjetno ovisna o koncentraciji vodika u promatranoj stijeni.

Drugi parametar je sposobnost apsorpcije makroskopskog udarnog presjeka, čemu doprinosi svaki pojedini izotop ili atom. Taj koeficijent se naziva koeficijent makroskopske apsorpcije i označava se sa Σ_a. U ovom slučaju σ_a označava termičku apsorpciju udarnog presjeka koja je značajna pri termičkim energijama za većinu elemenata.

Još jedan značajni parametar za izračunavanje efekta termičke apsorpcije neutrona je maseno normirani makroskopski udarni presjek σ_m. U petrofizici se često koristi derivacija masenog normiranog makroskopskog presjeka, jedinica uhvata (cu).

Vodikov indeks (HI) je važan parametar koji pokazuje omjer koncentracije vodika (g/cm^2) u bilo kojem spoju i koncentracije vodika u vodi (koja iznosi 1/9 g/cm^3). Posljedično, slojna voda u porama vodom zasićenih stijena ima vodikov indeks koji je identičan njenoj poroznosti, u slučaju kada je vodik prisutan isključivo u vodi u porama stijena, a nije dio matriksa tj. čvrstog dijela stijene.

Tablica 6-1. Parametri apsorpcije termičkih neutrona za pojedini element (Ellis &, Singer, 1987.)

Element		A Prosječna atomska masa (jedinice za atomsku masu)	σ Prosječna sposobnost apsorpcije neutrona (barns)	σ_m Maseno normirana apsorpcija udarnog presjeka (cm^2/g)
Gd	Gadolinium	157	49, 000	188
B	Boron	10.8	759	42.3
Sm	Samarium	150	5, 800	23.3
Eu	Europium	152	4, 600	18.2
Cd	Cadmium	112	2, 450	13.1
Li	Lithium	6.94	70.7	6.14
Dy	Dysprosium	163	930	3.45
Ir	Iridium	192	426	1.34
Cl	Chlorine	35.45	33.2	0.564
Ag	Silver	108	63.6	0.355
H	Hydrogen	1.008	0.332	0.198
Cs	Cesium	133	29.0	0.131
K	Potassium	39.1	2.10	0.0323
Fe	Iron	55.9	2.55	0.0275
Na	Sodium	23.0	0.530	0.0139
S	Sulfur	32.1	0.520	0.00977
Ca	Calcium	40.1	0.43	0.00646
Al	Aluminium	27.0	0.230	0.00513
Si	Silicon	28.1	0.16	0.0034
Mg	Magnesium	24.3	0.063	0.00156
C	Carbon	12.0	0.0034	0.00017
O	Oxygen	16.0	0.00027	0.0000102

Gubitak energije neutrona

Jezgre male mase jako efektivno smanjuju energiju raspršenog neutrona. Kao rezultat sudara se često navodi postotak izgubljene energije neutrona. Sljedeća jednadžba se koristi za određivanje potrebnog broja sudara koji bi uzrokovali gubitak energije neutrona (4,2 MeV je prosječna energija americij berilijevog izvora neutrona, a energija do koje se smanjuje je 0,4 eV, što je energija epitermičkih neutrona) (Ellis &, Singer, 1987.):

$$\left(\frac{1}{2}\right)^n \times 4.2 \times 10^6 = 0.4, \qquad (6\text{-}2)$$

Tablica 6.2. prikazuje broj potrebnih sudara neutrona s elementima prikazanim u tablici, kako bi mi se energija smanjila s 4 MeV do 0,4 eV (Ellis &, Singer, 1987.)

Faktori koji utječu na usporavanje neutrona		
Faktor	ξ	n
H	1.0	16
C	0.158	110
O	0.12	131
Ca	0.05	330
H_2O	0.7	22.5
20 p.u. vapnenac	0.23	70
0 p.u. vapnenac	0.115	138

7. Duljina migracije neutrona

Dva parametra koja karakteriziraju reakciju neutrona s čvrstim dijelom stijene su duljina usporavanja (L_s) i duljina difuzije termičkih neutrona (L_d).

Duljina usporavanja je proporcionalna udaljenosti koju neutron prijeđe između emitiranja iz izvora (kad posjeduje veliku kinetičku energiju) do vremena kad dosegne puno nižu energiju (postane neutron termičke energije).

Duljina difuzije termičkih neutrona je udaljenost kojom putuje termički neutron od točke kad je dosegao termičku energiju do trenutka uhvata. Te dvije veličine zajedno tvore duljinu migracije neutrona ($L_m^2 = L_s^2 + L_d^2$). (7-1)

Vrijeme koje je potrebno da bi se neutronu energija smanjila do termičke energije naziva se vremenom usporenja, a ovisno je o količini vodika koji se nalazi u promatranoj stijeni.

8. Detektori neutrona

Neutroni se detektiraju u procesu koji se sastoji od dva koraka. Početak procesa je reakcija neutrona s jezgrom atoma te na taj način nastaju električki nabijene čestice. Zatim se te električki nabijene čestice detektiraju pomoću svoje sposobnosti ioniziranja. Zbog toga se detektori neutrona sastoje od konvencionalnih detektora u obliku brojača ili scintilacijskih brojača.

Zbog područja istraživanja i neutrona s kojima će se detektor susretati, detektori namijenjeni neutronskoj karotaži su specijalizirani za registriranje epitermičkih i termičkih neutrona. Kako bi optimizirali mjerenja, jezgra koja se bombardira mora ispuniti sljedeće kriterije; mora imati veliki udarni presjek, pokazivati karakteristike izotopa, a energija koja se oslobađa pri uhvatu neutrona prilikom bombardiranja jezgre mora biti što veća kako bi olakšala detekciju. Jezgre atoma koje su se pokazale kao dobre mete za neutrone su jezgre bora, litija i helija.

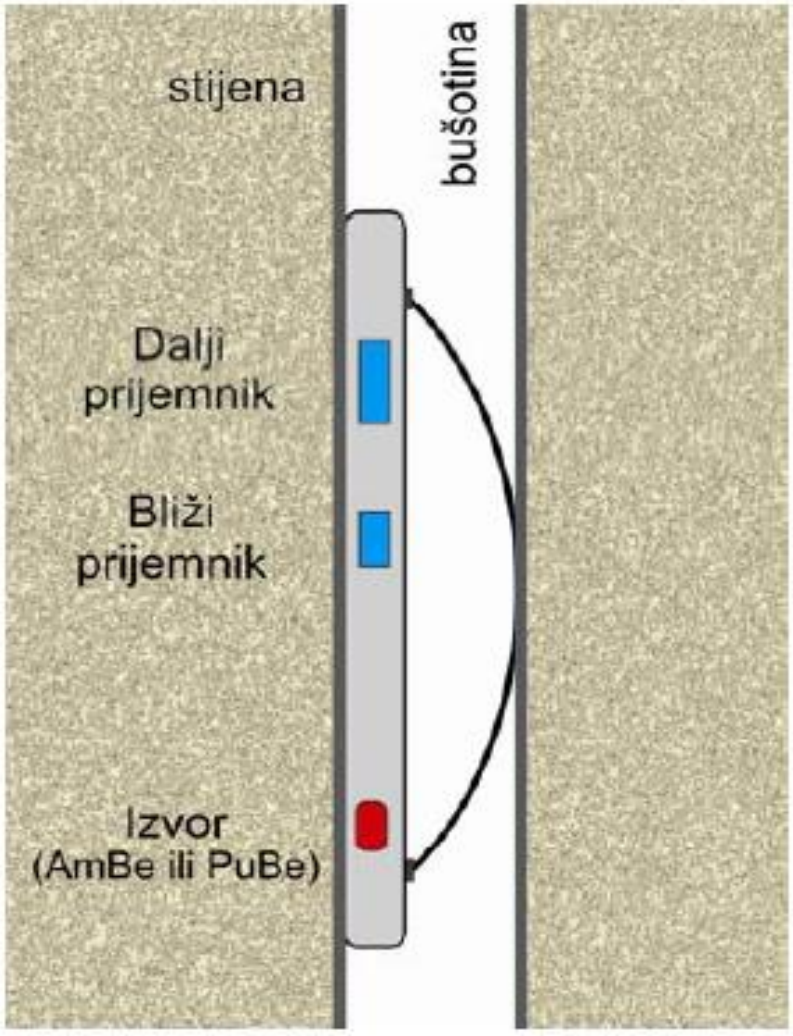
Detektor neutrona, koji se nalaze na sondi za neutronsku karotažu, mogu biti detektori sporih neutrona (termičkih i epitermičkih) i detektori gama-zraka, koje nastaju uslijed apsorpcije neutrona. Za registriranje gama-zraka koristi se Geiger-Müllerov brojač i scintilacijski brojač. Kao detektor sporih neutrona koristi se Geigerova cijev koja sadrži plin borov-triflourid. Reakcija neutrona s borom pri čemu nastaju litij i α-čestica je sljedeća :

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He. \qquad (8\text{-}1)$$

Detektor epitermičkih neutrona registrira spore neutrone veće energije od termičkih neutrona. Termički detektor je izoliran kako ne bi propuštao termičke neutrone (neutrone niže energije). Kako bi se smanjio utjecaj isplake i isplačnog obloga, koriste se dva detektora (prijamnika). Dubina prodiranja ovisi o poroznosti i smanjuje se s njenim povećanjem.

Razlog korištenja dva prijemnika na ovoj sondi je smanjenje utjecaja isplake i isplačnog obloga, a naziva se sonda za kompenziranu neutronsku karotažu (CNL). Što se tiče

postavljanja prijemnika, bliži prijemnik je na udaljenosti 38 cm od izvora, a dalji na udaljenosti od 63 cm od izvora. Nakon rezultata mjerenja na svim prijemnicima, određuje se omjer intenziteta neutrona za bliži i intenziteta neutrona detektiranih na daljem prijemniku (N1/N2). Veći omjer označava i veću poroznost ispitivane formacije.

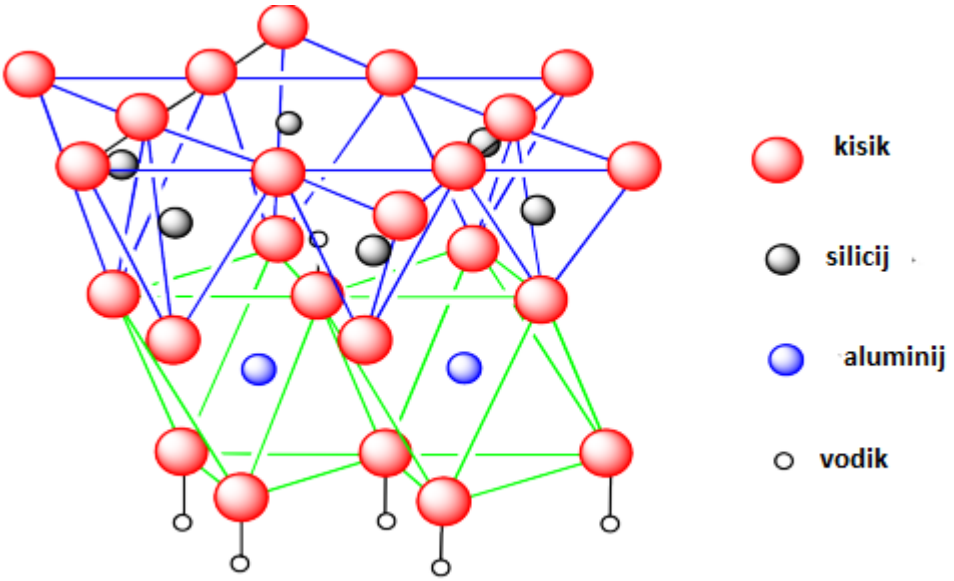


Slika 8-1. Sonda za kompenziranu neutronsku karotažu i položaj detektora neutrona u odnosu na izvor

9. **Karakteristike stijena koje mjerimo neutronskom karotažom**

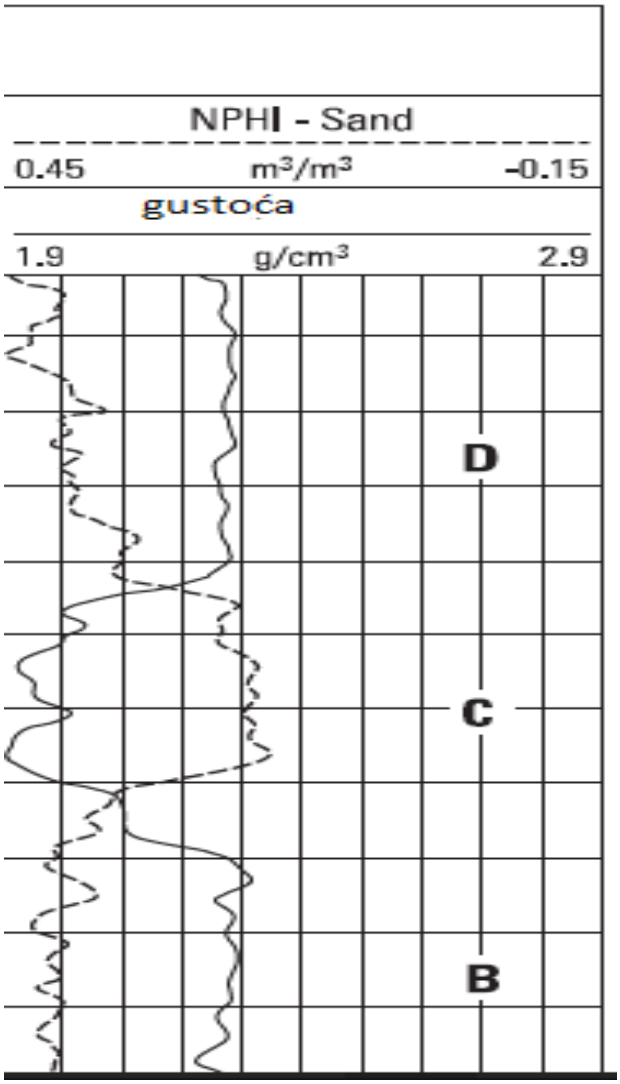
Osnovni princip mjerenja neutronskom karotažom temelji se na činjenici da vodik, koji ima veliki udarni presjek i malu masu jezgre, jako učinkovito usporava brze neutrone. Kako se vodik nalazi u vodi u porama stijena, nije teško dovesti u vezu sadržaj vodika u ispitivanoj stijeni i njenu poroznosti.

No, u glinovitim naslagama neutronska karotaža ne daje dobru procjenu poroznosti jer glinovite naslage sadrže vodu u šupljinama koje nisu povezane te sadrže kemijski vezan vodik u strukturi kristalne rešetke. To je razlog zbog kojeg neutronska karotaža daje povećane vrijdenosti poroznosti u glinovitim naslagama.



Slika 9-1. Strukturalni prikaz kaolinita (minerala gline) koji u sebi sadrži vodik (https://employees.csbsju.edu/cschaller/Principles%20Chem/network/NWalumina.htm

U uobičajenim praksama, neutronska karotaža se gotovo isključivo koristi u nezacijevljenim bušotinama, zajedno s karotažom gustoće. Uspoređujući rezultate neutronske karotaže s rezultatima karotaže gustoće moguće je odrediti litologiju. Usporedbom dviju krivulja, karotaže gustoće i neutronske karotaže, na mjestima njihovog očitog preklapanja očituje se zona zasićena plinom. Zasićenje plinom je lako odrediti jer detektori na sondi za neutronsku karotažu detektiraju naglo smanjenje koncentracije vodika u plinu (naglo smanjenje u odnosu na vodu).



Slika 9-2. Krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće, interval označen slovom C je zasićenje plinom, (Ellis &, Singer, 1987.)

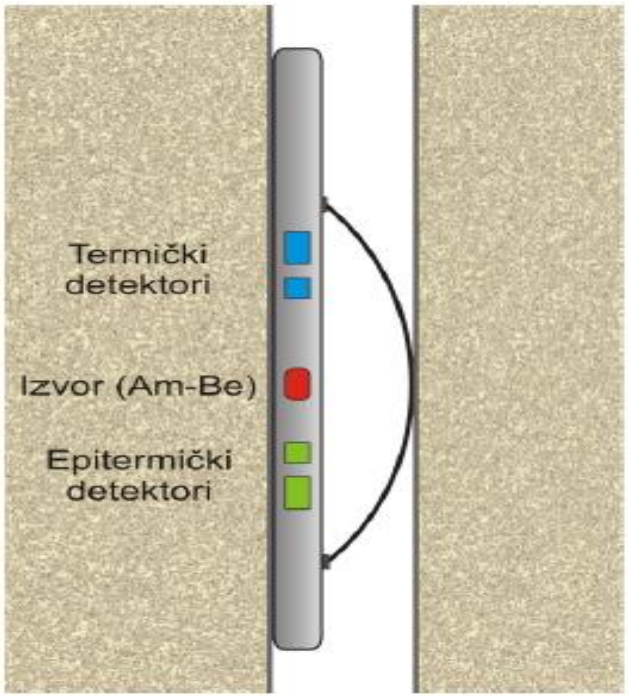
10. Sonde za neutronsku karotažu

Gotovo svi uređaji koji mjere poroznost pomoću neutronske karotaže kao izvor neutrona koriste kombinaciju dva elementa, amerecija i berilija. Uz Am-Be, kao česti izvor neutrona koristi se plutonij-berilij. Raspadom americija emitiraju se α-čestice, koje se sudaraju s jezgrama berilija i izbijaju neutrone. Energija neutrona koje emitiraju ovakvi izvori je 4 MeV, a jakost zračenja je približno 10^7 neutrona u sekundi. Dubina prodiranja neutrona ovisi o poroznosti, na način da se smanjuje s povećanjem poroznosti. Kako bi minimizirali utjecaj isplake na neutrone, sonda mora biti pritisnuta uz stijenke bušotine.

Detektori termičkih neutrona imaju veliku osjetljivost na absorbere termičkih neutrona u stijeni, najpoznatiji termički absorberi su bor i gadolinij, koji se nalaze u šejlovima te klor koji je sastojak slojne vode. Parametar koji može bitno poremetiti rezultate na detektoru termičkih neutrona je temperatura. Kako temperatura stijene raste, prosječna energija neutrona se povećava te se manje neutrona detektira na uređaju zbog njihove povećane energije.

10.1. Sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu

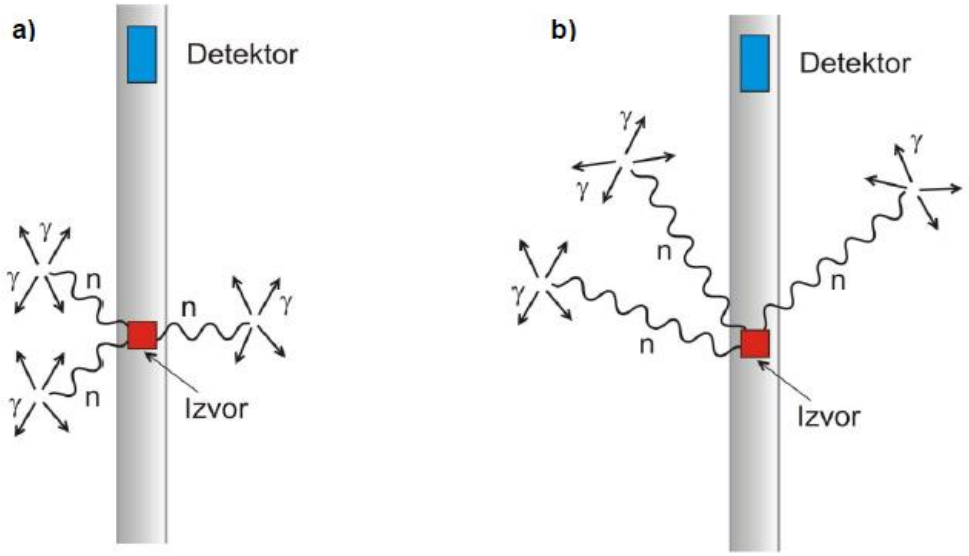
Za razliku od sonde za kompenziranu neutronsku karotažu (slika 8-1.), sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu sadrži čak četiri detektora (slika 10-1.). S jedne strane izvora nalaze se dva detektora epitermičkih neutrona, a s druge strane dva detektora termičkih neutrona. Mjerenjem se dobivaju dvije krivulje, koje u čistim naslagama imaju približno jednake vrijednosti. U zaglinjenim naslagama koje sadrže više atoma koji apsorbiraju neutrone, krivulja dobivena mjerenjem epitermičkih neutrona epitermičkim detektorima će pokazivati manju poroznost.



Slika 10-1. Sonda za dvojnu kompenziranu neutronsku karotažu

Ako se na sondi nalazi prijamnik koji detektira gama-zrake(neutron-gama karotaža), tada je vrijednost dobivena na brojaču obrnuto proporcionalna poroznosti. Kad naiđemo na stijene velike poroznosti, u porama se nalazi velika količina fluida te je koncentracija vodika velika. Tada su neutroni, emitirani iz izvora, brzo usporeni te uhvaćeni jezgrom u blizini samog izvora.

Gama-zrake koje su emitirane pri ovim reakcijama također gube energiju u blizini izvora i vrlo malo uspije doći do prijamnika i biti detektirano. U slučaju male poroznosti, potrebno je više vremena kako bi došlo do usporavanja i uhvata neutrona, zato je više neutrona i gama-zraka detektirano na prijamniku.



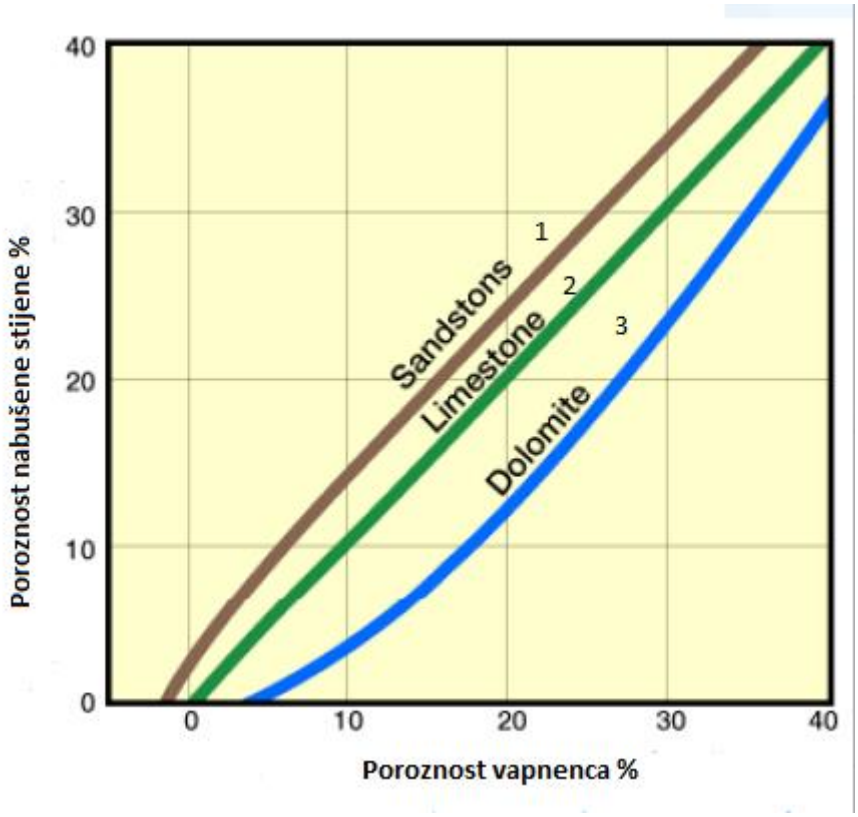
Slika 10-2. Usporedba kako se neutroni i gama-zrake nastale u reakcijama neutrona ponašaju u stijenama velike poroznosti (a) i stijenama male poroznosti (b)

Nedostatak sonde koja, osim neutrona, registrira i gama-zračenje je to što detektor registrira gama-zrake nastale u reakciji uhvata neutrona, ali detektira i prirodno gama-zračenje i gama-zrake iz izvora neutrona. Sve gama-zrake, osim one nastale uslijed uhvata neutrona, je potrebno ukloniti. To se izvodi filtriranjem gama-zraka ispod određenog energetskog nivoa. Filtriranje se temelji na pretpostavci da gama-zrake imaju različite energetske nivoe, ovisno o svom izvoru (različite energetske nivoe imaju prirodne gama-zrake, zrake nastale uslijed reakcije uhvata neutrona te inducirane gama-zrake). Gama-zrake nastale u izvoru neutrona

imaju nižu energiju od gama-zraka emitiranih uslijed apsorpcije neutrona, a energija prirodnog gama-zračenja je mala u odnosu na inducirane gama zrake.

10.2. Kalibracija sonde

Ako je sonda kalibrirana s obzirom na mineralni sastav stijene, šupljikavost se može neposredno iščitati iz dijagrama. Kalibracija se najčešće izvodi s obzirom na pješčenjake ili vapnence. Ako je mineralni sastav dobro pogođen, očitava se stvarna poroznost.
Ako nije dobro pogođen, očitava se prividna poroznost. Stvarna poroznost može se očitati iz eksperimentalno konstruiranog grafa koji pokazuje poroznost stijene određenog mineralnog sastava u ovisnosti o vodikovom indeksu.



Slika10-3. Ovisnost poroznosti stijene o vodikovom indeksu

1 - pješčenjak, 2 - vapnenac, 3 - dolomit

11. Pulsna neutronska karotaža

Sonda za pulsnu neutronsku karotažu sastoji se od izvora neutrona koji periodički emitira pulsove brzih neutrona (neutrona ubrzanih do energije 14 MeV). Kao izvori neutrona se koriste americij-berilij ili plutonij-berilij, koji emitiraju brze neutrone energije 4 MeV. Kako bi neutroni postigli energiju od 14 MeV, ubrzavaju se pomoću akceleratora.

Tijekom svog prolaska kroz stijenu, neutroni se usporavaju elastičnim i neeleastičnim raspršenjem te postaju termički neutroni. Termički neutroni, nadalje, bivaju uhvaćeni jezgrom te se prilikom uhvata emitiraju gama-zrake. Apsorpcija neutrona ovisi o udarnom presjeku za uhvat neutrona, koji je karakteristika ispitivane stijene i fluida u njenom pornom prostoru.

Udarni presjek za uhvat neutrona je, kao što je prije objašnjeno, mjera koliko učinkovito jezgre atoma u stijeni apsorbiraju neutrone. Najveći udarni presjek za uhvatneutrona imaju galdonija (Gd) i bora (B), ali njihova zastupljenost u matriksu stijene je vrlo mala.

S druge strane, klor (Cl), koji ima osrednju vrijednost udarnog presjeka je izrazito zastupljen u slojnoj vodi, pa ima najveći utjecan na uhvat neutrona. Tako se na karotažnom dijagramu koji prizkazuje utjecaj za uhvat neutrona (σ) jasno mogu uočiti razlike između sloja zasićenog vodom i sloja zastićenog ugljikovodicima.

Pomoću udarnog presjeka lako se određuje zasićenje vodom ili poroznost. Za čiste naslage zasićene vodom i ugljikovodicima vrijedi:

$$\sigma_{log} = (1-\phi)\sigma_{ma} + \phi S_w \sigma_w + \phi(1-S_w)\sigma_h \,, \tag{11-1}$$

pa je

$$S_w = \frac{(\sigma_{log} - \sigma_{ma}) - \phi(\sigma_h - \sigma_{ma})}{\phi(\sigma_w - \sigma_h)}, \tag{11-2}$$

gdje je: σ_{log} – mjereni udarni presjek za uhvat neutrona,

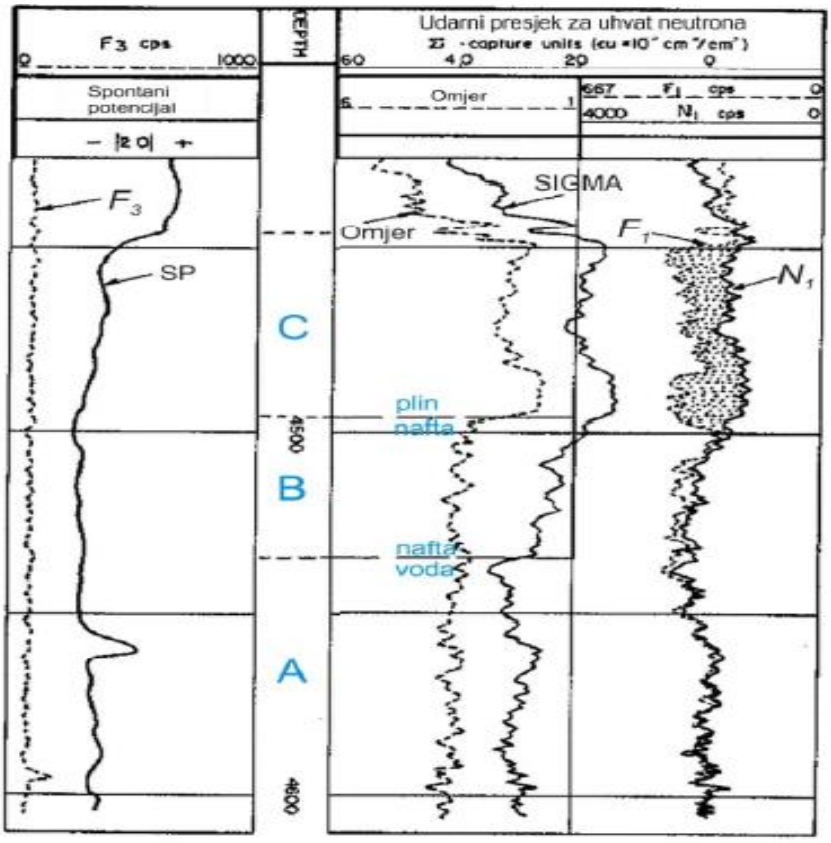
σ_{ma} – udarni presjek matrice

σ_w – udarni presjek slojne vode

σ_h – udarni presjek ugljikovodika

S_w - zasićenje formacije vodom

Danas se najčešće koristi uređaj s dva detektora, koji osim krivulja σ i τ, imaju dvije dodatne krivulje koje pokazuju vrijednost na brojaču bližeg (N1) i daljeg detektora (F1).



Slika 11-1. Primjer mjerenja dvojnom pulsnom neutronskom karotažom

(Ellis &, Singer, 1987.)

Pomoću detektora registriraju se gama-zrake emitirane uslijed uhvata neutrona. Pomoću registriranih vrijednosti na detektoru računaju se vrijeme potrebno za uhvat neutrona (Thermal Decay Time- TDT) i makroskopski udarni presjek za uhvat neutrona (σ).

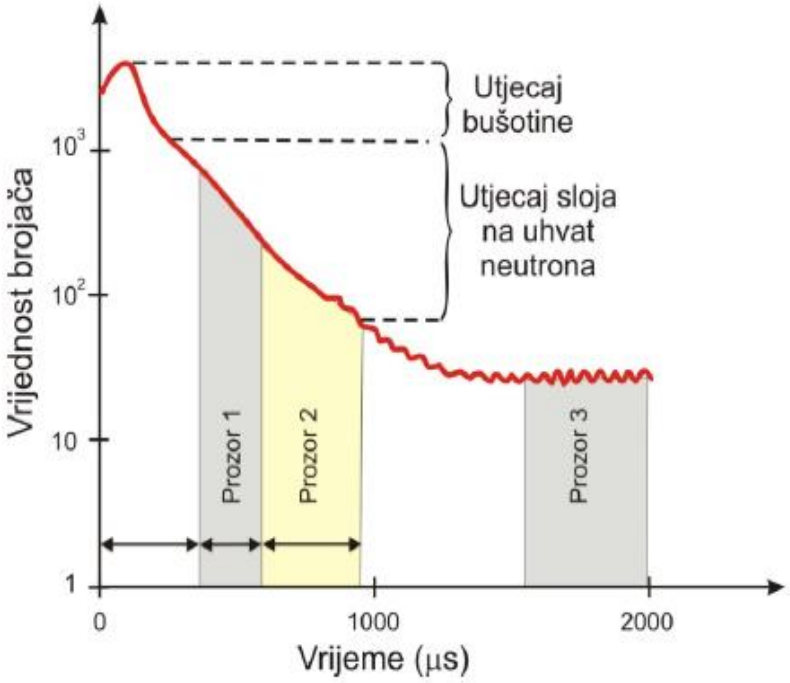
Nakon emitiranja neutrona iz izvora, s mjerenjem se započinje nakon određenog vremena potrebnog da bi utjecaj bušotine postao zanemariv. Brojač gama- zraka se zatim aktivira u tri vremenska intervala. Mjerenja prva dva intervala se koriste za izračunavanje vremena TDT i udarnog presjeka. Mjerenje u trećem vermenskom intervalu je rezultat prirodne aktivnosti, te se mjerenje u zadnjem intervalu oduzima od mjerenja u prva dva intervala.

Udarni presjek i vrijeme potrebno za uhvat neutrona izračunavaju se sljedećim jednadžbama (Ellias, Singer 1987.):

$$n = n_0 e^{-t/\tau},$$

$$\sigma = a/\tau, \qquad (11\text{-}3)$$

gjde n_o označava broj termičkih neutrona u vremenu t_o, n broj termičkih neutrona nakon vremena (t - t_o), a oznaka a je konstanta koja ovisi o tipu sonde



Slika 11-2. Postupak mjerenja pulsnom neutronskom karotažom u tri intervala

12. Primjena pulsne neutronske karotaže

Pulsna neutronska karotaža (PN) koristi često za mjerenja u zacijevljenim bušotinama. Princip istraživanja se temelji na analizi da su u ležištu prisutne sve tri faze (nafta, voda i plin). Posljednja usavršavanja pulsne netronske karotaže dovela su do stupnja kada je moguće točnije odrediti zasićenje plinom, dok su se ranije metode bazirale na pretpostavci da je zasićenje plinom u ležištu onoliko koliko koliko je potrebno da bi zbroj zasićenja nafte, vode i plina iznosio 100%.

Tijekom godina razvijanja i korištenja PN karotaže, razvila se C/O karotaža (ugljik/kisik) koja je riješila problem određivanja zasićenja naftom u ležištima čiste vode.

12.1 Pulsna neutronska karotaža u zacijevljenim i nezacijevljenim bušotinama

Pulsna neutronska karotaža je značajno napredovala u zadnjih 50 godina, ali osnovna fizička mjerenja su ostala nepromijenjena, što znači da je nemoguće dobiti potpunu sliku o svojstvima stijene i pornog fluida koji se nalazi iza zaštitnih cijevi, koristeći samo konvencionalne sonde. No, napredak u razvitku sondi i mjerenje udarnog presjeka brzih neutrona (FNXS: fast-neutron cross section) doprinijelo je alternativnim metodama za otkrivanje zaplinjenih slojeva. Plin se u otvorenom kanalu bušotine tipično detektira pomoću preklapanja krivulja koje dobijemo neutronskom karotažom i karotažom gustoće (gama-gama karotaža). U zacijevljenim bušotinama, mjerenje gustoće pomoću gama-gama karotaže je otežano zbog velikih korekcija potrebnih zbog debljine cementa i zaštitne cijevi. Prijašnje procjene u zacijevljenim buštotinama oslanjale su se na vodikov indeks pojedine stijene (HI) te na poroznost dobivenu neutronskom karotažom i računanjem udarnog presjeka σ.

Iako je u nezacijevljenim bušotinama, preklapanje krivulja gustoće i poroznosti bilo tipični indikator plina, ali u puno slučajeva šejl i lapor mogu onemogućiti idetifikaciju plina.

No, mjerenje metodom FNXS ovisi o atomskoj gustoći. Ovaj parametar (atomska gustoća) je sličan za većinu stijena, glina ili tekućih fluida, ali za razliku od njih, plin ima malu atomsku gustoću, što će uzrokovati male vrijednosti FNXS-a. To je dobar indikator i u zaglinjenim naslagama, gdje mnoge druge metode često nailaze na probleme.

12.2.Metoda određivanja zasićenja plinom pomoću pulsne neutronske karotaže u zacijevljenim bušotinama

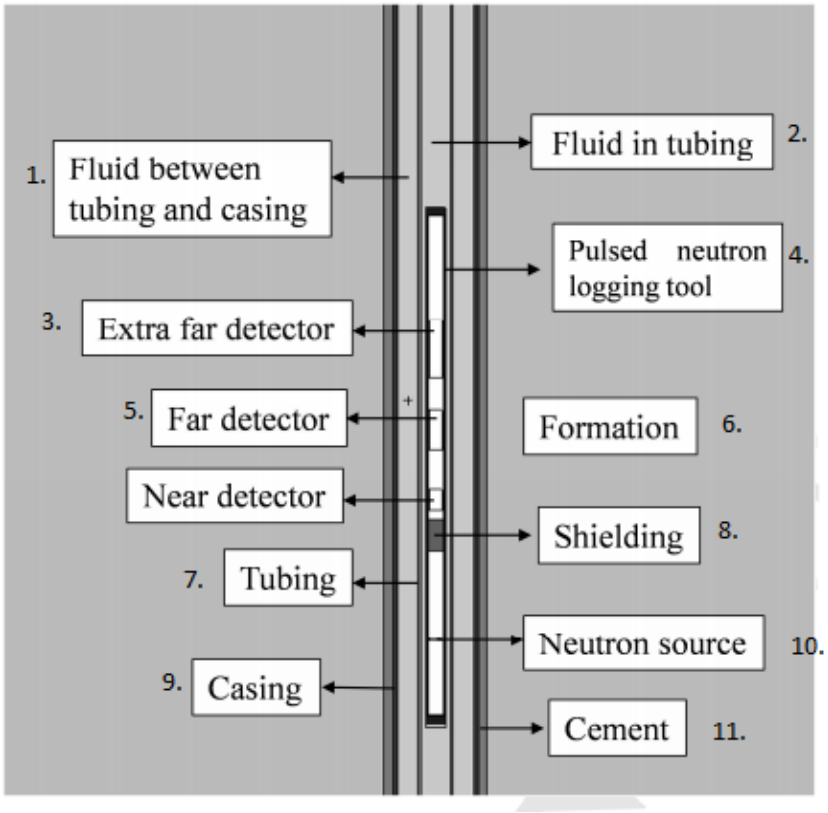
Pulsna neutronska karotaža igra važnu ulogu u određivanju zasićenja stijena plinom u zacijevljenim bušotinama. Mala poroznost plinskih ležita postavlja izazov za korištenje pulsne neutronske karotaže. Princip korištenja u zacijevljenim bušotinama je takav da se brzi visokoenergetski neutroni emitiraju iz izvora pulsnih neutrona te lagano prodiru kroz materijal zaštitnih cijevi i prolaze kroz stijenu, iza zaštitnih cijevi i cementa. Neutroni su postepeno usporeni te naposlijetku i uhvaćeni jezgrama atoma u stijeni. Gama-zrake koje se javljaju pri neelastičnom raspršenju i pri uhvatu neutrona registriraju se pomoću detektora na PN sondi, ovisno o energiji i vremenu.

Tijekom razvijanja PN metoda za određivanje koncentracije plina u ispitivanim stijenama, javila su se različita rješenja. Pulsna neutronska karotaža za uhvat neutrona (PNC) mjeri makroskopski udarni presjek elementa (σ) koji apsorbira neutron na način da detektira vremenski interval emitiranja gama-zraka. Na taj način raspoznaje plin od slojne vode visokog saliniteta. Kada se koristi udarni presjek (σ) za određivanje zasićenja stijene plinom, moguće je da će točnost rezultata poremetiti postojanje slojne vode visokog saliniteta. Ako je slojna voda malog saliniteta ili s različitim salinitetima, vjerojatnost za točnost određivanja zasićenja stijene plinom pomoću σ metode se smanjuje.

C/O karotaža (carbon/oxygen) razvijena je kako bi se odredilo zasićenje stijene naftom na način da koristi omjer neelastičnih gama-zraka, koje emitiraju ugljik i kisik. Učinkovitost C/O karotaže ne ovisi o postojanju slojne vode određenog saliniteta. Zbog manje atomske gustoće ugljika u sloju zasićenom plinom od atomske gustoće ugljika u sloju zasićenom naftom, gama-zrake koju emitira ugljik teže je detektirati što smanjuje mogućnost određivanja zasićenja formacije plinom.

12.3.Sonde za pulsnu neutronsku karotažu

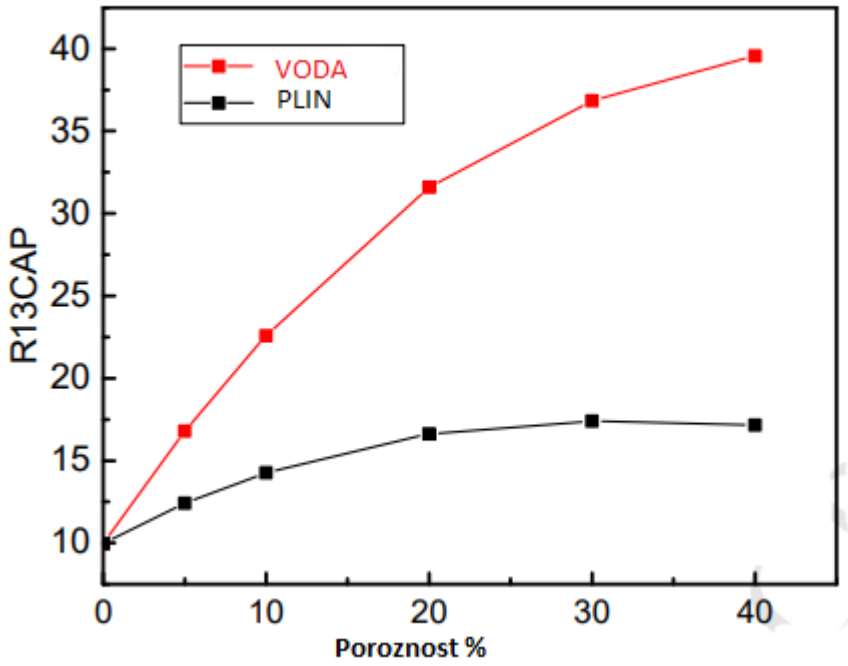
Za PN karotažu uobičajen je uređaj koji koristi tri detektora koji su na većoj udaljenosti od izvora. Treći detektor je dodan kako bi poboljšao otkrivanje plina u ležišnim stijenama. Sonde malih promjera mogu se koristiti u tubingu ili zaštitnim cijevima, smanjujući na taj način vrijeme manevara i cijenu mjerenja. Promjer sonde je 43 mm. Izvor brzih neutrona energije 14 MeV je deuterij-tricij (D-T). Neutroni reagiraju sa svojom okolinom te generiraju gama-zrake i gama-zrake nastale uslijed uhvata neutrona, koje su onda detektirane pomoću tri detektora gama-zraka na sondi. Udaljenost izvora do tri detektora je 36 mm, 55 mm i 76 mm.



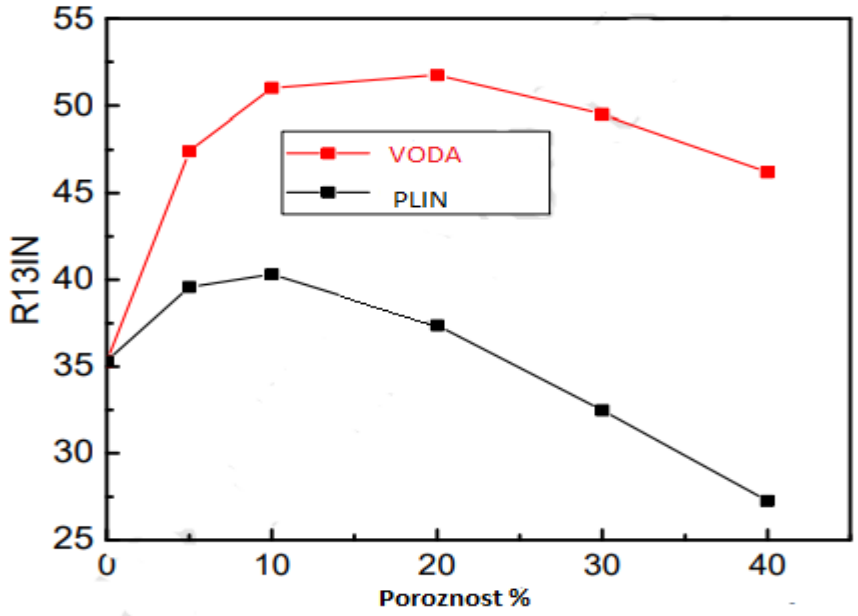
Slika 12-1. Shematski prikaz uređaja za neutron-gama karotažu u zacijevljenom kanalu 1-fluid između zaštitnih cijevi i tubinga, 2-fluid u tubingu, 3-dalekti detektor, 4-sonda za neutronsku karotažu, 6-stijena, 7-tubing, 8-štitnik, 9-zaštitne cijevi, 10- izvor neutrona, 11-cement (Liu et al., 2018.)

Kako bi se definirao najbolji način za određivanje zasićenja plinom u stijeni, izvedeno je istraživanje u pješčenjaku, uz promjer bušotine od 8,5“ (21,6 cm) i u zaštitnim cijevima od 7“ (17,8 cm). Fluid u pješčenjaku je voda gustoće 1g/cm^3, a korištena sonda ima 3 detektora. Parametri koji se često koriste kako bi se odredilo zasićenje stijena plinom su R13IN i R13CAP.

R13CAP je omjer detektiranih gama-zraka koje su posljedica uhvata neutrona na bližem detektoru i rezultata na daljem detektoru gama-zraka nastalih apsorpcijom neutrona. R13IN je omjer rezultata bližeg detektora gama-zraka i daljeg detektora gama zraka tijekom bombardiranja stijene neutronima.



Slika 12-2. Prikazuje parametar R13CAP u ovisnosti o poroznosti (Liu et al., 2018.)

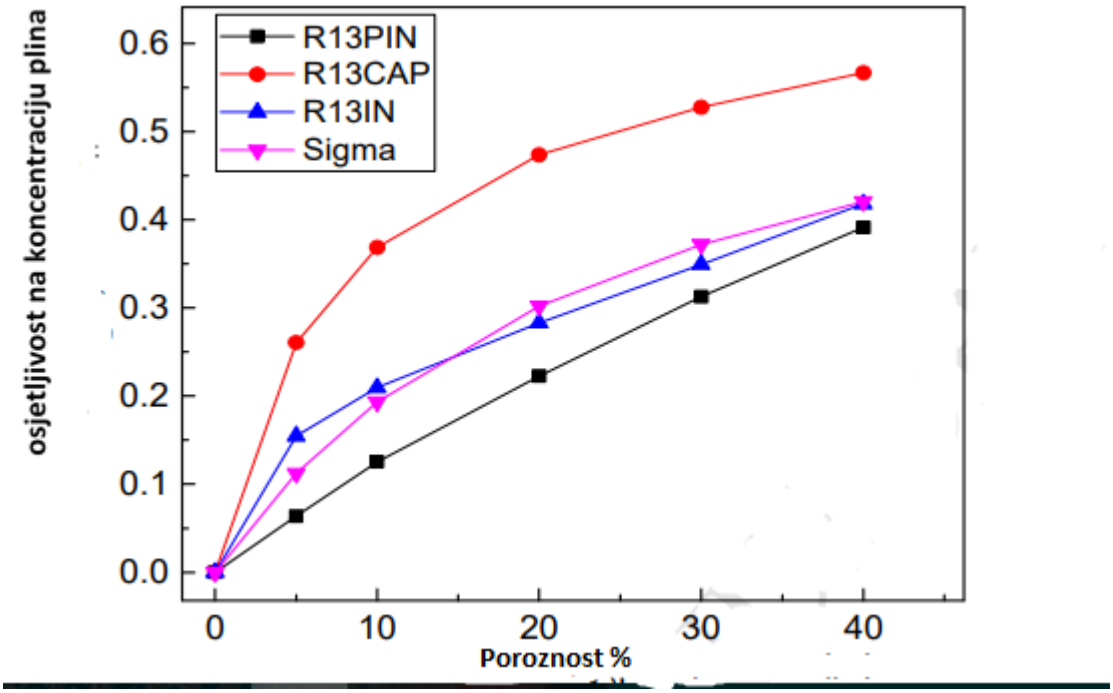


Slika 12-3. Grafički prikazana ovisnost parametra R13IN u o poroznosti (Liu et al., 2018.)

Detektirane gama-zrake povezane su s procesima neutronskog raspršenja, generacije gama-zračenja i slabljenja gama-zračenja. Raspršenje neutrona je u najvećoj mjeri uzrokovano vodikovim indeksom formacije. Slabljenje gama-zraka je pod utjecajem gustoće formacije, a gama-zrake generirane neelastičnim raspršenjem neutrona su generirane posljedično neelastičnom raspršenju neutrona, koje se događa samo ako je neutronska energija iznad potrebne neutronske energije. Gama-zrake nastale uhvatom neutrona su pod većim utjecajem vodikovog indeksa od neelastičnih gama-zraka.

Kad je formacija zasićena vodom, vodikov indeks postaje veći kako se poroznost povećava. Gama-zračenje koje je posljedica uhvata neutrona se detektira u puno manjem intenzitetu na udaljenom detektoru, što vodi do povećanog omjera detekcije na bližim i daljim detektorima. Kad je formacija zasićena plinom, vodikov indeks se smanjuje, što dovodi do tog da je promjena na R13CAP puno manja nego kod sloja zasićenog vodom.

Povećanjem poroznosti, gustoća formacije se smanjuje. Mjerenje neelastičnih gama-zraka je puno osjetljivije na promjenu gustoće formacije, detekcija ovih gama-zraka na dalekom detektoru se smanjuje. Kad je porozna sredina ispunjena plinom, s povećanom poronosti, gustoća formacije se brzo smanjuje, što dovodi do još bržeg smanjenja omjera.



Slika 12-4. Osjetljivost parametara za ispitivanje zasićenja plinom o poroznosti (Liu et al., 2018.)

Osjetljivost svih parametara se povećava s povećanjem poroznosti (slika 13.4.). R13CAP je najosjetljiviji o promjeni zasićenja plinom. Sloj zasićen plinom ima manji vodikov indeks i gustoću u odnosu na sloj zasićen vodom. Parametri R13PIN i R13CAP se koriste zajedno kako bi povećali mogućnost procjene zasićenja stijena plinom pri manjim poroznostima. Iz toga proizlazi novi parametar evaluacije zasićenja plinom (GSEP) koji se definira kao:

$$GSEP_{\phi} = R13CAP_{\phi} - \Delta R13PIN_{\phi}$$

$$\Delta R13PIN_{\phi} = ABS(R13PIN_{\phi} - R13PIN_{matrix}) \quad (12\text{-}2)$$

gdje je R13PIN vrijednost uzrokovana različitim poroznostima, R13PIN je vrijednost čvrstog dijela stijene. Ovaj novi model kombinira varijaciju karakteristika vodikovog indeksa i gustoće u vodi i sloju.

13. Zaključak

Karotažna mjerenja pomoću umjetno izazvanih nuklearnih reakcija prvo su korištena u svrhu procjene poroznosti stijena. No kasnije je zaključeno da se neutronskom karotažom zapravo ne može mjeriti poroznost s potrebnom točnošću, osim u posebnim uvjetima gdje nema okolnosti koje bi poremetile mjerenja, kao što je zaglinjenost koja povećava izmjerenu poroznost ili zasićenje plinom koje daje smanjenu poroznost. Ako je sonda dobro kalibrirana i koristi se u sličnoj okolini s obzirom na koju je kalibrinara ili su kasnije dodane potrebne korekcije, sonda za neutronsku karotažu moći će mjeriti vodikov indeks (HI) u stijeni. To je bolji način korištenja ove metode, jer neutronskom karotažom se mjere sve koncentracije vodika u formaciji, a ne samo one u poroznoj sredini, koje bi nam pomogle isključivo odrediti poroznost.

Također, vidljivo je da primjena sondi koje mjere termičke neutrone ovisi o putu usporenja formacije i koncentraciji nekog od neutronskog apsorbera. Put usporenja formacije različit je ovisno o litologiji, volumnom udjelu šejla ili zasićenju stijene plinom.

14. Popis literature

1. ELLIS, D.V., CASE, C.R., CHIARMONTE, J.M., 2003. Porosity from Neutron Logs. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
2. ELLIS,D.V., SINGER, J.M., 2008.Well Logging for Earth Scientists. Springer.
3. ELKINGTON, P.A.S., PERIERA, C.A., SAMWORTH, J.R., 2006., A Novel Cased Hole Density-Neutron Log-Characteristics and Interpretation. U: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exibition, Adelaide, Australia, 11-13.09.2006. str. 1-7.
4. JACOBSON, L., JAMBUNATHAN, V., LIU Z., GUO, W. 2015. Tehnical advances in pulsed-neutron interpretation for cased-hole logging: Physics, interpretation, and log examples. Geologic, heophysical and petrophysical interpretation of core dana and well logs, str.159-165.
5. LIU, J., LIU, S., ZHANG, F., SU, B., YANG, H., XU, Y., MIAO, B., Li, H., 2018. A method for evaluating gas saturation with pulsed neutron logging in cased holes, Journal of natural gas science and engineering.

Internet izvori: (3.09.2020.)

1. http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earpwjg/PG_EN/CD%20Contents/GGL-66565%20Petrophysics%20English/Chapter%2015.PDF

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad s naslovom "*Mjerenje neutronskom karotažom u nezacijevljenom i zacijevljenom kanalu bušotine*" izradila samostalno uz pomoć i savjete mentorice te na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Ana Martić

KLASA: 602-04/20-01/69
URBROJ: 251-70-12-20-2
U Zagrebu, 17.09.2020.

Ana Martić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/69, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 20.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

MJERENJE NEUTRONSKOM KAROTAŽOM U NEZACIJEVLJENOM I ZACIJEVLJENOM KANALU BUŠOTINE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)