

**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2015/

Kraków, grudzień 2015

Raport Nr 2086/AP

Symulacja Monte-Carlo odpowiedzi otworowej sondy geofizycznej neutron-neutron w ceramicznym ośrodku modelowym stanowiska kalibracyjnego w Zielonej Górze

Urszula Wiącek

Praca wykonana została w ramach realizacji umowy pt. *"Opracowanie modeli cyfrowych trzech typów sond otworowej geofizyki jądrowej (gamma-gamma, neutron – neutron epitermiczne i termiczne, neutron – neutron termiczne) w formie zestawów danych wejściowych dla oprogramowania MCNP i wykonanie obliczeń testowych przy użyciu tych modeli dla zadanego ośrodka skalnego"* w ramach współpracy z Wydziałem Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Umowa nr ZDN/035/140/2015.

Abstract

The new idea of the construction of the neutron spectrometric logging tool (type N2TE) is presented. The N2TE tool responses in the borehole conditions has been simulated using MCNP – the well-known Monte Carlo code. The infinite environment, in the numerical calculations, consists of some flat rock layers of the well-known chemical composition. Report includes basic technical parameters of the logging tool's construction and results of the simulations.

1. Wstęp

Celem rozwoju jądrowych metod geofizyki otworowej jest precyzyjne oznaczenie składu mineralnego skał tworzących zbiorniki węglowodorów i ich otoczenia do określania na tej podstawie, wybranych parametrów petrofizycznych.

Metody jądrowe, stosowane w pomiarach geofizyki otworowej, mogą dostarczać bezpośrednich danych o zawartości w skale szeregu pierwiastków: H, Si, Ca, Fe, Al, K, U, Th, oraz informacji o parametrach kompleksowych skały takich jak gęstość objętościowa, indeks absorpcji fotoelektrycznej P_e (zależny od liczb atomowych pierwiastków budujących skałę), przekrój czynny absorpcji neutronów Σ_a (czuły silnie na obecność takich pierwiastków jak bor, chlor i ziemie rzadkie, REE). Na pomiar takich parametrów jak porowatość neutronowa, określona na podstawie pomiarów neutronów o energiach epitermicznych (parametr ten zależy głównie od zawartości wodoru w ośrodku skalnym) i przekrój czynny na absorpcję neutronów termicznych (którego zmienność zależy od zawartości silnych absorbentów neutronów termicznych, w tym: Cl, B, Gd) pozwala tzw. sonda neutronowa.

W typowych formacjach występujących w Polsce, gdzie od lat prowadzone są pomiary geofizyczne wykorzystujące metody jądrowe powyższe sposoby są dobrze rozpoznane i spełniają oczekiwania interpretacyjne.

W przypadku łupków gazonośnych sytuacja jest nieco trudniejsza. Łupki gazonośne są specyficznym ośrodkiem, w którym wiele parametrów np. porowatość (tutaj bardzo mała poniżej 10%) jest poza zakresem tradycyjnie mierzonych przez geofizykę wartości. Do tego dochodzi jeszcze złożony skład mineralny, chemiczny, oraz duża niejednorodność ośrodka w niektórych partiach potencjalnego złoża. To wszystko prowadzi do konieczności stworzenia narzędzia, które pozwoli na dokładniejsze pomiary parametrów skał. Prace te realizowane są w ramach ogólnopolskiego projektu „Blue Gas – Polski Gaz Łupkowy”, którego jednym z wykonawców jest Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie (<http://infolupki.pgi.gov.pl/pl/technologie/program-blue-gas-polski-gaz-lupkowy>). W tym celu trwają prace na modelu kompleksowej sondy otworowej CxNT (a New Complex Nuclear Tool), której częścią jest przedstawiona w tym opracowaniu sonda neutronowa N2TE.

W ramach prezentowanej pracy została wymodelowana numerycznie z uwzględnieniem wszystkich niezbędnych szczegółów konstrukcyjnych spektrometryczna sonda neutronowa typu: neutron - neutron epitermiczne i termiczne (N2TE). W zadanym wzorcowym ośrodku skalnym (o znanym składzie chemicznym) przeprowadzono serię eksperymentów numerycznych dla układu składającego się ze spektrometrycznej sondy, odwiertu i otaczającego go ośrodka skalnego. Metodą symulacji komputerowych, przy zastosowaniu programu komputerowego MCNP (Monte Carlo N - Particle Transport Code) [1], zostały obliczone odpowiedzi detektorów tej sondy w geometrii otworowej w zadanym ośrodku skalnym.

2. Założenia modelu obliczeniowego

Symulacja numeryczna profilowania neutronowego w otworze wymaga przygotowania szczegółowych danych wejściowych do stosowanego programu komputerowego. W celu uzyskania wiarygodnych odpowiedzi istotne jest wykonanie modelu sondy jak najlepiej odzwierciedlającego rzeczywistą budowę sondy.

Przeprowadzane symulacje numeryczne mają wszelkie cechy wiarygodnego eksperymentu fizycznego i pozwalają one uzyskać odpowiedzi sondy neutronowej we wzorcach o różnych parametrach geofizycznych. Jest to bardzo wygodny sposób

przeprowadzania eksperymentu nawet w przypadku ośrodków skalnych o różnorodnej i skomplikowanej budowie.

Z punktu widzenia obliczeń numerycznych MCNP, zadanie sprowadza się do wyznaczenia jednowymiarowych funkcji – odpowiedzi detektorów sondy dla określonych wzorcowych modeli skał. Układ charakteryzują parametry geometryczne takie jak grubości poszczególnych warstw oraz parametry fizyczne określające materiał każdej z warstw. Inne parametry charakteryzujące cały modelowany układ to geometria sondy, kształt i średnica otworu, wypełnienie otworu, składy chemiczne materiałów sondy a także parametry związane z samą procedurą symulacji MC. Opisany tutaj model numeryczny sondy N2TE oparty jest na modelu sondy NNTE, który został wykonany przez mgr inż. Andrzeja Drabinę [2].

2.1 Ośrodek skalny

Odpowiedzi sondy neutronowej N2TE wyznaczone zostały w modelowych warunkach, symulujących rzeczywiste profilowanie neutronowe w odwiercie przecinającym ośrodek skalny o zadanych parametrach fizycznych i geometrycznych. W założonym modelu ośrodek ma radialne wymiary nieskończone (tutaj jest to walec o promieniu 100 cm), czyli takie, które już nie mają wpływu na odpowiedź detektorów (dalsze ich zwiększanie nie zmienia w sposób zauważalny odpowiedzi detektorów). Zakładamy, że otwór ma średnicę 180 mm i jest wypełniony wodą.

W przypadku profilowań neutronowych ważnymi parametrami medium skalnego są jego parametry wpływające na transport neutronów w ośrodku: gęstość, porowatość i przekrój czynny na absorpcję. Założony testowy ośrodek skalny składa się z kilkunastu warstw (w większości przypadków są to warstwy o grubości 100 cm). Szczegółowe grubości oraz ułożenie poszczególnych warstw w modelowym ośrodku skalnym zostało przedstawione w Tabeli 1, gdzie wartości głębokości: H_{min} , H_{max} są podawane od góry czyli dodatnie wartości rosną z głębokością, natomiast H jest grubością warstwy.

Tabela 1. Położenie warstw w modelowanym ośrodku skalnym (wartości H rosną wraz z głębokością).

Skala	H_{min} [cm]	H_{max} [cm]	H [cm]
KW	0	100	100
woda	100	200	100
L13	200	300	100
KW	300	315	15
L13	315	415	100
KW	415	515	100
łupek 15%	515	615	100
łupek 9%	615	715	100
łupek 5%	715	815	100
łupek 2 %	815	915	100
BW	915	1015	100
L13	1015	1022.5	7.5
BW	1022.5	1122.5	100
L13	1122.5	1137.5	15
BW	1137.5	1237.5	100

Są to warstwy zbudowane z trzech modeli ceramicznych: KW, BW i L13 - odpowiadającym modelom ceramicznym na stanowisku kalibracyjnym w Zielonej Górze (Baza Geofizyki Wiertniczej w Zielonej Górze) oraz warstwami łupków o czterech różnych porowatościach 2%, 5%, 9% i 15%. Składy chemiczne zastosowanych skał zestawione zostały w Tabeli 2.

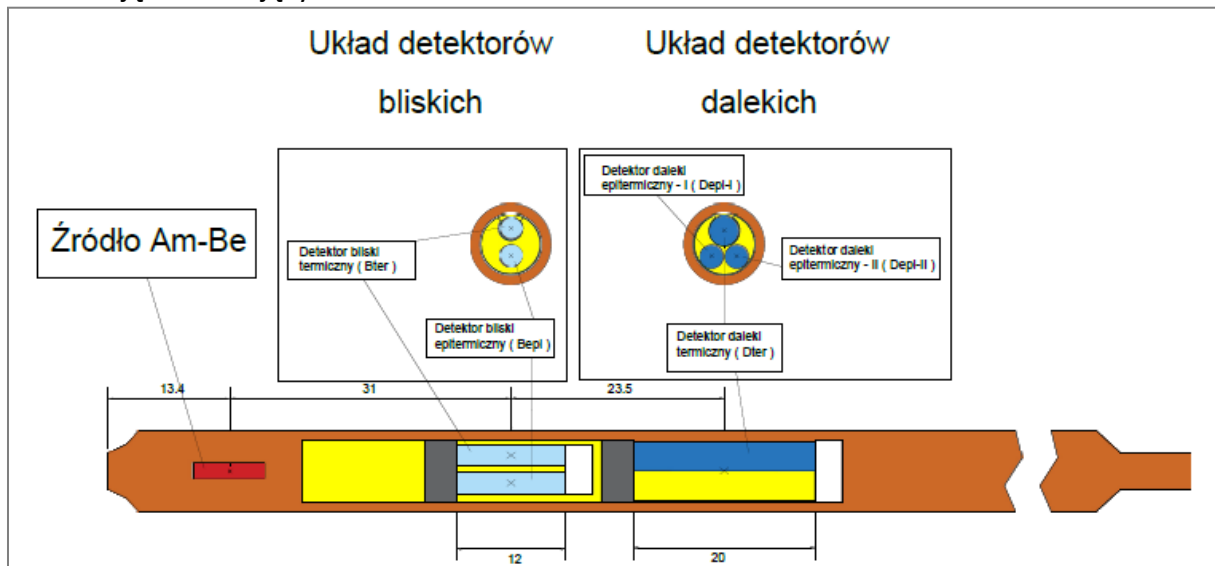
Tabela 2. Zestawienie modeli skalnych przyjętych do obliczeń symulacyjnych.

	Skała	BW	KW	L13	łupek_2%	łupek_5%	łupek_9%	łupek_15%	
g/cm^3	Gęstość szkielet.	2.47	2.45	2.61	2.68	2.68	2.68	2.68	
g/cm^3	Gęstość objętościowa	2.12	2.21	1.65	2.65	2.60	2.53	2.43	
Skład chemiczny matrycy	%	Porowatość	23.81	16.55	60.00	2.00	5.00	9.00	15.00
	%	H ₂ O	0.000	0.000	0.000	1.2420	1.2420	1.2420	1.2420
	%	CO ₂	0.6574	0.6049	0.7067	3.6225	3.6225	3.6225	3.6225
	%	SiO ₂	58.4718	68.5623	61.4751	58.9951	58.9951	58.9951	58.9951
	%	Al ₂ O ₃	36.7896	25.1835	33.6640	13.4550	13.4550	13.4550	13.4550
	%	Fe ₂ O ₃	1.5682	0.8418	1.1153	5.6925	5.6925	5.6925	5.6925
	%	CaO	0.8377	0.7708	0.9004	4.6575	4.6575	4.6575	4.6575
	%	MgO	0.4091	0.2941	0.4911	3.1050	3.1050	3.1050	3.1050
	%	Na ₂ O	0.2922	1.4504	0.3274	0.5175	0.5175	0.5175	0.5175
	%	K ₂ O	0.9740	2.2922	1.3200	3.6225	3.6225	3.6225	3.6225
	%	V ₂ O ₅	0.000	0.000	0.000	0.0414	0.0414	0.0414	0.0414
	%	Cr ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.03105	0.03105	0.03105	0.03105
	%	MnO	0.000	0.000	0.000	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242
	%	TiO ₂	0.000	0.000	0.000	0.621001	0.621001	0.621001	0.621001
	%	C_org	0.000	0.000	0.000	2.484004	2.484004	2.484004	2.484004
	%	S	0.000	0.000	0.000	1.656003	1.656003	1.656003	1.656003
	%	Cl	0.000	0.000	0.000	0.1035	0.1035	0.1035	0.1035
	%	U	0.000	0.000	0.000	0.000745	0.000745	0.000745	0.000745
	%	Th	0.000	0.000	0.000	0.000642	0.000642	0.000642	0.000642
	%	B	0.000	0.000	0.000	0.013455	0.013455	0.013455	0.013455
	%	Li	0.000	0.000	0.000	0.00414	0.00414	0.00414	0.00414
%	Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
%	Gd	0.000	0.000	0.000	0.000621	0.000621	0.000621	0.000621	
%	Sm	0.000	0.000	0.000	0.000518	0.000518	0.000518	0.000518	
%	Er	0.000	0.000	0.000	0.000259	0.000259	0.000259	0.000259	
%	Ni	0.000	0.000	0.000	0.008798	0.008798	0.008798	0.008798	

2.2 Sonda neutronowa N2TE

Sonda neutronowa N2TE typu neutron - neutron epitermiczne i termiczne, to dwa układy detektorów neutronów termicznych i epitermicznych o rozstawach źródło-detektor bliski 31 cm i źródło-detektor daleki 54.5 cm - Rys. 1 (ze względu na prawa autorskie podane zostały tylko podstawowe wymiary). Zestaw detektorów bliskich składa się z układu dwóch neutronowych detektorów helowych: termicznego Bter i epitermicznego Bepi o długości 12 cm. Układ detektorów dalekich składa się z zestawu trzech neutronowych

detektorów helowych: detektora termicznego Dter i dwóch detektorów epitermicznych Depi-I i Depi-II o długości 20 cm. Sonda ta wyposażona jest w źródło neutronów Am-Be o rozkładzie energetycznym neutronów przedstawionym na Rys.2 [7]. Neutrony ze źródła emitowane są do ośrodka skalnego, gdzie następuje ich oddziaływanie z ośrodkiem, wytracają swoją energię na skutek reakcji z atomami ośrodka a następnie te, którym uda się dotrzeć do objętości czynnej danego detektora mogą zostać w nim zarejestrowane. Z samego charakteru transportu strumienia neutronów w ośrodku, polegającego na rozpraszaniu i absorpcji wynika, że odpowiedź detektorów zawiera pewną uśrednioną informację o otaczającym medium.



Rys. 1. Schemat poglądowy sondy N2TE.

Detektory neutronów epitermicznych są mało wrażliwe na wpływ otworu wiertniczego oraz na przekrój czynny absorpcji neutronów termicznych Σ_a . Z kolei sygnał detektora bliskiego termicznego jest zależny od zawartości wodoru w skale oraz od Σ_a skały. Jeśli wskazania detektorów są wycechowane w jednostkach porowatości neutronowej, to różnica wskazań pomiędzy detektorem bliskim termicznym i bliskim epitermicznym daje informację o Σ_a matrycy skalnej.

W celu wykonania symulacji komputerowej sonda N2TE została wymodelowana numerycznie z uwzględnieniem wszystkich szczegółów konstrukcyjnych, w oparciu o istniejący już model sondy NNTTE [2],[3],[4],[5],[6]. Na poglądowym rysunku (Rys.1) przedstawiono jedynie najistotniejsze elementy sondy. Dla potrzeb poprawności symulacji wykonano model numeryczny ośrodka wraz z otworem, w którym umieszcza się sondę (Rys.3). Przeprowadzono szczegółowe modelowania Monte Carlo w celu numerycznego wyznaczenia odpowiedzi detektorów sondy N2TE w ośrodku skalnym złożonym ze wzorców ceramicznych znajdujących się na stanowisku kalibracyjnym w Zielonej Górze oraz z wybranych łupków skalnych o określonych porowatościach. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu programu MCNP.

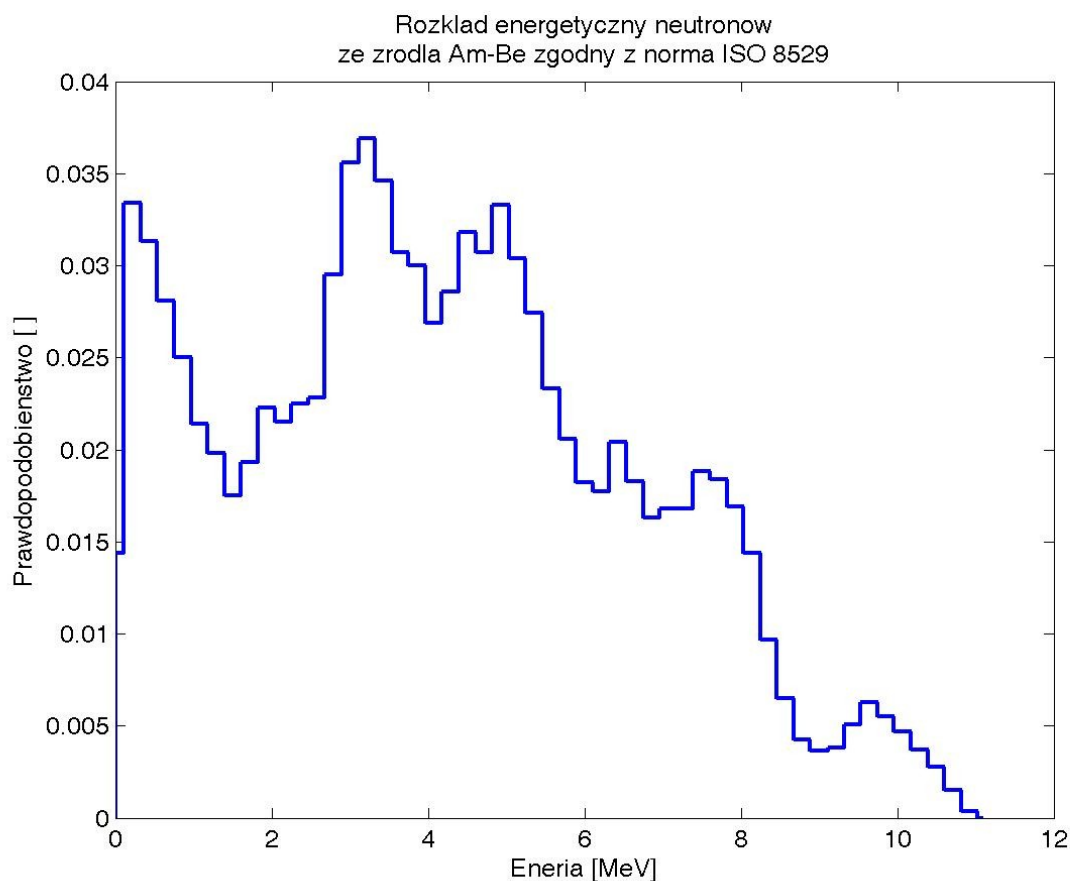
2.3 Źródło neutronów Am-Be

Sonda N2TE jest wyposażona w źródło neutronów Am-Be. Do obliczeń MCNP zastosowany został rozkład energetyczny neutronów emitowanych ze źródła Am-Be zgodny z normą ISO 8529 [7]. Rozkład energetyczny tego źródła został pokazany na Rys.2. Na osi X naniesiona została energia neutronów a na osi Y prawdopodobieństwo emisji neutronów w

określonym przedziale energetycznym. Natomiast wartości liczbowe tego rozkładu znajdują się w Tabeli 3. Energia neutronów oznacza tutaj poszczególne przedziały energii neutronów a P jest prawdopodobieństwem wystąpienia neutronów o energii z danego przedziału energetycznego w odniesieniu do całego rozkładu. Rozkład ten jest znormalizowany do 1.

Tabela 3. Rozkład energetyczny neutronów emitowanych ze źródła AM-Be zgodny z normą ISO 8529 [7].

Energia neutronów [MeV]	P []	Energia neutronów [MeV]	P []
0 - 4.14E-07	0.00E+00	5.47E+00 - 5.68E+00	2.33E-02
4.14E-07 - 1.10E-01	1.44E-02	5.68E+00 - 5.89E+00	2.06E-02
1.10E-01 - 3.30E-01	3.34E-02	5.89E+00 - 6.11E+00	1.82E-02
3.30E-01 - 5.40E-01	3.13E-02	6.11E+00 - 6.32E+00	1.77E-02
5.40E-01 - 7.50E-01	2.81E-02	6.32E+00 - 6.54E+00	2.04E-02
7.50E-01 - 9.70E-01	2.50E-02	6.54E+00 - 6.75E+00	1.83E-02
7.50E-01 - 1.18E+00	2.14E-02	6.75E+00 - 6.96E+00	1.63E-02
1.18E+00 - 1.40E+00	1.98E-02	6.96E+00 - 7.18E+00	1.68E-02
1.40E+00 - 1.61E+00	1.75E-02	7.18E+00 - 7.39E+00	1.68E-02
1.61E+00 - 1.82E+00	1.93E-02	7.39E+00 - 7.61E+00	1.88E-02
1.82E+00 - 2.04E+00	2.23E-02	7.61E+00 - 7.82E+00	1.84E-02
2.04E+00 - 2.25E+00	2.15E-02	7.82E+00 - 8.03E+00	1.69E-02
2.25E+00 - 2.47E+00	2.25E-02	8.03E+00 - 8.25E+00	1.44E-02
2.47E+00 - 2.68E+00	2.28E-02	8.25E+00 - 8.46E+00	9.68E-03
2.68E+00 - 2.90E+00	2.95E-02	8.46E+00 - 8.68E+00	6.52E-03
2.90E+00 - 3.11E+00	3.56E-02	8.68E+00 - 8.89E+00	4.26E-03
3.11E+00 - 3.32E+00	3.69E-02	8.89E+00 - 9.11E+00	3.67E-03
3.32E+00 - 3.54E+00	3.46E-02	9.11E+00 - 9.32E+00	3.81E-03
3.54E+00 - 3.75E+00	3.07E-02	9.32E+00 - 9.53E+00	5.06E-03
3.75E+00 - 3.97E+00	3.00E-02	9.53E+00 - 9.75E+00	6.25E-03
3.97E+00 - 4.18E+00	2.69E-02	9.75E+00 - 9.96E+00	5.52E-03
4.18E+00 - 4.39E+00	2.86E-02	9.96E+00 - 1.02E+01	4.68E-03
4.39E+00 - 4.61E+00	3.18E-02	1.02E+01 - 1.04E+01	3.70E-03
4.61E+00 - 4.82E+00	3.07E-02	1.04E+01 - 1.06E+01	2.78E-03
4.82E+00 - 5.04E+00	3.33E-02	1.06E+01 - 1.08E+01	1.51E-03
5.04E+00 - 5.25E+00	3.04E-02	1.08E+01 - 1.10E+01	3.63E-04
5.25E+00 - 5.47E+00	2.74E-02	1.10E+01 - 1.11E+01	0.00E+00



Rys.2. Rozkład energetyczny neutronów emitowanych ze źródła AM-Be zgodny z normą ISO 8529 [7].

3. Symulacje MC odpowiedzi sondy N2TE w modelowym ośrodku skalnym

Program MCNP jest podstawowym narzędziem przy pomocy którego można wykonać szczegółowe obliczenia dla otworowych sond wykorzystujących źródła neutronowe lub źródła promieniowania gamma. Program MCNP pozwala na symulowanie komputerowe zjawisk oddziaływania promieniowania jądrowego w ośrodku materialnym w oparciu o przekroje czynne na te oddziaływania. W prezentowanych tutaj obliczeniach wykorzystano przekroje czynne na oddziaływanie neutronów znajdujące się w bibliotekach danych jądrowych ENDF/b-VII.0 [8].

Program bazuje na metodzie Monte Carlo, losowo dobierając prawdopodobieństwo zajścia zjawiska absorpcji i rozpraszania neutronów. Dlatego też wszystkie elementy rozpatrywanego układu fizycznego, sonda + ośrodek, zostały zdefiniowane jako obszary geometryczne, składające się z materiału o jednoznacznie określonym składzie pierwiastkowym, udziałach wagowych poszczególnych pierwiastków w danym materiale i gęstości tego materiału.

Obliczenia przeprowadzone zostały na klastrze komputerowym McRadiator, należącym do Zakładu Fizyki Transportu Promieniowania (NZ54) IFJ PAN. Klaster składa się z sześciu jednostek, z których każda jest wyposażona w dwa procesory cztero-rdzeniowe. Pięć z nich posiada procesory o częstotliwości taktowania zegara 2.33 GHz, zaś jedna - 2.66 GHz.

3.1. Opis geometrii układu

W celu określenia położenia sondy należy zdefiniować parametr, który będzie nam określał w sposób jednoznaczny położenie sondy względem warstw ośrodka skalnego. Dla celów obliczeniowych założony został następujący układ współrzędnych: oś Z, równoległa do osi otworu i osi sondy, skierowana jest "od dołu do góry". W tym układzie „strop” oznacza sufit i jego położenie ma zawsze większą wartość liczbową niż „spąg”, czyli podłoga. Przy tak określonej osi Z w opisanym modelu źródło zawsze znajduje się poniżej detektorów, czyli współrzędna „z” źródła zawsze będzie mniejsza niż współrzędne „z” detektorów. Warstwa najwyżej położona to warstwa KW, która ma największe „z”, a warstwa najniżej położona to BW, która ma najniższe wartości „z”.

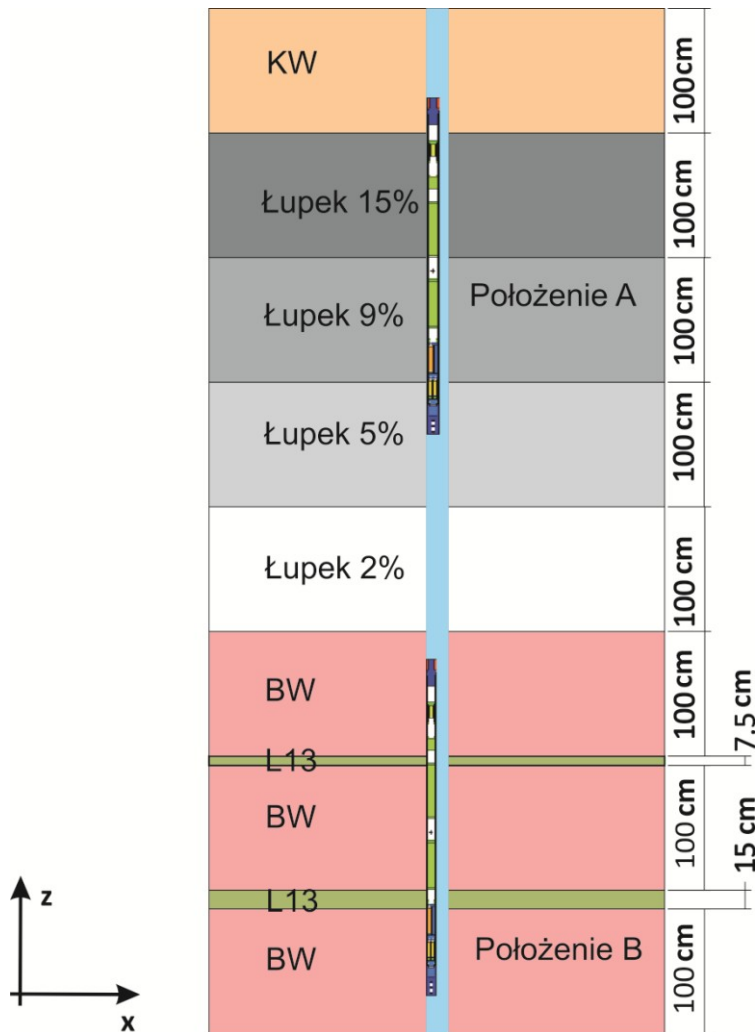
W założonym problemie mamy dwa złożone obiekty: sondę i model ośrodka. Każdy z tych obiektów składa się z wielu elementów, które w układzie danego obiektu są niezmiennie. W związku z tym konieczne jest zdefiniowanie parametru, który zwiąże nam położenie sondy z położeniem ośrodka (wartość współrzędnej „z”). Założono, że dla sondy charakterystycznym punktem jest środek źródła a dla modelu najwyżej położony punkt skały (strop najwyżej położonej skały KW). Zakładamy, że współrzędna „z” źródła sondy jest zawsze równa zero ($z_{\text{source}} = 0$), natomiast zmienia się położenie ośrodka, czyli zmienną jest współrzędna „z” stropu modelu (z_g). Co do wartości zmienna z_g jest głębokością na jakiej znajduje się źródło sondy względem górnej powierzchni modelu (stropu). Oś X skierowana jest od strony lewej do prawej i przechodzi przez geometryczny środek sondy. Oś Y jest skierowana prostopadle od płaszczyzny rysunku. W tym układzie współrzędnych środek źródła ma współrzędne: $x = 0$, $y = 0$ i $z = 0$.

Tak zdefiniowany układ współrzędnych jest układem własnym sondy, w którym jest ona nieruchoma, a zmienia się jedynie położenie warstwy. W modelowanym przypadku zmiana położenia sondy (jej ruch w dół), tak naprawdę sprowadza się do ruchu warstw ośrodka (ich ruch w górę). Głównym powodem takiego podejścia jest uproszczenie procedury obliczeniowej. Model sondy, jest układem bardzo skomplikowanym i jej ruch w symulacjach wymagałby jej przemieszczania, co oznaczałoby konieczność przemieszczania, zmieniania położenia wszystkich elementów sondy. Dla istoty problemu jak i samych obliczeń nie ma znaczenia, czy to sonda porusza się w dół czy też warstwy przesuwają się do góry. Biorąc pod uwagę te argumenty dużo prościej i bezpieczniej jest wybrać taki układ współrzędnych, w którym trzeba zmieniać położenie warstw modelu.

4. Wyniki obliczeń

Prezentowane tutaj wyniki obliczeń obejmują 71 przypadków położenia sondy w odwiercie, które odpowiadają 71 wartościom z_g . Sonda zmienia swoje położenie od miejsca oznaczonego na Rys.3 poprzez „Położenie A” do miejsca oznaczonego przez „Położenie B”. Krok z jakim zmieniane było położenie sondy wynosi 5 cm.

W wyniku symulacji otrzymano odpowiedź każdego z pięciu detektorów, którą definiujemy jako liczbę neutronów absorbowanych w jednostce objętości detektora, przypadającą na jeden neutron emitowany ze źródła [$n/cm^3/sn$].



Rys. 3. Wybrane położenia sondy N2TE we fragmencie modelowego ośrodka skalnego.

Zasadnicze wyniki obliczeń dla każdego z detektorów przedstawione zostały w Tabelach 4 – 8. Odpowiedź każdego z pięciu detektorów została przedstawiona na poszczególnych rysunkach: Rys. 4 – 8. Do wizualizacji odpowiedzi poszczególnych detektorów zastosowany został program MATLAB [9]. Prezentowane tutaj wyniki są tylko częścią całego zestawu wyników uzyskanych dla tej sondy. Całość zgodnie z warunkami umowy zostanie przekazana na nośnikach elektronicznych zlecniodawcy obliczeń w ramach projektu „Blue Gas”, którym jest Wydział GGiOŚ AGH Kraków.

Tabela 4. Odpowiedź detektora bliskiego termicznego Bter w założonym ośrodku skalnym przedstawionym na Rys.3.

z_g [cm]	Bter [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]	z_g [cm]	Bter [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]
750	2.263E-06	0.50	980	2.334E-06	0.55
755	2.261E-06	0.50	985	2.334E-06	0.55
760	2.263E-06	0.50	990	2.333E-06	0.55
765	2.268E-06	0.50	995	2.334E-06	0.55
770	2.266E-06	0.50	1000	2.331E-06	0.55
775	2.266E-06	0.50	1005	2.325E-06	0.55
780	2.265E-06	0.50	1010	2.305E-06	0.55
785	2.265E-06	0.50	1015	2.247E-06	0.56
790	2.266E-06	0.50	1020	2.132E-06	0.57
795	2.268E-06	0.50	1025	2.044E-06	0.58
800	2.268E-06	0.50	1030	1.903E-06	0.60
805	2.268E-06	0.50	1035	1.855E-06	0.61
810	2.281E-06	0.50	1040	1.801E-06	0.62
815	2.299E-06	0.50	1045	1.832E-06	0.61
820	2.359E-06	0.49	1050	2.084E-06	0.58
825	2.381E-06	0.49	1055	2.287E-06	0.55
830	2.433E-06	0.48	1060	2.343E-06	0.55
835	2.481E-06	0.48	1065	2.33E-06	0.55
840	2.511E-06	0.47	1070	2.33E-06	0.55
845	2.527E-06	0.46	1075	2.33E-06	0.55
850	2.538E-06	0.46	1080	2.33E-06	0.55
855	2.532E-06	0.46	1085	2.33E-06	0.55
860	2.538E-06	0.46	1090	2.33E-06	0.55
865	2.532E-06	0.46	1095	2.33E-06	0.55
870	2.536E-06	0.46	1100	2.33E-06	0.55
875	2.537E-06	0.46	1105	2.33E-06	0.55
880	2.538E-06	0.46	1110	2.33E-06	0.55
885	2.537E-06	0.46	1115	2.32E-06	0.55
890	2.536E-06	0.46	1120	2.28E-06	0.55
895	2.532E-06	0.46	1125	2.18E-06	0.57
900	2.524E-06	0.46	1130	2.01E-06	0.59
905	2.508E-06	0.46	1135	1.82E-06	0.62
910	2.455E-06	0.47	1140	1.68E-06	0.64
915	2.369E-06	0.48	1145	1.53E-06	0.67
920	2.230E-06	0.49	1150	1.46E-06	0.69
925	2.090E-06	0.51	1155	1.54E-06	0.67
930	1.988E-06	0.53	1160	1.72E-06	0.63
935	1.888E-06	0.55	1165	2.079E-06	0.58
940	1.906E-06	0.57	1170	2.282E-06	0.55
945	2.058E-06	0.57	1175	2.339E-06	0.55
950	2.215E-06	0.56	1180	2.330E-06	0.55
955	2.309E-06	0.55	1185	2.332E-06	0.55
960	2.328E-06	0.55	1190	2.333E-06	0.55
965	2.331E-06	0.55	1195	2.333E-06	0.55
970	2.333E-06	0.55	1200	2.334E-06	0.55
975	2.333E-06	0.55			

Tabela 5. Odpowiedź detektora bliskiego epitermicznego Bepi w założonym ośrodku skalnym przedstawionym na Rys.3.

z_g [cm]	Bepi [n/cm³/sn]	Błąd względny [%]	z_g [cm]	Bepi [n/cm³/sn]	Błąd względny [%]
750	4.226E-06	0.54	980	2.726E-06	0.68
755	4.250E-06	0.54	985	2.726E-06	0.68
760	4.253E-06	0.54	990	2.726E-06	0.68
765	4.247E-06	0.54	995	2.725E-06	0.68
770	4.251E-06	0.54	1000	2.724E-06	0.68
775	4.252E-06	0.54	1005	2.719E-06	0.68
780	4.250E-06	0.54	1010	2.705E-06	0.68
785	4.251E-06	0.54	1015	2.660E-06	0.69
790	4.250E-06	0.54	1020	2.588E-06	0.70
795	4.251E-06	0.54	1025	2.476E-06	0.72
800	4.250E-06	0.54	1030	2.373E-06	0.73
805	4.250E-06	0.54	1035	2.305E-06	0.75
810	4.272E-06	0.54	1040	2.273E-06	0.75
815	4.288E-06	0.54	1045	2.389E-06	0.73
820	4.313E-06	0.53	1050	2.541E-06	0.70
825	4.375E-06	0.53	1055	2.649E-06	0.69
830	4.476E-06	0.53	1060	2.701E-06	0.68
835	4.578E-06	0.52	1065	2.719E-06	0.68
840	4.692E-06	0.52	1070	2.721E-06	0.68
845	4.824E-06	0.51	1075	2.725E-06	0.68
850	4.865E-06	0.51	1080	2.725E-06	0.68
855	4.876E-06	0.51	1085	2.726E-06	0.68
860	4.887E-06	0.50	1090	2.726E-06	0.68
865	4.886E-06	0.50	1095	2.726E-06	0.68
870	4.892E-06	0.50	1100	2.725E-06	0.68
875	4.890E-06	0.50	1105	2.724E-06	0.68
880	4.890E-06	0.50	1110	2.722E-06	0.68
885	4.890E-06	0.50	1115	2.713E-06	0.68
890	4.889E-06	0.50	1120	2.689E-06	0.68
895	4.887E-06	0.50	1125	2.608E-06	0.69
900	4.876E-06	0.50	1130	2.465E-06	0.71
905	4.852E-06	0.51	1135	2.320E-06	0.74
910	4.792E-06	0.51	1140	2.157E-06	0.76
915	4.632E-06	0.52	1145	2.041E-06	0.79
920	4.433E-06	0.53	1150	2.036E-06	0.79
925	4.111E-06	0.55	1155	2.129E-06	0.77
930	3.753E-06	0.58	1160	2.313E-06	0.74
935	3.440E-06	0.61	1165	2.514E-06	0.71
940	3.122E-06	0.63	1170	2.642E-06	0.69
945	2.900E-06	0.66	1175	2.699E-06	0.68
950	2.798E-06	0.67	1180	2.719E-06	0.68
955	2.745E-06	0.68	1185	2.720E-06	0.68
960	2.732E-06	0.68	1190	2.725E-06	0.68
965	2.726E-06	0.68	1195	2.726E-06	0.68
970	2.726E-06	0.68	1200	2.726E-06	0.68
975	2.726E-06	0.68			

Tabela 6. Odpowiedź detektora dalekiego termicznego Dter w założonym ośrodku skalnym przedstawionym na Rys.3.

z_g [cm]	Dter [n/cm³/sn]	Błąd względny [%]	z_g [cm]	Dter [n/cm³/sn]	Błąd względny [%]
750	1.641E-07	1.26	980	1.424E-07	1.39
755	1.682E-07	1.24	985	1.433E-07	1.39
760	1.744E-07	1.19	990	1.440E-07	1.39
765	1.807E-07	1.18	995	1.439E-07	1.38
770	1.805E-07	1.19	1000	1.439E-07	1.38
775	1.834E-07	1.17	1005	1.434E-07	1.39
780	1.854E-07	1.16	1010	1.413E-07	1.40
785	1.856E-07	1.16	1015	1.385E-07	1.42
790	1.859E-07	1.16	1020	1.338E-07	1.45
795	1.855E-07	1.16	1025	1.258E-07	1.48
800	1.861E-07	1.16	1030	1.204E-07	1.51
805	1.861E-07	1.16	1035	1.193E-07	1.54
810	1.872E-07	1.16	1040	1.107E-07	1.57
815	1.882E-07	1.16	1045	1.119E-07	1.61
820	1.851E-07	1.16	1050	1.085E-07	1.62
825	1.866E-07	1.15	1055	1.065E-07	1.63
830	1.921E-07	1.14	1060	9.887E-08	1.66
835	2.001E-07	1.13	1065	1.031E-07	1.63
840	2.071E-07	1.10	1070	1.235E-07	1.54
845	2.105E-07	1.09	1075	1.330E-07	1.45
850	2.246E-07	1.06	1080	1.410E-07	1.41
855	2.294E-07	1.05	1085	1.447E-07	1.39
860	2.354E-07	1.03	1090	1.436E-07	1.39
865	2.406E-07	1.01	1095	1.440E-07	1.39
870	2.452E-07	1.00	1100	1.438E-07	1.38
875	2.483E-07	0.99	1105	1.439E-07	1.38
880	2.473E-07	0.99	1110	1.437E-07	1.39
885	2.474E-07	0.98	1115	1.426E-07	1.39
890	2.474E-07	0.98	1120	1.394E-07	1.40
895	2.468E-07	0.98	1125	1.342E-07	1.44
900	2.464E-07	0.99	1130	1.255E-07	1.49
905	2.448E-07	0.99	1135	1.159E-07	1.56
910	2.396E-07	1.00	1140	1.048E-07	1.62
915	2.303E-07	1.02	1145	9.662E-08	1.69
920	2.144E-07	1.05	1150	8.967E-08	1.77
925	1.991E-07	1.08	1155	8.705E-08	1.77
930	1.837E-07	1.14	1160	8.308E-08	1.84
935	1.651E-07	1.19	1165	7.769E-08	1.88
940	1.460E-07	1.26	1170	7.534E-08	1.88
945	1.320E-07	1.34	1175	7.867E-08	1.85
950	1.243E-07	1.37	1180	9.171E-08	1.74
955	1.159E-07	1.42	1185	1.176E-07	1.58
960	1.142E-07	1.49	1190	1.318E-07	1.46
965	1.254E-07	1.47	1195	1.407E-07	1.40
970	1.325E-07	1.45	1200	1.447E-07	1.39
975	1.392E-07	1.40			

Tabela 7. Odpowiedź detektora dalekiego epitermicznego I Depi-I w założonym ośrodku skalnym przedstawionym na Rys.3.

z_g [cm]	Depi-I [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]	z_g [cm]	Depi-I [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]
750	1.176E-07	1.99	980	6.299E-08	2.68
755	1.252E-07	1.89	985	6.231E-08	2.71
760	1.305E-07	1.90	990	6.209E-08	2.74
765	1.340E-07	1.88	995	6.203E-08	2.74
770	1.372E-07	1.83	1000	6.178E-08	2.74
775	1.417E-07	1.81	1005	6.157E-08	2.74
780	1.445E-07	1.80	1010	6.123E-08	2.75
785	1.446E-07	1.81	1015	6.089E-08	2.76
790	1.449E-07	1.80	1020	5.846E-08	2.72
795	1.448E-07	1.81	1025	5.589E-08	2.81
800	1.453E-07	1.80	1030	5.303E-08	2.92
805	1.455E-07	1.80	1035	5.478E-08	2.92
810	1.452E-07	1.80	1040	5.253E-08	2.91
815	1.460E-07	1.80	1045	5.261E-08	3.09
820	1.459E-07	1.79	1050	5.196E-08	3.04
825	1.450E-07	1.80	1055	5.040E-08	3.07
830	1.424E-07	1.80	1060	5.146E-08	3.11
835	1.543E-07	1.77	1065	5.159E-08	3.05
840	1.577E-07	1.73	1070	5.434E-08	2.86
845	1.568E-07	1.73	1075	5.880E-08	2.80
850	1.655E-07	1.66	1080	6.032E-08	2.73
855	1.743E-07	1.68	1085	6.155E-08	2.72
860	1.809E-07	1.63	1090	6.146E-08	2.72
865	1.842E-07	1.62	1095	6.198E-08	2.74
870	1.883E-07	1.60	1100	6.198E-08	2.74
875	1.929E-07	1.58	1105	6.209E-08	2.74
880	1.923E-07	1.58	1110	6.182E-08	2.74
885	1.935E-07	1.57	1115	6.135E-08	2.75
890	1.930E-07	1.57	1120	6.084E-08	2.77
895	1.933E-07	1.57	1125	5.978E-08	2.80
900	1.933E-07	1.57	1130	5.645E-08	2.87
905	1.929E-07	1.57	1135	5.577E-08	2.96
910	1.902E-07	1.59	1140	5.059E-08	3.04
915	1.815E-07	1.62	1145	4.989E-08	3.13
920	1.749E-07	1.67	1150	4.564E-08	3.23
925	1.682E-07	1.67	1155	4.684E-08	3.25
930	1.494E-07	1.80	1160	4.118E-08	3.46
935	1.420E-07	1.82	1165	4.425E-08	3.41
940	1.270E-07	1.90	1170	4.138E-08	3.37
945	1.169E-07	2.02	1175	4.580E-08	3.19
950	1.067E-07	2.09	1180	4.701E-08	3.10
955	8.818E-08	2.27	1185	5.173E-08	2.91
960	7.776E-08	2.40	1190	5.754E-08	2.82
965	7.236E-08	2.61	1195	6.016E-08	2.74
970	6.636E-08	2.61	1200	6.149E-08	2.72
975	6.366E-08	2.65			

Tabela 8. Odpowiedź detektora dalekiego epitermicznego II Depi-II w założonym ośrodku skalnym przedstawionym na Rys.3.

z_g [cm]	Depi-II [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]	z_g [cm]	Depi-II [n/cm ³ /sn]	Błąd względny [%]
750	1.164E-07	2.00	980	6.096E-08	2.70
755	1.237E-07	1.94	985	6.080E-08	2.69
760	1.295E-07	1.90	990	6.011E-08	2.69
765	1.319E-07	1.85	995	6.011E-08	2.70
770	1.361E-07	1.81	1000	5.993E-08	2.70
775	1.397E-07	1.81	1005	5.975E-08	2.71
780	1.408E-07	1.81	1010	5.940E-08	2.70
785	1.412E-07	1.83	1015	5.742E-08	2.76
790	1.414E-07	1.82	1020	5.547E-08	2.78
795	1.415E-07	1.82	1025	5.427E-08	2.88
800	1.417E-07	1.82	1030	5.196E-08	2.89
805	1.414E-07	1.82	1035	5.408E-08	2.92
810	1.406E-07	1.82	1040	5.092E-08	2.96
815	1.388E-07	1.82	1045	4.933E-08	2.92
820	1.396E-07	1.83	1050	5.171E-08	3.01
825	1.451E-07	1.79	1055	4.964E-08	3.05
830	1.456E-07	1.78	1060	4.872E-08	3.02
835	1.496E-07	1.77	1065	5.033E-08	2.89
840	1.518E-07	1.73	1070	5.327E-08	2.90
845	1.563E-07	1.72	1075	5.687E-08	2.81
850	1.669E-07	1.70	1080	5.869E-08	2.75
855	1.682E-07	1.65	1085	5.928E-08	2.72
860	1.775E-07	1.62	1090	5.982E-08	2.70
865	1.834E-07	1.58	1095	5.989E-08	2.70
870	1.844E-07	1.57	1100	5.987E-08	2.70
875	1.918E-07	1.57	1105	6.005E-08	2.71
880	1.913E-07	1.56	1110	5.971E-08	2.71
885	1.930E-07	1.56	1115	5.969E-08	2.72
890	1.924E-07	1.56	1120	5.881E-08	2.73
895	1.928E-07	1.56	1125	5.641E-08	2.78
900	1.926E-07	1.56	1130	5.338E-08	2.86
905	1.924E-07	1.56	1135	5.171E-08	3.01
910	1.896E-07	1.57	1140	4.979E-08	3.03
915	1.852E-07	1.58	1145	4.651E-08	3.20
920	1.705E-07	1.60	1150	4.510E-08	3.20
925	1.701E-07	1.68	1155	4.434E-08	3.25
930	1.514E-07	1.75	1160	4.316E-08	3.17
935	1.421E-07	1.82	1165	4.302E-08	3.35
940	1.259E-07	1.93	1170	4.104E-08	3.27
945	1.154E-07	2.03	1175	4.163E-08	3.18
950	9.948E-08	2.10	1180	4.788E-08	3.05
955	8.773E-08	2.29	1185	5.115E-08	2.95
960	7.892E-08	2.44	1190	5.587E-08	2.86
965	7.061E-08	2.51	1195	5.860E-08	2.76
970	6.612E-08	2.64	1200	5.909E-08	2.73
975	6.250E-08	2.65			

Analizując wyniki zawarte w Tabelach 4 - 8 należy stwierdzić, że obliczenia zostały wykonane z dużą dokładnością, nie gorszą niż ok. 3.5 % dla detektorów Depi-I i Depi-II. Dokładność ta została osiągnięta dzięki przeprowadzeniu dla każdego analizowanych przypadków symulacji historii odpowiednio dużej liczby neutronów (150 mln historii neutronów emitowanych ze źródła Am-Be dla każdego przypadku położenia sondy).

Funkcje odpowiedzi każdego z detektorów wyznaczone są w kolejnych punktach zmiennej niezależnej z_g . Wartość zmiennej z_g przyjmuje wartości w zakresie od 750 cm („Położenie A” na Rys. 3) do 1200 cm („Położenie B” na Rys. 3).

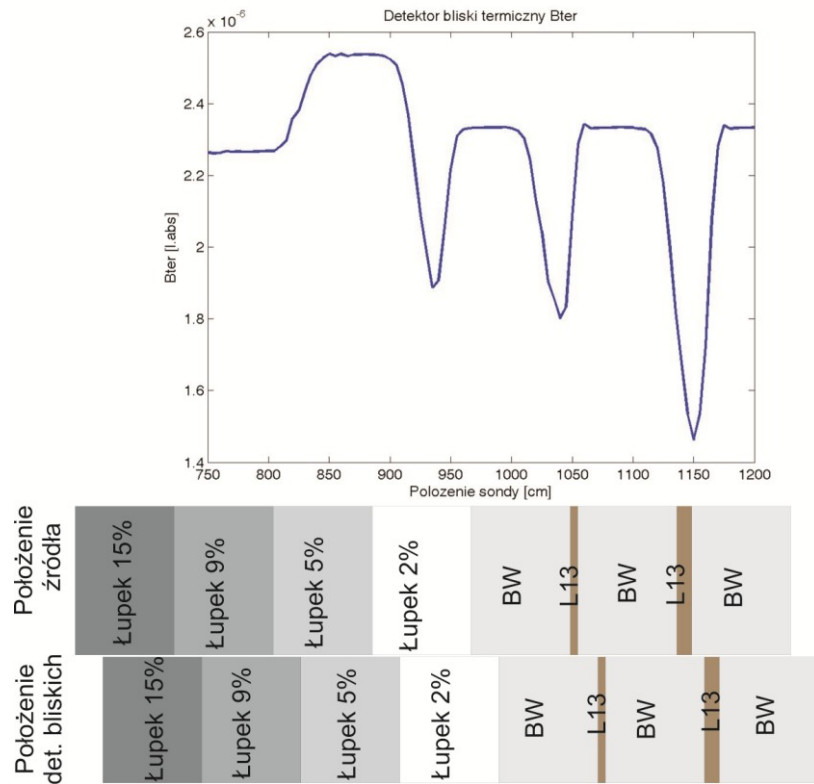
„Położenie A” oznacza, że źródło sondy znajduje się na ok. 1/3 grubości warstwy (mierząc od stropu tej warstwy) warstwy złożonej z „Łupka 5%”. W zakresie tej warstwy, o grubości 100 cm, znajdują się również detektory bliskie. Detektory dalekie, z racji budowy sondy, ulokowane są w całości w warstwie leżącej powyżej „Łupka 5%”, czyli w warstwie, którą jest „Łupek 9%”. Jest to skała o większej porowatości, niż skała „Łupek 5%”. Pory takiej skały wypełnione są wodą. Większa ilość porów w skale pociąga za sobą większą ilość wodoru, co z kolei powoduje, że neutrony emitowane ze źródła są tam w większym stopniu spowalniane i mniejsza ich ilość dociera do detektorów dalekich. Można to zaobserwować na Rys. 4 - 8.

Poniżej warstwy złożonej z „Łupka 5%” znajduje się gruba 100 cm warstwa „Łupka 2%”. Z racji mniejszej porowatości neutrony są tutaj słabiej zatrzymywane i w związku z tym następuje zwiększenie neutronów docierających i zaabsorbowanych w poszczególnych detektorach. Ponieważ na odpowiedź detektorów bliskich nie ma wpływu warstwa „Łupek 9%”, to na początku przebiegu ich odpowiedzi widzimy „płaski odcinek” (Rys. 4-5).

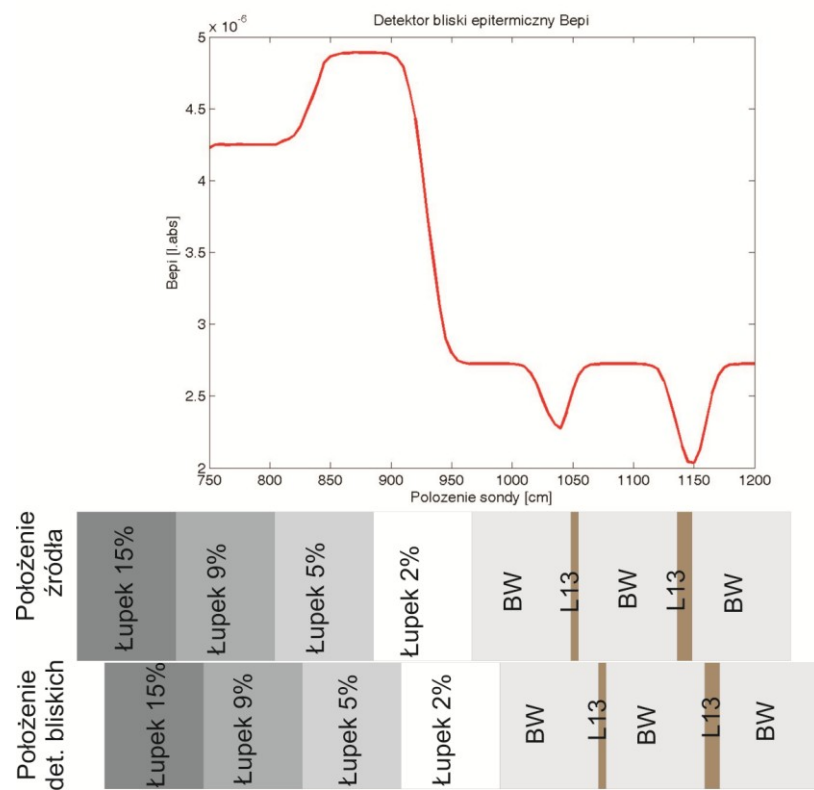
Sonda kolejno w swoich położeniach przechodzi przez warstwę złożoną ze wzorca ceramicznego BW, który jest poprzecinany cienkimi warstewkami skały L13 w następującej sekwencji: 100 cm warstwy BW, 7.5 cm warstwy L13, 100 cm warstwy BW, 15 cm warstwy L13 i 100 cm warstwy BW (Rys.3). Zarówno wzorzec skalny BW jak i L13 są skałami o dużo większej porowatości niż „Łupki”. Porowatość wzorca skalnego BW wynosi 23% a pory tej skały nie są wypełnione wodą. Natomiast porowatość skały L13 wynosi aż 60%, i pory tej skały również nie są wypełnione wodą. W przebiegach odpowiedzi poszczególnych detektorów widoczne są miejsca, gdzie na ich odpowiedź ma wpływ warstwa L13. Następuje tam gwałtowny spadek neutronów docierających do poszczególnych detektorów (szczególnie widoczny dla detektorów termicznych Bter – Rys.4 i Dter – Rys.6).

„Położenie B” oznacza, że źródło sondy znajduje się na ok. 1/3 grubości, mierząc od spągu, najniższej położonej warstwy BW. W tym położeniu sondy wszystkie detektory znajdują się na poziomie skały BW.

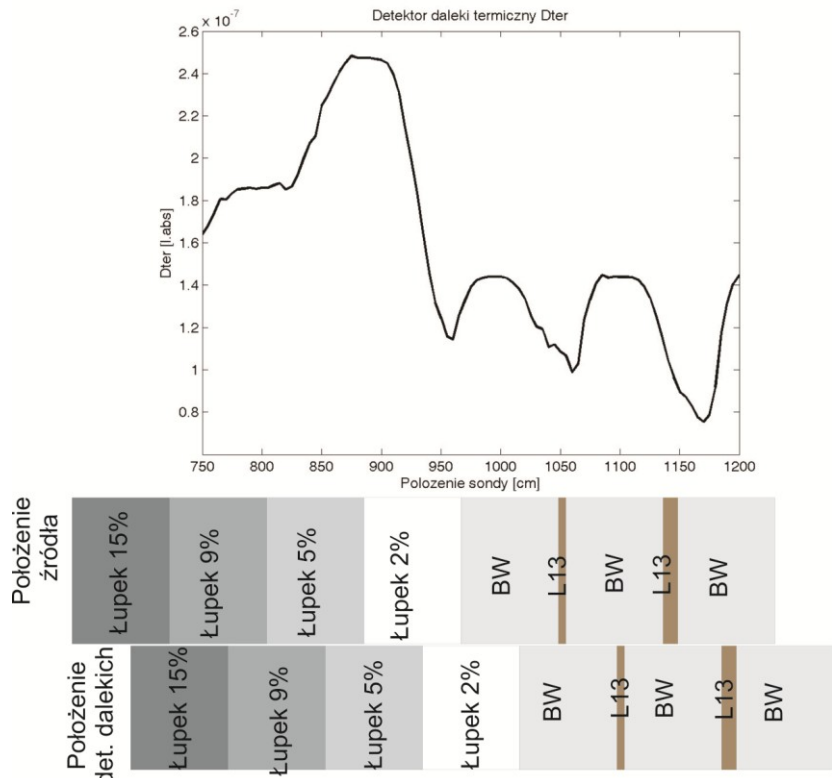
Na wykresach odpowiedzi poszczególnych detektorów widzimy zmianę liczby neutronów docierających do poszczególnych detektorów wraz ze zmianą parametrów ośrodka, przez który sonda przechodzi. Detektor bliski termiczny wydaje się być najbardziej czuły na zmiany parametrów otaczającego ośrodka. Odpowiedzi detektorów dalekich epitermicznych Depi-I i Depi-II wyglądają niemalże identycznie, co by się zgadzało z ich symetrycznym położeniem względem osi sondy.



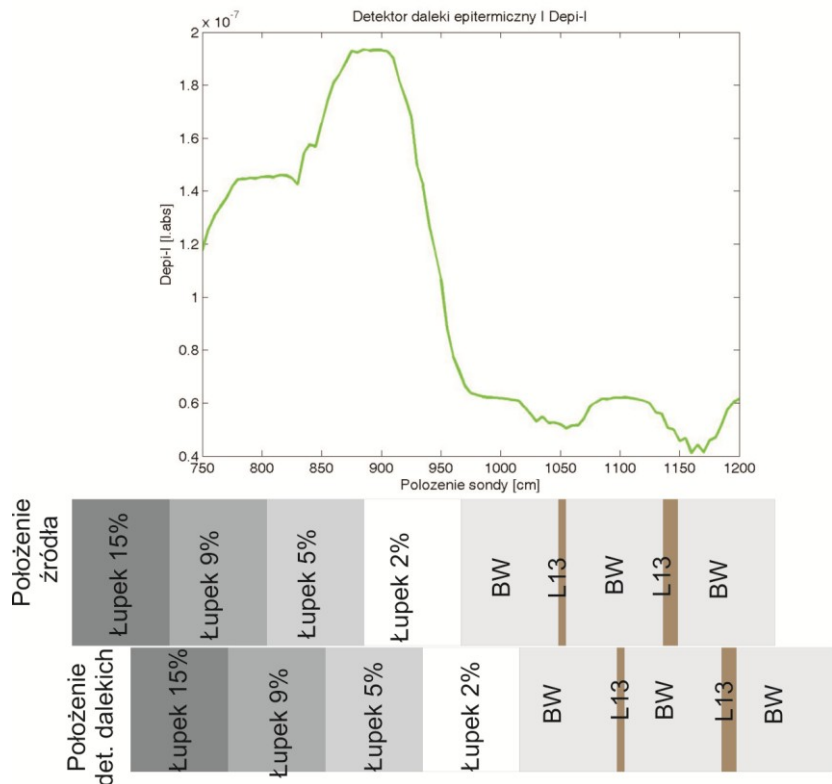
Rys. 4. Odpowiedź detektora bliskiego termicznego w modelowym ośrodku skalnym.



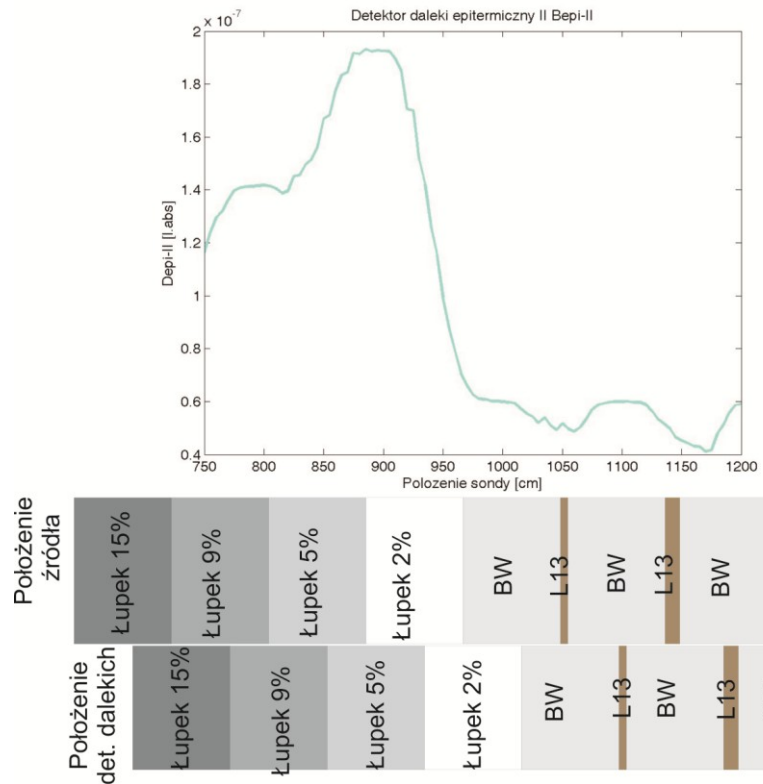
Rys. 5. Odpowiedź detektora bliskiego epitermicznego w modelowym ośrodku skalnym.



Rys. 6. Odpowiedź detektora dalekiego termicznego w modelowym ośrodku skalnym.



Rys. 7. Odpowiedź detektora dalekiego epitermicznego I w modelowym ośrodku skalnym.



Rys. 8. Odpowiedź detektora dalekiego epitermicznego II w modelowym ośrodku skalnym.

Literatura

1. MCNP team
X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
2. A. Drabina, T. Zorski
Zastosowanie programu MCNP do symulacji odpowiedzi sondy neutronowej NNTE
Prace Instytutu Nafty i Gazu, **137** (2006) 509-515; GEOPETROL 2006;
3. U. Woźnicka, D. Dworak, U. Wiącek, T. Zorski
Symulacje numeryczne odpowiedzi głębokościowej sondy NNTE w formacjach cienkowarstwowych nachylonych do osi odwiertu. Założenia i obliczenia wstępne metodą Monte Carlo
IFJ Report No. [2050/AP](#) (2011);
4. U. Woźnicka, D. Dworak, U. Wiącek
The possibilities of numerical modelling based on the study of the response of neutron logging in dipped thin-layer holes (in Polish)
Prace Instytutu Nafty i Gazu, **182** (2012) 535-539; GEOPETROL 2012;
5. U. Woźnicka, D. Dworak, U. Wiącek, T. Zorski
Neutron well-logging profiles in sloped thin layer formations simulated by Monte Carlo method
Geosciences and Engineering, **1** (2012) 173-178;
6. U. Woźnicka, D. Dworak, U. Wiącek, T. Zorski
Geophysical nuclear profiling in asymmetric thin-layer formations (Computer simulations based on the study of the NNTE neutron logging tool) (in Polish)
IFJ PAN, Kraków, ISBN: 978-83-934248-7-0 (2012);
7. H. Kluge
Irradiation Facility with Radioactive Reference Neutron Sources: Basic principles,
PTB-Bericht N-34, Braunschweig (Juni 1998);
8. M. Herman, A. Trkov
ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII
Brookhaven National Laboratory Report BNL-90365-2009 Rev. 1, 2009.
9. The MathWorks Inc.,
MATLAB_ The Language of Technical Computing User's Manual, <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>, 2012.