ENERGETYKAz 23

TADEUSZ J. ŚWIERZAWSKI

BADANIA PRZESTRZENNEGO I ENERGETYCZNEGO ROZKŁADU NEUTRONÓW TERMICZNYCH w małym zestawie podkrytycznym z uranem i ciężką wodą



POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYT NAUKOWY Nr 176 – GLIWICE 1966

SPIS TRESCI

Str.

1.	WSTĘP	3
2.	OPIS URZĄDZENIA BADAWCZEGO	4
	2.1. Zestaw podkrytyczny	4
	2. 2. Reaktor doświadczalny MIT jako źródło neutronów	7
	2.3. Folie aktywacyjne	9
18	2.4. Urządzenia do pomiaru aktywności napromieniowanych folii	13
3.	WYKONANIE DOŚWIADCZEŃ	13
	3.1. Napromieniowywanie folii aktywacyjnych .	13
	3. 2. Pomiary aktywności folii	15
4.	METODY OBLICZENIOWE	18
	4.1. Energetyczny rozkład neutronów termicznych. Temperatura	
	neutronów	18
	4.2. Program obliczeniowy THERMOS	20
	4.3. Wyznaczenie temperatury neutronów w oparciu o wyniki	
	uzyskane przy uzyciu programu THERMOS	23
	4. 4. Wyznaczanie temperatury neutronow w oparciu o dane do-	20
_		23
Э,	OMOWIENIE WYNIKOW BADAN	50
	5. 1. Porownanie aktywności zmierzonych z wartościami obliczo-	50
	5.2 Perównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości tem-	00
	peratur neutronów	54
	5. 3. Wnioski	56
6.	OZNACZENIA	57
5	LITERATURA	5.8
υ.	LITERICITE	00

POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE Nr 176

TADEUSZ J. ŚWIERZAWSKI

BADANIA PRZESTRZENNEGO I ENERGETYCZNEGO Rozkładu neutronów termicznych w małym zestawie podkrytycznym z uranem i ciężką wodą

PRACA HABILITACYJNA Nr 57

Przewód habilitacyjny otwarto w dniu 29 września 1965 r. na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Fryderyk Staub

REDAKTOR DZIAŁU

Ryszard Petela

SEKRETARZ REDAKCJI

Tadeusz Matula

Dział Nauki — Sekcja Wydawnictw Naukowych — Politechniki Śląskiej Gliwice, ul. Konarskiego 23

Nakł. 100+175
Ark. wyd. 3,82
Ark. druk. 4
Papier offsetowy kl. III, 70x100, 70 g

Oddano do druku 24.11. 1966
Podpis. do druku 8.12.1966
Druk ukończ. w grudniu 1966

Zam. 2090
2.12
1966
A-18
Cena zł 5.-

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

1. WSTĘP

Zestawy podkrytyczne posiadają pewne zalety przy badaniu parametrów reaktora [13]. Są one mniejsze od zestawów krytyczmych i w związku z tym wymagają mniejszej ilości materiałów. Innymi zaletami są: brak skomplikowanego układu sterowniczego oraz ciężkich osłon, które są niezbędne przy budowie zestawów krytycznych o dużym strumieniu neutronów. Poza tym można w mich łatwo zmieniać stosunek ilości moderatora do ilości paliwa, co jest bardzo korzystne podczas przeprowadzania różnego rodzaju badań związanych z projektowaniem reaktorów jądrowych.

Od 1959 roku, na Wydziale Inżynierii Jądrowej w Massachusetts Institute of Technology prowadzony jest program badań i studiów nad zestawami podkrytycznymi z uranem i ciężką wodą [7]. Jedna z tych prac [12] dotyczyła badań mających na celu uzasadnienie możliwości stosowania małych (miniaturowych) zestawów podkrytycznych do pomiaru parametrów projektowanego reaktora. W pracy tej autor omówił zagadnienie poprawek na ucieczke neutronów z układu oraz poprawek na efekty źródła zasilającego zestaw podkrytyczny. Zajmował się on również wyznaczeniem optymalnego miejsca wewnątrz małego zestawu podkrytycznego, w którym można przeprowadzać pomiary parametrów reaktora bez popełnienia jakichś zasadniczych błędów. Przy projektowaniu niejednorodnych reaktorów jądrowych wymagana jest znajomość przestrzennego i energetycznego widma neutronów termicznych w jednostkowej komórce układu. Energia neutronów bowiem określa przekpoje czynne na reakcje neutronowe, a lokalny strumień neutronów, zależny zarówno od energii neutronów jak i od przestrzennego rozkładu neutronów, stanowi podstawę do obliczania współczynnike wykorzystania neutronów termicznych [17], jednego z parametrów określających krytyczność reaktora. W związku z badaniami rozkładu przestrzennego i energetycznego neutronów w dużych zestawach podkrytycznych [4], [3], [4], [5], [6], [14] nasunęło się pytanie jak przedstawia się to zagadnienie w ukła-dach miniaturowych. Zadaniem niniejszej pracy jest danie odpowiedzi na to pytanie.

Problem wyznaczania przesunięć energetycznego widma neutronów wewnątrz jednostkowej komórki niejednorodnego układu, znany pod nazwą rozkładu temperatury neutronów wewnątrz jednostkowej komórki reaktora, można rozwiązać na drodze teoretycznych rozważań w oparciu o rownanie transportu neutronow. Do tego celu można zastosować program obliczeniowy THERMOS [6], [9], [10] Inną drogą prowadzącą do rozwiązania zagadnienia są badania doświadczalne, w których wykorzystuje się zmienność przekrojów czynnych różnych pochłaniaczy wraz z energią neutronów [15], [19], [20]. Badania przeprowadzone na dużych zestawach podkrytycznych wykazują dobrą zgodność danych doświadczalnych z teoretycznym widmem neutronów, uzyskanym w oparciu o program THERMOS [3].

Tematem niniejszej pracy były pomiary przestrzennego i energetycznego rozkładu neutronów termicznych w cylindrycznym zestawie podkrytycznym o średnicy 20" (~51 cm) i wysokości 21" (~53 cm). Paliwem były prety wykonane z metalicznego uranu naturalnego o średnicy 1,01" (~2,57 cm), zamknięte w szczelnych osłonach aluminiowych, a moderatorem ciężka woda. Pręty paliwowe były ułożone w moderatorze w ten sposób, że tworzyły siatkę trójkątną o boku 4" (~10,16 cm). Zestaw podkrytyczny był zasilany neutronami pobieranymi z kanału doświadczalnego, którego ujście znajdowało się w sali terapii medycznej usytuowanej pod reaktorem MIT [16]. Do pomiarów użyto folii Au-197 (indykator 1/v), Lu-176 oraz Eu-151. Obliczenia rozkładu neutronów, w oparciu o program THERMOS, wykonano na cyfrowej maszynie matematycznej IBM-7090 w ośrodku obliczeniowym MIT. Obliczenia pomocnicze przy wyznaczaniu aktywności.nasycenia napromieniowanych folii oraz temperatury neutronów, oparte o dane doświadczalne, przeprowadzono na cyfrowej maszynie matematycznej ZAM-2 w Biurze Projektów Syntezy Chemicznej "Prosynchem" w Gliwicach.

2. OPIS URZĄDZENIA BADAWCZEGO

2.1. Zestaw podkrytyczny

Zbiornik zestawu podkrytycznego (rys. 1) miał średnicę D=20" (~51 cm) i wysokość H = 21" (~53 cm). Górne dno i pobocznica wykonane zostały z blachy aluminiowej o grubości 1/16"(~1,6 mm), natomiast odejmowane dno dolne z blachy aluminiowej o grubości 1/2" (~12,7 mm). Zbiornik zaopatrzony był w króćce rurowe o średnicy zewnętrznej 3/4", wykonane ze stali nierdzewnej, wraz z zaworami. Służyły one do napełniania zbiornika ciężką wodą oraz do wytłaczania ciężkiej wody za pomocą sprężonego helu, z powrotem do beczki. W zbiorniku mieściło się około 100 litrów D20 (o czystości 99,8%). Wewnątrz zbiornika znajdowały się dwie płyty nośne z odpowiednio nąwierconymi otworami, oddzielone od siebie prętami dystansowymi, służące do podtrzymywania prętów paliwowych. Pozwalały one na dowolne rozmieszczenie tych prętów wewnątrz badanego zestawu. Pręty paliwowe były wykonane z metalicznego uranu naturalnego o średnicy 1,01" i zamknięte w szczelnych osłonach z blachy aluminiowej (Al-1100) o grubości 0,0889 cm. Podczas badań w zestawie podkrytycznym znajdowało się 19 prętów paliwowych, tworzących siatkę trójkątów równobocznych o boku 4" (rys. 2). Zmontowany zestaw podkrytyczny spoczywał na drewnianym wózku umożliwiającym jego



Rys. 1. Obudowa zestawu podkrytycznego



Rys. 2. Fragment siatki paliwowej wraz z ramionami do podtrzymywania folii aktywacyjnych

transport na miejsce, w którym był napromieniowany neutronami z reaktora MIT.

2.2. Reaktor doświadczalny MIT jako źródło neutronów

Reaktor MIT [16] osiągnął stan krytyczny w lipcu 1958 r. Został on zbudowany w obrębie budynków Massachusetts Institute of Technology w Cambridge, w centrum Wielkiego Bostonu. Ze względu na lokalizację, w projekcie zwrócono szczególną uwagę na bezpieczeństwo reaktora.

Na rys. 3 przedstawiono przekrój reaktora MIT wzdłuż osi pionowej. Rdzeń reaktora składa się z 30 elementów paliwowych typu MTR, wykonanych z płyt U-235 zawalcowanych w aluminiowe osłony. Rdzeń umieszczony jest w złiorniku o średnicy 4 stóp i wysokości około 7 stóp. Ciężka woda, spełniająca rolę moderatora i chłodziwa, przepływa od dołu ku górze. Przestrzeń zbiornika nad zwierciadłem wody wypełniona jest helem, znajdującym się pod ciśnieniem atmosferycznym. Rolę reflektora spełnia warstwa ciężkiej wody o grubości 60 cm od góry i od dołu oraz 20 cm D20 i 60 cm grafitu na pobocznicy.

Pod reaktorem zbudowano pomieszczenie (sale) terapii medycznej. Przestronny kanał prowadzi wiązkę neutronów z reaktora do otworu w suficie sali. Ponieważ do zabiegów stosowano neutrony termiczne, dolny reflektor D2O spełniał również rolę moderatora. Zadaniem trójwarstwowej przegrody bizmutowej z okładkami aluminiowymi jest powstrzymywanie promieniowania gam-ma i odbieranie ciepła wydzielającego się na skutek hamowania tego promieniowania. Zamknięcie kanału składa się z trzech części. Najbliżej rdzenia znajduje się zbiornik wypełniany zwykłą wodą. Woda ta moderuje i pochłania większość neutronów pochodzących z rdzenia. Podczas wykonywania doświadczeń usuwa sie wodę ze zbiornika. Poniżej tego zbiornika umieszczona jest ruchoma zasuwa wykonana z boralu, pod nią grube zamknięcie ożowiane. Celem omówionego kanału doświadczalnego jest doprowadzenie strumienia neutronów termicznych rzędu 1010 n/(cm2sec), z tłem 107 szybkich neutronów/(cm2sec) i około 100 Rtg/h u wylotu kanału. Pomieszczenie pod reaktorem jest salą operacyjna z kompletnym wyposażeniem, wykorzystywaną przez kilka ośrodków medycznych Bostonu. W tej sali operacyjnej zostały przeprowadzone niżej opisane doświadczenia z miniaturowym zestawem podkrytycznym. Był on umieszczany na stole operacyjnym, a następnie napromieniowywany wiązką neutronów z kanału doświadczalnego.



2.3. Folie aktywacy.ine

Pomiarów rozkładu strumienia neutronów termicznych wewnątrz komórki elementarnej zestawu dokonano w oparciu o aktywację folii złota, lutetu i europu. Część tych folii znajdowała się w okładkach kadmowych. Przekrój czynny złota na pochłanianie neutronów termicznych podlega prawu 1/v. Folie wysokiej czystości złota, o średnicy 1/8" i 1/16", wycięte były z blachy o grubości około 0,002" (~0,05 mm). Czystość złota sprawdzano przez wyznaczanie połowicznego okresu rozpadu Au-198, który wynosi 2,7 dnia. Folie były wycinane przy użyciu specjalnego urządzenia zapewniającego dużą dokładność wykonania żądanych średnic oraz gładkie brzegi folii.

Lutet naturalny składa się z 2,6% Lu-176, który po napromieniowaniu strumieniem neutronów przechodzi w Lu-177 ($T_{1/2} =$ = 6,71 ds) oraz z 97,4% Lu-175, który w reakcji z neutronem daje Lu-176 m ($T_{1/2} =$ 3,7 h). Przekrój czynny Lu-175 podlega prawu 1/v, natomiast przekrój czynny Lu-176 odbiega znacznie od tego prawa. W badaniach brano pod uwagę tylko izotop Lu--176. Lutet Lu-176 charakteryzuje się maksimum rezonansowym przy 0,142 eV (rys. 4), co czyni aktywację lutetu czułą na zmiany energetycznego widma neutronów w obszarze energii termicznych (poniżej punktu gdzie widmo neutronów termicznych łączy się z widmem 1/E).

Europ zawiera 47,77% Eu-151, który po napromieniowaniu neutronami przechodzi w Eu-152 ($T_{1/2} = 9,2$ h; $\sigma_{act} = 1400$ barn) oraz 52,23% Eu-153, który w reakcji z neutronem daje Eu-154 ($T_{1/2} = 16$ lat, $\sigma_{act} = 420$ barn). Aktywacja Eu-153 jest więc nieznaczna w porównaniu z aktywacją Eu-151. Przekrój czynny Eu-151 na pochłanianie neutronów termicznych w przybliżeniu podlega prawu $1/v^2$ i posiada ostry rezonans przy energii 0,46 eV oraz nieco słabszy przy 0,321 eV (rys. 5). Zależność $1/v^2$ przekroju czynnego od energii neutronów sprawia, że aktywacja europu jest czuła na zmiany rozkładu energetycznego neutronów w zakresie energii termicznych. Ponieważ jednak rezonans europu znajduje się przy energii 0,46 eV, która praktycznie odpowiada energii obcięcia kadmowego (obcięcie kadmowe zazwyczaj przyjmuje się w granicach 0,4 do 0,5 eV), przeto istnieją pewne trudności związane z analizą danych doświadczalnych uzyskanych w oparciu o aktywację Eu. Zostaną one omówione w rozdziale 4.4.2.

Folie lutetu i europu były wykonane w następujący sposób: sproszkowany Lu₂O₃ lub Eu₂O₃ mieszano z glyptalem i po uzyskaniu jednolitej zawiesiny pokrywano nią (metodą natryskową) równomiernie blachę aluminiową o grubości O,005" (~ O,1 mm). Po wyschnięciu glyptalu wycinano z blachy folie o średnicy 1/8" oraz 1/16" i pokrywano je cienką, ochronną warstwą glyptalu. Oszacowano, że zawartość lutetu na foliach wynosiła około 10 mg/cm², a zawartość europu około O,2 mg/cm². Ze względu



względny przekrój ozynny



względny przekrój czynny

x



Układ zasilania wysokim napięciem BA/312A

Rys. 6. Schemat urządzenia do pomiaru gamma-aktywności folii na swą "rozcieńczoną" formę, folie lutetowe i europowe nie powodowały żadnych zakłóceń strumienia neutronów.

Po wykonaniu, wszystkie folie były kalibrowane. Kalibracja polegała na tym, że mierzono aktywności poszczególnych folii, które były napromieniowane uprzednio jednakowym strumieniem neutronów. Napromieniowywanie odbywało się w ten sposób, że folie układano na okrągłej tarczy, którą z kolei umieszczano w zbiorniku zestawu podkrytycznego, a następnie zalewano D₂O. Podczas napromieniowywania zbiornika tarcza była wprawiana w ruch obrotowy.

Okładki kadmowe, stosowane do pomiarów aktywności termicznych, wykonane były z blachy o grubości 0,023" (~0,6 mm). Okładki takie wykonuje się z dwu części: miseczki, o wewnętrznej średnicy równej średnicy folii oraz ściśle przylegającej, wtłaczanej do miseczki pokrywki, nakładanej na umieszczoną w miseczce folię.

2.4. Urzadzenie do pomiaru aktywności napromieniowanych folii

Schemat blokowy układu przyrządów do pomiaru aktywności gamma napromieniowanych folii przedstawiono na rys. 6. Układ ten był sprzężony z automatem służącym do zmiany badanych folii. Pomiar realizowano w ten sposób, że nastawiano pewną żądaną liczbę zliczeń, a układ piszący rejestrował na taśmie kolejny numer folii oraz czas zliczania.

3. WYKONANIE DOŚWIADCZEŃ

3.1. Napromieniowywanie folii aktywacyjnych

Celem wyznaczenia strumienia neutronów w moderatorze, centralny pręt paliwowy zaopatrzony był w aluminiowe (lub plastykowe) ramiona, prostopadłe do osi pręta, na których układano folie aktywacyjne (rys. 2). Folie umieszczano w wyfrezowanych specjalnie do tego celu wgłębieniach, a następnie całe ramię pokrywano szkocką taśmą celofanową. Taśma ta miała na celu zabezpieczenie folii przed spadnięciem z ramienia. W przypadku ciężkiej wody lepsze wyniki uzyskuje się stosując ramioną aluminiowe, gdyż powodują one mniejsze zaburzenie strumienia neutronów niż ramiona plastykowe. Wpływ taśmy celofanowej, zabezpieczającej folie, na strumień neutronów, można było pominąć [3].

Do wyznaczenia strumienia neutronów wewnątrz pręta uranowego używano również folii aktywacyjnych, które umieszczano w specjalnie wyfrezowanych wgłębieniach (rys. 2), na wysokości folii znajdujących się w moderatorze. Ułożenie folii wzdłuż linii spiralnej miało uchronić je przed wzajemnym ekranowaniem. Celem ochrony napromieniowywanych folii przed fragmentami rozszczepienia, podkładano pod nie cienką folię aluminiową, a przekrój poprzeczny pręta, na którym były układane folie, oklejano taśmą celofanową. Miała ona za zadanie przytrzymywanie folii aktywacyjnych oraz zabezpieczenie ich przed działaniem fragmentów rozszczepienia pochodzących z górnego odcinka pręta paliwowego.

Celem uniknięcia zaburzenia strumienia neutronów, folie okryte kadmem, napromieniowywane w tym samym czasie i na tym samym poziomie co i folie nie okryte kadmem, umieszczano na osobnych ramionach. Doświadczenia wykazały [5], że zaburzenie strumienia było niedostrzegalne w odległości około 1,5" od okładek kadmowych.

Po ułożeniu folii aktywacyjnych i zmontowaniu zestawu, który był poddany próbie szczelności, napełniano go ciężką wodą, przetłaczaną z beczki za powocą sprężonego helu. Ze względu na wysoki koszt ciężkiej wody, wymagana była absolutna szczelność zbiornika, w którym znajdował się zestaw podkrytyczny.

Zestaw podkrytyczny umieszczano wraz z drewnianym wózkiem na pneumatycznym podnośniku stołu operacyjnego, w odległości 40" (~1 m) poniżej sufitu, na którym znajdował się wylot kanału doświadczalnego (rys. 3). Zestaw otoczony był wysokim plastykowym ekranem z domieszką boru, który sięgał sufitu sali operacyjnej. Grubość tego ekranu wynosiła 1/3".

Ze względu na dużą ilość napromieniowywanych folii proces montażu zestawu oraz napromieniowywania powtarzano dwukrotnie. Czas napromieniowywania wynosił każdorazowo 60 min., a moc cieplna reaktora była w tym czasie utrzymywana na stałym poziomie 1,8 MW. Na górnej powierzchni zestawu strumień neutronów wynosił około 6.10⁸ n/(cm²sec).

Po ukończeniu napromieniowywania odcinano dopływ neutronów i zestaw pozostawiano w sali operacyjnej przez około 1,5 godziny celem zredukowania dawki promieniowania na jego powierzchni. Po tym czasie otwierano drzwi sali, demontowano osłony plastykowe i wywożonc zestaw do laboratorium, gdzie usuwano ciężką wodę, rozbierano cały zestaw i wyjmowano napromieniowane folie.

-suchasts drives attactive effective along a state restance at

3.2. Pomiary aktywności folii

Gamma-aktywności napromieniowanych folii mierzono na urządzeniu opisanym w rozdziale 2.4. Folie były umieszczane w magazynkach automatu w ten sposób, że co pewien czas było sprawdzane tło. Celem zachowania stałej geometrii przy pomiarze aktywności, folie były umieszczane na aluminiowych podstawkach, w wytłoczonych wgłębieniach. Przed umieszczeniem na podstawce folie były lekko smarowane wazeliną, by podczas przesuwania podstawek pod licznik nie uległy przesunięciu. Pomiar aktywności poszczególnych folii trwał tak d'ugo aż uzyskano 9000 lub 30 000 zliczeń (w zależności od aktywności badanej folii).

Podczas pomiaru aktywności folii złota dyskryminator analizatora amplitudy był tak ustawiony, by zliczane były tylko impulsy pochodzące od kwantów o energii 411 keV, stanowiących główny wkład przy rozpadzie Au-198 (rys. 7) i dających dostateczną liczbę zliczeń.

W przypadku europu, zamiast zliczać impulsy w jakimś pojedynczym maksimum promieniowania gamma, zliczano całkowitą liczbę impulsów pochodzących z całego widma energetycznego. Chodziło bowiem o to, by uzyskać maksymalnie możliwą aktywność. Podczas pomiaru podstawa spektrometru była nastawiona na około 80 keV, a więc nieco poniżej maksimum promieniowania gamma Eu-152, występującego przy 120 keV. Szerokość kanału nastawiona była na nieskończoność.

Ze względu na to, że lutet posiada dwa izotopy, (patrz rozdział 2.3), a należało badać aktywację izotopu Lu-176, więc wszystkie folie lutetu były przed pomiarem aktywności "chłodzone" przez okres czasu nie mniejszy niż 48 godzin. Widmo energetyczne promieniowania gamma lutetu Lu-177 posiada cały szereg maksimów (rys. 8). Podczas pomiaru podstawa analizatora została nastawiona na 45 keV, a szerokość kanału na nieskończoność.

Pomimo tego, że układ liczący posiadał wysoką klasę stabilizacji, co pewien czas korygowano "płynięcie" ustawionych zakresów.







Rys. 8. Widmo rospadu Lu-177 (T1/2 = 6,7 dni)

4.1. Energetyczny rozkład neutronów termicznych. Temperatura neutronów

W rezultacie procesu spowalniania, który polega na sprężystych zderzeniach neutronów z atomami moderatora, neutrony rozszczepieniowe tracą swą energię kinetyczną uzyskując stan równowagi energetycznej z atomami lub molekułami ośrodke, w którym się poruszają. Zachowanie się neutronów jest podobne do zachowania się molekuł gazowych, które znajdują się w równowadze przy pewnej temperaturze. Gdy zostaną uzyskane warunki równowagi termicznej, na podstawie teoretycznych rozważań można przypuszczać, że neutrony będą podlegały temu samemu rogkładowi energetycznemu co i molekuły gazu. Rozkładem tym jest rozkład Maxwella-Boltzmanna

$$\ln = n(\mathbf{v}) \, d\mathbf{v} = \frac{4\pi n_0}{(2\pi k T/m)^{3/2}} \, \mathbf{v}^2 \, \exp\left[-\frac{\frac{7}{2} m v^2}{kT}\right] d\mathbf{v} \qquad (1)$$

Krzywa opisana równaniem (1) posiada maksimum przy szybkości najbardziej prawdopodobnej

$$v_0 = \left(\frac{2 \ \text{kT}}{\text{m}}\right)^{1/2}$$
 (2)

dla temperatury $T_0 = 20^{\circ}C$ otrzynuje się v = 2200 m/seo. Dla tej szybkości tabelarymowane są przekroje czynne. Energia E_0 odpowiadająca tej szybkości wynosi

$$B_0 = \frac{1}{2} = v_0^2 = kT$$
 (3)

Równanie (3) wiąże energię neutronów z temperaturą. Temperaturę neutronów, odpowiadającą danej energii kinetycznej E ckreśla się z zależności

$$T_{ij} = \frac{E_{kin}}{k} = \frac{\frac{1}{2}mv_{0}^{2}}{k}$$
(4)

Natomiast średnią szybkość neutronów (obliczoną na podstawie zależności (1) określa równanie

$$\overline{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{0}}{\int_{\mathbf{0}}^{\infty} \mathbf{n}(\mathbf{v}) \, \mathrm{d}\mathbf{v}} = \mathbf{1}, 128 \, \mathbf{v}_{0}$$
(5)

Rozkład energetyczny neutronów w reaktorze nie odpowiada w zupełności rozkładowi Maxwella dla temperatury panującej wewnątrz reaktora. Temperatura neutronów jest nieco wyższa od



Rys. 9. Przesunięcie rzeczywistego widma neutronów w kierunku wyższych energii temperatury moderatora na skutek ciągżego dopżywu neutronów o wyższych energiach, pochodzących z rozszczepień oraz odpżywu neutronów termicznych, które są pochłaniane przez paliwo. Z tego powodu rzeczywiste widmo energetyczne neutronów jest nieco przesunięte w kierunku wyższych energii (rys. 9).

W przypadku reaktorów niejednorodnych, w których paliwo jest oddzielone od moderatora, temperatura neutronów zmienia się w znacznych granicach wewnątrz elementarnej komórki układu (przez elementarną komórkę należy rozumieć pręt pali-

należy rozumieć pręt paliwowy wraz z przynależną doń objętością moderatora). Oznaczając średnią szybkość w neutronów w punkcie r przez

$$\overline{\mathbf{v}}(\mathbf{r}) = \frac{\int_{0}^{\mathbf{v}^{*}} \mathbf{n}(\mathbf{r},\mathbf{v}) \ \mathbf{v} \ d\mathbf{v}}{\int_{0}^{\mathbf{v}^{*}} \mathbf{n}(\mathbf{r},\mathbf{v}) \ d\mathbf{v}}$$

(6)



oraz wprowadzając pojęcie zredukowanej względem 2200 n/sec szybkości neutronów v_r = v/2200, temperaturę neutronów w tym rozpatrywanym obszarze określimy zależnością

$$T_n = T_0 \left(\frac{\overline{v}_r}{1,128}\right)^2 \tag{8}$$

(7)

gdzie T_o = 293 ^OK. Zależnością (8) będziemy się posługiwali przy obliczaniu temperatury neutronów, korzystając z danych uzyskanych w oparciu o program THERMOS.

Należy tu zaznaczyć, że definioja temperatury neutronów jest dość dowolna. Można kwestionować, ozy podana wielkość ma w ogóle jakiekolwiek znaczenie w przypadku utwardzonego widma. Stosowane w niniejszej pracy pojęcie temperatury neutronów będzie można uzasadnić faktem, że obliczane widma energetyczne neutronów w dużym stopniu są podobne do rozkładu Maxwella oraz że temperatura neutronów zdefiniowana w podany sposób pozostaje w bezpośrednim związku ze średnim przekrojem czynnym pochłaniacza podlegającym prawu 1/v.

Temperature neutronów można wyznaczyć albo w oparciu o rozwiązania teoretyczne, albo też w oparciu o dane doświadczalne,

4.2. Program obliczeniowy THERMOS

Program THERMOS [9], opracowany w systemie automatycznego kodowania FORTRAN dla cyfrowych maszyn matematycznych IBM-704/ /709/7090, stanowi najlepszą ze znanych i najwygodniejszą metodę teoretycznego obliczania przestrzennych i energetycznych rozkładów neutronów termicznych w układach niejednorodnych. Program THERMOS został zbudowany dla rozwiązania metodą numezyczną całkowego równania transportu neutronów w płaskiej lub cylindrycznej geometrii komórki elementarnej, w ośrodku niezkończenie rozległym. W obliczeniach przyjęto model rozpraszania wg Browna 1 St. Johna [2]. Przyjęto płaskie źródła rozprasząnie w moderatorze i w uranie.

Załącznik 1

Podział nautronów na grupy energetyczne w programia THERMOS

Grupa 1	Szybkość średnia w grupie Vi	Szybkość maksymalna w grupie ^V int	Przedział szybkości v	Średnia energia w grupie E ₁ eV
1	0,1	0,15	0,1	0,00025
2	0,2	0,25	0,1	0,00101
3	0,3	0,35	0,1	0,00228
4	0,4	0,45	0,1	0,00405
5	0,5	0,55	0,1	0,00632
6	0,6	0,65	0,1	0,00911
7	0,7	0,75	0,1	0,01240
8	0,8	0,85	0,1	0,01619
9	0,9	0,95	0,1	0,02049
10	1,0	1,05	1,1	0,02530
11	1,1	1,15	0,1	0,03061
12	1,2	1,25	0,1	0,03643
13	1,3	1,35	0,1	0,04270
14	1,4	1,45	0,1	0,04959
15	1,5	1,55	0,1	0,05692
16	1,605	1,66	0,11	0,06517
17	1,72	1,78	0,12	0,07485
18	1,845	1,91	0,13	0,08612
19	1,98	2,05	0,14	0,09919
20	2,1285	2,195	0,145	0,11398
21	2,2775	2,36	0,165	0,13123
22	2,455	2,55	0,190	0,1525
23	2,66	2,77	0,220	0,1790
24	2,8975	3,025	0,255	0,2124
25	3,1725	3,32	0,295	0,2546
26	3,49	3,66	0,34	0,3081
27	3,855	4,05	0,39	0,3760
28	4,2725	4,495	0,445	0,4618
29	4,7475	5,00	0,505	0,5702
30	5,285	5,57	0,570	0,7067

W zestawieniu powyższym szybkości znormalizowane są względem 1,0 kT. Celem uzyskania wartości wyrażonych w m/sec, należy je pomnożyć przez 2200.

Załącznik 2

	Koncentracja atom/(barn om)													
Izotop	Mieszanina I (paliwo)	Mieszanina II (osłona Al)	Mieszanina III (moderator)											
J-235	3,45410E-04													
J-238	4,75920E-02													
A1-27		6,02750E-02												
D-2			3,31880E-02											
0-16			6,62250E-02											
H-1			1,50580E-04											
plarác leń	1,2,3,4,5	6	7,8,9,10,11, 12,13,14											

Skład izotopowy komórki elementarnej

Załącznik 3

Podział komórki elementarnej na koncentryczne pierścienie

0 árodek	Grubość cm	Punkt	Rcentr om	R wewa cm
paliwo	1,28000E 00	1	0	0
		2	2,84444E-01	1,42222E-01
		3	5,68889E-01	4,26667E-01
		4	8,53333E-01	7,11111E-01
		5	1,13778E 00	9,95556B-01
aluminium	8,890003-02	6	1,32445E 00	1,28000E 00
moderator	3,96160E 00	7	1,61650E 00	1,36890E 00
		8	2,11170E 00	1,85410E 00
		9	2,60690E 00	2,35930E 00
		10	3,10210E 00	2,85450 ± 00
		11	3,59730E 00	3,34970E 00
		12	4,09250E 00	3,84490E 00
		13	4,58770E 00	4,34010E 00
		14	5,03290E 00	4,83530E 00

Stosując program THERMOS, elementarną komórkę niejednorodnego reaktora, w interesującej nas geometrii cylindrycznej, można podzielić na 20 koncentrycznych pierścieni, a widmo neutronów na 30 grup energetycznych. Program pozwala na umieszczenie w nim 5 mieszanim o różnym składzie izotopowym, w dowolnym pierścieniu rozpatrywanej komórki, przy czym każda z tych mieszanim może zawierać 10 izotopów. Dane wejściowe i wyjściowe programu podawane są w następujących jednostkach:

szybkość	-	bezwymiarowa	odniesiona	do	2200 m/sec,
energia	-	#		đo	0,0253 eV,
temperatura	a -	н н		do	293,2 ^o K,
odległość - - atom/(ba:	- o	m, przekrój cm).	ozynny - bar	en,	konoentracj

W załączniku 1 podano stosowany w programie THERMOS podział widma neutronów na grupy enargetyczne. Obliczenia zawarte w niniejszej pracy dotyczą następujących granic energetycznych widma: $E^* = 0,194 \text{ eV}, 0,3389 \text{ eV}, 0,4179 \text{ eV}, 0,511 \text{ eV}$ oraz 0,7849 eV.

Przy wykonywaniu obliczeń związanych z niniejszą pracą, cylindryczną komórkę elementarną układu niejednorodnego podzielono na 14 koncentrycznych obszarów pierścieniowych. Podział komórki na pierścienie oraz inne dane wejściowe, z tym podziałem związane, przedstawiono w załącznikach 2 i 3.

Oprócz obliczania przestrzenno-energetycznych rozkładów neutronów, przy użyciu programu THERMOS można uzyskiwać inne cenne informacje. Przez oałkowanie przekrojów czynnych materiałów pochłaniających neutrony, po obliczonych rozkładach energetycznych, uzyskuje się rozkłady przestrzenne aktywności dowolnych pochłaniaczy wewnątrz komórki elementarnej. W rozdziałe 5.2 zostaną porównane wartości aktywności zmierzonych z aktywnościami obliczonymi.

W oparciu o obliczone rozkłady można przy użyciu programu THERMOS również wyznaczać średnie szybkości neutronów, strumienie neutronów, gęstości neutronów, przekroje czynne. energie oraz inne parametry w poszczególnych obszarach komórki elementarnej, przy różnych energiach obcięcia widma, aż do 0,785 eV włącznie.

4.3. Wyznaczenie temperatury neutronów w oparciu o wyniki uzyskane przy użyciu programu THERMOS

W wyniku obliczeń przeprowadzonych przy zastosowaniu programu THERMOS uzyskano rozkłady energetyczne neutronów w każdym wydzielonym pierścieniu elementarnej komórki zestawu podkrytycznego oraz średnie wartości szybkości neutronów V_r

w każdym z tych rozkładów, przy założeniu różnych wartości granio energetycznych E* (załącznik 4 i 5).

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykresy energetycznych rozkłażów neutronów termicznych w osi pręta paliwowego w osłonie aluminiowej (pierścień 6) oraz na krawędzi

8 -

ZaZąosnik 4

ROZKLAD PRZESTRZENNO-EMERGETICZNY NEUTRONÓW²³) WIZNACZONY PRZY UŻYCIU PROGRAMU THERMOS

	t-	-						_			-		_							_					_						
	4 1	1 3287B-02	5 0326B-02	1 0687E-01	1 8411E-01	2 6868E-01	3 540 9R-04	- 20 0 CE	4 97 OR-OH	5 43098-04	5 6713B-01	5.69608-04	5 52168-01	5.18358-01	4.724JE-01	4,1889E-01	3.59628-01	2 9578B-01	2 3237B-01	1 7467B-01	1.26743-01	B. 8569E-02	5 9797B-02	4 0114E 02	2 78828-02	2,02918-02	4 RECAR_M	1 20058-02	8 9790E-03	6 51 81 B-03	4,3626E-03
	9	8. 5096E-03	3,60008-02	8,30408-02	1.46488-01	2,2032B-01	2.9694R-01	3.69372-04	4.3050E-01	4.75588-01	5, 01 87 8-01	5.08068-01	4 96318-01	4,6932B-01	4,2992E-01	3,84331-01	3.31188-0	2,73868-01	2,16378-01	1,6319E-01	1,1876E-01	8.3280E-02	5.64068-02	3,7921B-02	2 6429B-02	1,92478-02	4.4690E-00	1.14858-02	8,6717B-03	6,3226B-03	4 , 2 84 8E-03
	5	2.5844B-03	1 8391E-02	5,2009B-02	1 0251B-01	1 6559E-01	2 3421E 01	3 01948 01	3 6157R 01	082.08-01	1.3798E-01	4 5012E 01	4 492B-01	4 2506E-01	3 9313E-01	3, 5297E-01	3.06728-01	2, 55238-01	2,02758-01	1,53848-01	1,12658-01	7.9300E-02	5,390 E-02	3,63338-02	2, 53838-02	1, 8427B-02	4.4122R-00	1.11838-02	8,49193-03	6 21948-03	4,27432-03
RSCIEN	4	6,3520B-04	8,45868-03	3,06168-02	6,8914E-02	1 • 2 091 E-01	1.8091E-01	2.42538-01	2.9907E-01	3.4560B-01	3,77738-01	3.9396E-01	3,9437B-01	3, 8096E-01	3,553 BE-01	3,21618-01	2 BH 428-01	2,3557B-01	1, 8832E-01	1,43838-01	1, 0077916-U1	7 4779B-02	5 1033E-02	3 449BE-02	2,41588-02	1,75228-02	1.34498-02	1.07808-02	8,24993-03	6,07038-03	4,22082-03
PIR	2	2 1962B-04	4,7677B-03	2 1086E-02	5 2566B-02	9,80268-02	1. 5262B-01	2.1047E-01	2.64768-01	3 1083B-01	3,4372B-01	3.62348-01	3,6571E-01	3,55748-01	3,33878-01	3,03658-01	2,6697B-01	2,24,508-01	, 801 0B-01	1,38008-01		7,2177B-02	4,9381B-02	3,34488-02	2,34658-02	1,7005E-02	1.30688-02	1,05568-02	8,1189E-03	5,9912E-03	40-1372K-03
	2	1,0607E-04	3,27068-03	1 67 04 E-02	4,46148-02	8,6527E-02	1.38138-01	1 93 99E-01	2 721E-01	2 9253B-01	3,2567B-01	3 4524B-01	3, 502 1B-01	3 4233E-01	3 22 45-01	2 94138-01	2 5927E-01	2 18568-01	1 727 88-01	1 247416-01	20-310/2 2	7, 07905-02	4, 8490B-02	3,2901B-02	2,31018-02	1.6733E-02	1 28728-02	1 0143E-02	8. 0547E-03	5 9535E-03	4 10975-00
	-	5,6599B-05	2,7789E-03	1 97149E-02	4 1090K-12	8,2234E-02	1.3268E-01	1.8759E-01	2,40468-01	2,8501E-01	3,1873E-01	3 38798-01	3 4433B OI	3 37218-01	3 1806E 01	2 YU49E-U1	2. 563 B-01	2 16328-01	1 74126-00	10-215/C	20-32260 6	7,02898-02	4 8174B-02	3 26838-02	2 2955B-02	1 66478-02	1.2803B-02	1,04048-02	8,03382-00	0-31276-C	C0-9460164
Gruna	-	-	2	٦.	et (n	9	7	00	6	10	11	12	.	4 1	CL	10	17	20 0		D V	21	22	ເລີ	24	25	26	27	8 6		2

Tartofol podano w sapisie ze sujennym przeoinkiem: 5,9423E-03 = 5,9423.10⁻³

Zalaosnik 4 (oda)

[]]]

	11						
	14	1,99668-02 7,71458-02 1,64268-01 2,71368-01 2,71368-01 3,86848-01	4,99168-01 5,97978-01 6,74808-01 7,45728-01	7,382.68-01 7,065.08-01 6,551.68-01 5,952.98-01 5,17898-01	4,400 B O 3,58058 O 2,78218 O 2,06808 O 1,48368 O	1,02508-01 6,83678-02 4,531448-02 3,11108-02 2,24898-02	1,70338-02 1,29098-02 9,49698-03 6,80898-03 4,44048-03
	6	1,98148-02 7,66058-02 1,63048-01 2,69088-01 3,83558-01	4,94898-01 5,92548-01 6,68928-01 7,18478-01 7,39218-01	7,32058 01 7,00418 01 6,49578 01 5,85628 01 5,13908 01	4,36508-01 3,55328-01 2,76198-01 2,05318-01 1,47428-01	1, 01 888-01 6,79608-02 4,50178-02 3,09638-02 2,23998-02	1,6550E-02 1,2860E-02 9,4724E-03 6,7959E-03 4,4314E-03
	12	1,94958-00 7,53608-00 1,60408-00 2,64608-00 3,76988-01	4, 864.08-01 5, 82 808-01 6, 57 818-01 7, 26598-01 7, 27178-01	7,20628-01 6,90918-01 6,40338-01 5,77138-01 5,77138-01	4,3051E-01 3,5060E-01 2,7274E-01 2,0283E-01 1,4564E-01	1,0071E-01 6,7257E-02 4,4635E-02 3,0698E-02 2,2210E-02	1,68418-02 1,27838-02 9,42068-03 6,76378-03 4,41858-03
RSCIB	11 11 11	1,90338-02 7,34728-02 1,56218-01 2,57608-01 2,57608-01	4,74288-01 5,68578-01 6,42348-01 6,90688-01 7,11278-01	7,05078-01 6,75348-01 6,27268-01 5,65868-01 4,97218-01	4,22818-01 3,44368-01 2,68078-01 1,99598-01 1,43478-01	9,93118-02 6,63758-02 4,40968-02 3,03738-02 2,19968-02	1,66888-02 1,26878-02 9,36118-03 6,72868-03 4,40378-03
P I	10	1 83928-02 1 83928-02 1 50458-01 2 48498-01 3 54358-01	4,57918-01 5,49618-01 6,21588-01 6,69158-01 6,90138-01	6,84998-01 6,56868-01 6,70298-01 5,51448-01 4,84808-01	4,12858-01 3,36778-01 2,62328-01 1,95518-01 1,40718-01	9,7544E-02 6,5316E-02 4,3460E-02 2,9977E-02 2,1740E-02	4, 39008-03 4, 39008-03
	6	1 74.928-02 6 70078-02 1 42278-01 2 35208-01 3 36348-01	4,35798-01 5,24178-01 5,94358-01 6,41118-01 6,62308-01	6,58938-01 6,33148-01 5,89508-01 5,32978-01 4,69298-01	4,0024E-01 3,2702E-01 2,5529E-01 1,9057E-01	9,54338-02 6,40158-02 4,26818-02 2,95028-02 2,95028-02 2,14228-02	1,6299E-02 1,2458E-02 9,2303E-03 6,6553E-03 4,3794E-03
		1,61988-02 6,15488-02 1,30908-01 2,17448-01 2,12468-01	4,06638-01 4,91398-01 5,59278-01 6,05738-01 6,28058-01	6 26478-00 6 03688-00 5 63878-00 5 11398-00 5 11398-00 4 51418-00	3,85738-01 3,15868-01 2,47168-01 1,85038-01 1,33748-01	9,3084E-02 6,2614E-02 4,1860E-02 2,9015E-02 2,1093E-02 2,1093E-02	1,6080E-02 1,2345E-02 9,1770E-03 6,6337E-03 4,3897E-03
	er u pa	するうゆき	م <i>د</i> هون م	19045	078800	555535 555553 555553 55555 55555 55555 55555 55555 55555 5555	26 28 29 30

komórki elementarnej (picrścień 14). Zależności te przedstawiono na rys. 10 i 11. Z rysunków widać, że widmo neutronów termicznych jest najtardziej twarde w osi elementu paliwowego, oc jest zgodne z rzeczywistością gdyż w paliwie neutrony termiczna są bardzo intensywnie pochłaniane, a każdemu pochłonięciu towarzyszy generacja neutronów szybkich. Na brzegu komórki elementarnej natomiast widmo jest najbardziej zbliżone do widma Maxwella.

Załącznik 5

Plankolah	E [*] eV													
. 10150101	0,19412	0,33891	0,41498	0,51119	0,78493									
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1,34904 1,34413 1,3210 1,31086 1,27663 1,24102 1,21913 1,20335 1,19581 1,19581 1,19127 1,18855 1,18855 1,18595 1,18595	1,41027 1,40477 1,39132 1,36767 1,32974 1,29057 1,26619 1,24818 1,23387 1,23387 1,23052 1,22838 1,22722 1,22679	1,43229 1,42653 1,41245 1,38774 1,34822 1,30752 1,28212 1,26317 1,25377 1,24797 1,24436 1,24205 1,24029	1,45465 1,44860 1,43382 1,40792 1,36664 1,32430 1,29773 1,26782 1,26782 1,26163 1,25774 1,25525 1,25386 1,25331	1,49606 1,48940 1,47316 1,44482 1,39995 1,35428 1,32533 1,30336 1,29227 1,28532 1,28091 1,27806 1,27642									

Wartości v dla różnych oboięć energetycznych E* według programu THERMOS

Metoda wyznaczania temperatury neutronów polega na zastosowaniu zależności (8), w której figurują wyznaczone przy użyciu programu THERMOS wartości $\overline{\mathbf{v}}_{\cdot}$. Z rys. 11 wynika, że przejśnie maxwellowskiego rozkładu energetycznego w rozkład określony prawem 1/E występuje w przedziale od 0,2 do 0,25 eV. Ponieważ pojęcie temperatury jest ściśle związane z rozkładem Maxwella, przeto interesować nas będą wartości szybkości średnich $\overline{\mathbf{v}}_{\mathbf{r}}$ obliczone dla widma o energii obcięcie $\mathbf{E}^* = 0,232$ eV. Energia ta odpowiada górnej granicy całkowania \mathbf{v}_{int} dla 24 grupy energetycznej w programie THERMOS (patrz zał. 1). Należy zaznaczyć, że powyżej energii 0,232 eV maxwellowski skład do widma energetycznego neutronów jest nieznaczny i może być w rozważaniach pominięty.

Ponieważ w obliczeniach nie przewidziano granicy energetycznej widza przy 0,232 eV, wobeć tego wartości v_r dla tej energii obcięcia wyznaczono przez interpolację, posługując się



Rys. 10. Widms energetyczne neutronów termicznych obliczone przy użyciu programu THERMOS



Rys. 11. Widma energetyczne neutronów termicznych obliczone przy użyciu programu THERMOS

danymi z załącznika 5. W zestawieniu i podano obliczone w ten sposób szybkości neutronów \overline{v}_{μ} oraz odpowiednie wartości

temperatur neutronów obliozonych w oparciu o równanie (8). Zależność tej temperatury neutronów od promienia elementarnej komórki badanego zestawu podkrytycznego przedstawiono na rys. 21 (rozdz. 5.2).

Zestawienie 1

Temperatury neutronów obliozone przy użyciu programu THERMOS $(E^{*} = 0.232 \text{ eV})$

?ierścień podziałowy	₹ _r	Tn °C
	2	3
1 2	1,367	156,8 153,9
3 4 5	1,350 1,326 1,291	146,4 131,8 110,7
6	1,255	89,6 77.4
89	1,217	67,8 63,4
11	1,204	60,5
13 14	1,198	58,1 57,0

4.4. Wyznaozanie temperatury neutronów w oparciu o dane doświadczalne

4.4.1. Ogólne podstawy metody Westcotta

Metoda Westcotta opiera się na istnieniu zróżnicowanych zależności przekrojów czynnych od temperatury. Efektywny przekrój ozynny & został zdefiniowany przez Westcotta [20] jako taki, który pomożony przez całkowitą gęstcóć neutronów n(v) (z widma Maxwella-Boltzmanna i epitermicznego) i przez standardową szybkość 2200 m/sec, da na wynik tę część nukleonów, które wejdą w określonego typu reakcję z neutronami, w jednostce czasu. Wartcść & jest więc efektywnym przekrojem czynnym dla strumienia neutronów o szybkości v =2200 m/sec. Na podstawie tej definicji można więc napisać zależność

$$\hat{\sigma} = \frac{\int_{0}^{\infty} n(\mathbf{v}) \hat{\sigma}(\mathbf{v}) \mathbf{v} \, d\mathbf{v}}{\mathbf{v}_{0} \int_{0}^{\infty} n(\mathbf{v}) \, d\mathbf{v}}$$
(9)

Westcott wyraża wartość ở w postaci sumy dwu ozłonów

$$6 = 6_{2200} (g + rs)$$
 (10)

Współczynniki Westcotta g oraz s, różne dla różnych reakcji neutronowych, są funkcjami temperatury i zostały stabelaryzowane [20].

Współczynnik g wyraża zachowanie się przekroju czynnego w obszarze makswellowskim widma, natomiast współczynnik s wyraża zachowanie się przekroju czynnego w obszarze rezonansowym i jest ściśle powiazany z epitermiczną całką rezonansową. Dla pochłaniaczy, których przekroje czynne podlegają prawu 1/v można przyjąć g = 1. Wartość r uwzględnia stosunek gęstości neutronów epitermicznych do całkowitej gęstości neutronów w rozpatrywanym układzie i musi być zmierzona lub obliczona dla każdego punktu rozpatrywanej przestrzeni.

Istnieją pewne ograniozenia stosowalności metody Westcotta. A oto one:

1. Dokladność tej metody jest zadowalająca jedynie w przypadku układów, w których neutrony są dobrze zmoderowane, gdyż w przeciwnym razia nie wolno przedstawiać widma energetycznego neutronów w postaci kombinacji widma makswellowskiego oraz widma 1/E.

2. W przypadku bardzo twardego widna, jak na przykład wewnątrz pręta paliwowego, obszar termiczny widna może być tylko z grubym przybliżeniem traktowany jako równoważny rozkładowi Maxwella-Boltzmanna.

3. Stabelaryzowane współczynniki g oraz s są ważne dla nuklidów znajdujących się w stanie nieskończenie rozcienczonym, gdy nie występuje wzajemne ekranowanie poszczególnych atomów przed neutronami termicznymi oraz epitermicznymi.

4.4.2. Obliczanie aktywności napromieniowanych folii

Celen uzyskania porównywalnych aktywności napromieniowanych folii, należy wprowadzić do uzyskanych zliczeń N pew-

Zalacentk 6

XTHIKI POMIARÓW I OBLICZER AKTYWHOŚCI NASYCENIA 6.1 aktywności słot X= 1.7826.10⁻⁵ min⁻¹ I = 60 min

UWARI	13	Folie 1/16%, na remientu piastykowym, Folie 1.5 5 pokryte Cd 14 i 15 55 pokryte Cd	Print 1/8" print plas- print plas- print plas- print for t/8"	Folie 1/6" 26
Ɓ _s ∎1/#1n	12	536 461 5719 477 525 473 525 473 1565 1565 1565 1565 1557 1555 1555 1555	752 863 863 863 863 863 863 875 777 763 763	4725 4725 4725 4725 5755 5755 5755 5755
sl/min	11	49948 42765 42765 48373 48373 48373 433534 43539 43539 435294 154818 154818 154666 1548347 1483473 1483473	132892 146135 146135 151095 151095 133908	224910 2970500 288713 288713 285878 270507 891781 997708 1083990
J ₀ (02 F)	10	0,95884 0,99062 0,99075 0,99979 0,98979 0,98432 0,94536 0,94536 0,94536 0,94536 0,95888 0,958888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,958888 0,95888 0,95888 0,95888 0,958888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,958888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,95888 0,9588888 0,958888888 0,9588888 0,958888888 0,05888888888888888888888888888	0,9250 0,9250 0,9928 0,9928 0,9928 0,9250	0,993.90 9,999.90 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,9000 9,90000 9,90000 9,90000 9,90000 9,900000000
U	Ch	1,0000 		
A	2			000000000000000000000000000000000000000
B+A ^X) Elion.	7	13,16		
H B+AX) slice. Elice.	b 7	91.21		
T BHAY	5 6 7	23,86 9000 13,16 29,36 9000 13,16 28,40 8,10 9,10 9,40 9,40 9,40 9,40 9,40 9,40 9,40 9,4	35,20 35,20 36,34 36,34 36,84 36,946	2000 11 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 200 2000000
t C N B+4 ^{X)}	4 5 b 7	1900,31 23,86 9000 13,16 1924,37 29,36 9000 13,16 1993,93 259,39 26,07 29,36 9000 13,16 2009,93 24,07 2004,72 28,40 2008,33 8,10 2008,33 8,10 2107,11 9,10 2107,11 9,10 2125,65 8,45 2125,65 8,45 2125,55 8,55 8,55 2125,55 8,55 8,55 2125,55 8,55 8,55 2125,55 8,55 8,55 8,55 2125,55 8,55 8,55 8,55 8,55 8,55 8,55 8,55	2519,71 2519,64 25599,64 2620,18 2620,18 2650,18 2650,18 2650,18 2659,18 2659,18 2659,18 26,81 26,91 2	27722, 8 14,07 2773,645 15,95 2773,645 15,95 2802,28 16,39 2802,97 47 2802,93 2802,93 4,73 2802,93 4,73 2802,93 4,73 5,26 4,45
R t T R H RIJOE	3 5 5 b 5	47,24 1900,31 23,86 9000 13,16 102,35 1924,37 29,36 9000 13,16 170,87 1924,37 29,36 9000 13,16 170,87 1983,93 25,35 93,35 29,39 17,77 1983,93 22,53 93,35 24,07 29,37 2009,93 22,4,07 28,4,07 34,97 39,37 2004,20 28,4,07 36,10 31,950 31,950 2002,33 8,10 28,40 31,950 31,950 2003,42 28,40 36,10 31,950 31,950 2098,62 8,29 9,07 31,950 319,50 2116,641 9,07 39,07 39,07 319,50 2116,641 9,07 39,07 39,07 319,50 2116,641 9,07 39,07 39,07 319,50 2116,641 9,07 39,07 30,07 319,50 2116,641 9,07 30,07 30,07	66,99 2519,71 35,30 66,99 2519,71 35,30 119,69 2589,64 30,34 119,69 2589,64 30,34 119,69 2569,18 29,87 47,24 2650,18 29,87 66,99 2669,18 29,81	17,77 2722,18 14,07 78,724 2732,645 14,07 110,24 2772,60 21,950 2792,28 15,39 62,957 77,74 20,34 17,75 2827,47 5,26 23,52 2832,93 4,73 23,52 2832,93 4,73 29,377 2837,86 4,45
runmer R t C N BHAN		76 47,24 1900,31 23,86 9000 13,16 80 102,35 1925,935 29,36 9000 13,16 81 172,35 1925,935 259,39 86 9000 13,16 83 23,62 2009,93 26,021 23,86 9000 13,16 85 39,37 2009,93 26,021 28,40 26,521 13,16 85 39,37 2009,93 24,07 28,40 26,51 26,52 28,40 199 53,170 2009,93 28,40 20,00 13,16 27,32 22 53,120 2009,92 28,40 20,00 27,32 28,40 22 53,120 2009,62 28,40 20,00 27,32 28,40 22 78,712,80 9,07 9,07 28,65 39,40 27,32 23 39,512 213,4,54 9,07 20,44 9,07 20,33 23 39,512 213,4,54 9,	77 5,90 2,319,71 3,53 0 79 86,61 34,53 34,53 0 79 86,61 34,53 34,53 0 84 31,50 25620,18 29,87 35,33 86 47,24 2650,18 29,87 34,77 88 64,30 2563,18 29,87 86 88 64,30 2563,18 29,87 86 88 64,99 2563,18 29,87 86 87	65 177,77 67 18,95 67 110,24 2777,74 20,34 67 110,24 20,37 20,37 20,57 20

Symbol A dotycsy tylke lutetu 1 jest aktywnością szczątkową folii (za skutek użycia jej po raz drugi do aktywacji)

Zažacenik 6 (ed.

1												
42	6126 6032	5692	6235	6626 6626 6780	£18 302	962	3751	2694 2694 2774	2914 2911 3127	2422	2364 2789 2852	2947
11	1059919	984864	1078796	1119087 1146431	387.85	280300	354962	426034 465516 479499	503619	418266 542663	408339 482086 492936	509346
10	0 9432	0 9928	0,9584	0,8841	0,9998	02666 0 19666 0	0,9970	0,9928	0,9696 0,9584 0,9250	0, 9062	0,9897 0,9897 0,9805	0,9584
6	1,0000											+
-0	1,0071	0080	1,0080	1 0075	1,0005	0000	1,000.5	00034	1,0035	0 000	1,0027	1,0034
	13,16											-
Q	3 0000				9000		-	3 0000				-
5	4°968	4 4 9 90	4,55	4 76	28,47	26,70	3,49	11,08 10,18 9,93	9,67 9,81	10,85	11,73 10,01 9,90	9,82 10,87
-	2842,51 2847,39	2858,14	2867,90	2877, 33 2882, 29 2887, 41	1747,92	1807,24 2147,81 2152,40	2156,79	2892,78 2904,06 2914,41	2924 57 2934 44 2944 45	2966 83	2977,88 2989,81 3000,02	3010,12
	75,12 70,87	19,67 31,50	47,24	78,74 94,49 110,24	4, 08 8, 16	12,24 4,08 8,16	10,24	17,75 19,69 23,62	39,37 47,24 62,99	102,36	17.75 23.62 31,50	47,24
2	14	64	53	52	601	101	12	110	5340	26 26	29 29 30	32
-	100	146	36	800	41	4 4 4 0 4 6	46	4 4 K	225	22	520	59

Zalacenik 6 (od.)

6.2 aktywności lutetu X= 7,1695.10⁻⁵ min⁻¹; T = 60 min

2		20	8	4 £	23	oð	ι	61		q	4	r	•d	[#]	[6	ንፑ	[0	F	
		1	n Ţ	u e	70	81	c	60		8/	4	• 10	12	103		8	9	a Q	
12	534	612	609	ຄີ	566	642	613	367	398	394	441	644	27	103	119	97	124	133	
11	4 83 07 5 4 92 4	54005	55042	56701	51107	57501	55396	32284	35079	34698	38554	39656	1319	1437	1656	1265	1607	1668	
10	0,9928	0,9584	0,9062	0,8075	0,9928	0,9696	0,9062	1,0000	9666 0	0.9938	0 9980	0.9970	0 9991	0,9984	0.9975	0,9936	0,9432	0,8075	
6	1,1100 0,8090	1,1520	0,9733	C 3593	0,9572	0,9575	1.0630	1,0070	0,9584	1.0430	0.7474	1,1850	1,0920	1,0000	0.9410	0.9457	0.9050	0,8524	
80	1,0005											-		1,0000	_			-	
1.	16,62 15,78	16,71	16,24	16,19	16.19	16,17	16.47	16,33	16,19	16.41	15,62	16,82	16,58	16,29	16.14	16.17	16,04	15,92	
9	0006										-		8600	006				-	
2	49,17	44,57	54.10	59,45	54.49	50,21	50.27	78,36	76,62	72.16	88, 81	57, 82	414,12	44,12	43.74	46.02	45,20	46,95	
4	4415,67 4465.04	4524,63	4569,40	4623,70	4683,35	4738,04	4788.45	4838,92	4917,48	4994.30	5066,66	5155.67	5213,69	5628,01	5672.33	5716.27	5762.49	5807,89	
2	19,69	47,24	70,87	102,36	15,69	76,96	70.87	00.00	5,12	7.62	10,38	12.17	6,60	8,76	11.43	18,54	55,12	102,36	
2	6 0	++	12	13	14	18	20	4	5	9	2	00	-	2	m	13	16	17	
* -	- 0	3	-4	5	9	2	00	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
		-	-	-		-	-		-	_	-		-						

	Foldson 1/8° na Al, pr- Al, pr-
	440 462 493 514 494
	41181 42825 46021 48023 46479
. aktywnodol europu 5.10 ⁻³ min ⁻¹ , T = 60 min	0 9991 0 9984 0 9805 0 9250
	0 8360 0 4930 0 7346 0 7521 1 4080
	00008 00007 00007 00009
	46
6°3 λ= 1,255	0706
	18,46 20,37 20,37 19,29 11,80
	1229,00 1247,66 1278,23 1298,43 1317,92
	6 60 8 76 31 43 31 50 62,99
	58484
	+0104m

Z Zaconik 6 (od.)

_				
13	ortate uin VJ.	etmer en "8 g C ob 1 .0	Cq Folle L. Bolle 1/8	8/1 ello enozozseinu tiuen.murie
12	523 4691 5458 4446	4993 5087 5075 3998	4803 5256 5536 5862 5408 6068	3366 3726 3831 4175 4368
44	49180 46179 43624 50876 769263	863934 1938411 880062 877962 691763	83 0952 9184 05 909562 956677 1014 054 936 041 1049738	581927 643952 662142 722069 755305
10	0, 8352 0, 9939 0, 9581 0, 8841 0, 9928	0 9805 0 9584 0 9250 0 8841	0 9697 0 9696 0 9624 0 9062 0 8605 0 8605 0 8675	1,0000 0,9995 0,9988 0,9980 0,9980
6	1 6693 1 2520 0 747 0 7771 1 0000	1,0500 0,5696 0,9244 0,9431 1,2620	0.9012 0.8311 1220 8656 0.7466 1.5300 9153	0,8199 0,5835 0,64,62 0,804; 0,7507
8	1,000 1,00000000	1,0090 1,0070 1,0070 1,0085	0058	1,0040 1,0030 1,0035
7	13,46		13.16	
9	90006 30000 E			
5	10,59 12,78 23,65 21,98	\$0.94 \$0.94 \$0.94 \$0.94 \$0.95 \$00\$0\$0\$0\$00	10000000000000000000000000000000000000	8,23 10,56 9,41 7,27
4	1329, 92 1340, 71 1377, 54 1377, 54	1646,07 1650,39 1654,08 1659,19 1664,47	1668,99 1674,27 1679,59 1683,76 1689,07 1695,19	1704, 42 1712, 85 1723, 61 1733, 22 1740, 45
		and the second se		
	94,49 1775 4775 194,69	31, 50 47, 24 62, 99 78, 74 17, 75	23 52 39 39 55 12 55 12 55 12 55 12 55 12 118 118 118 118	0,00 5,12 7,62 12,17
2	66 94,49 68 17775 70 47775 72 78724 72 78724 19,69	38 34 50 40 47 56 42 62 99 44 78 74 46 78 74	48 23 62 50 39 39 54 75 12 56 61 56 61 118,111	6 00 7 7,62 8 7,12 12,12 12,17 8

ne poprawki. W rezultacie uzyskuje się wyrażenie określające tzw. aktywność nasycenia w nieskończenie rozległym ośrodku

$$\dot{A}_{g} = \left(\frac{N}{T} - \dot{B}\right) \frac{D e^{\lambda t}}{(1 - e^{-\lambda T})(1 - \frac{\lambda T}{2}) C J_{o}\left(\frac{2.405 r}{R_{off}}\right)}$$
(11)

Człon J_o(2,405 r/R_{ef}) normalizuje aktywności do wartości w układzie nieskończonie rozległym.

Wyniki pomiarów (dane wejściowe do obliczenia aktywności nasycenia) przedstawiono w załączniku 6. Obliczone przy użyciu cyfrowej maszyny matematycznej ZAM-2 aktywności nasycenia poszczególnych folii, wraz z odchyłkami

$$\Delta \dot{A}_{g} = \sqrt{\left(\frac{N}{T} - \dot{B}\right)} \frac{D e^{\lambda t}}{(1 - e^{-\lambda T})(1 - \frac{\lambda T}{2}) C J_{o}\left(\frac{2.405 r}{R_{of}}\right)}$$
(12)

zamieszozono w załączniku 6 oraz pokazano na wykresach (rys. 12, 13 1 14).

Na podstawie zmierzonych epitermicznych aktywności A epi folii okrytych kadmem oraz oałkowitych aktywności A_T folii bez pokrycia kadmowego uzyskiwano dla lutetu i złota aktywnośoi termiczne A_{th}, korzystając z następującej zależności

$$A_{\rm th} = A_{\rm epi} \tag{13}$$

Do obliozania wartości A_{th} brano dane z krzywych ciągłych przedstawionych na rys. 12 113. Wyniki obliczeń przedstawiono w załączniku 7. Aktywności teruiczne określone zależnością (13) spowodowane są neutronami o energiach leżących poniżej energii obcięcia kadmowego, którą przyjmuje się w zakresie 0,4 eV do 0,5 eV. Najbliższą energię obcięcia w programie THERMOS jest 0,415 eV. Energia ta będzie brana pod uwagę przy porównymaniu teoretycznych i doświadczalnych aktywności lutetu i złota (rozdz. 5.1).

W przypadku europu należy stosować bardziej skomplikowaną metodę postępowania. Współczynaiki Westcotta s dla europu nie są pawne ze względu na niepewność w pomiarach epitermicznej całki rezonansowej europu. Europ posiada bowiem rezonans dla neutronów o energii 0,46 eV (rys. 5). Energia ta jest zbliżona do ogólnie przyjętej energii obcięcia kadmowego.





Rys. 12. Przestrzenny rozkład aktywności nasycenia złota liczby cznaczają numer folii △ - długie ramię, ⊙ - krótkie ramię(folie ułożone na ramionach plastykowych)



Rys. 12a. Przestrzenny rozkład aktywności nasycenia złota folie ułożone na ramionach aluminiowych







Rys. 14. Przestrzenny rozkład aktywności nasycenia europu wewnątrz pręta paliwowego folie były umieszczone wyżej, w większym strumieniu neutronów

Załącznik 7

Aktywności termiozne złota, lutetu i europu uzyskane na podstawie pomiarów

R mm	A _T . 10 ⁻⁴	Aepi. 10-4	Ath. 10-4	Ared
0	27,5	11,0	16,5	0,452
5	28,3	11,0	17,3	0,474
10	31,5	11,5	20,0	0,548
15	39,8	13,3	26,5	0,726
20	45,0	14,5	30,5	0,836
25	47,5	14,5	33,0	0,904
30	49,0	14,5	34,5	0,945
35	50,0	14,5	35,5	0,973
40	50,5	14,5	36,0	0,986
45	50,7	14,5	36,2	0,992
50	51,0	14,5	36,5	1,000

7.1 aktywności złota (ramię plastykowe)

(ramię aluminiowe)

15	88,0	29,0	59,0	0,738
20	96,0	29,0	67 ,0	0,838
25	101,0	29,0	72,0	0,900
30	104,0	29,0	75,0	0,938
35	106,0	29,0	77,0	0,963
40	107,5	29,0	78,5	0,981
45	108,5	29,0	79,5	0,994
50	109,0	29,0	80,0	1,000

R	$A_{\rm T} \cdot 10^{-4}$ $A_{\rm epi} \cdot 10^{-4}$		Ath-10-4	Areă
0	3.23	0.15	3.08	0.561
5	3.38	0.15	3.18	0.579
10	3,75	0,15	3,60	0,656
15	4,50	0,15	4,35	0,792
20	5,00	0,15	4,85	0,883
25	5,28	0,15	5,13	0,934
30	5,45	0,15	5,30	0,965
35	5,56	0,15	5,41	0,985
40	5,61	0,15	5,46	0,995
45	5,63	0,15	0,15 5,48	
50 5,64		0,15	5,49	1,000
	7.3	aktywnośc:	1 europu	
0	47,5	4,5	37,4	0,454
5	51,0	4,5	40,9	0,496
10	57,0	4,5	46,9	0,569
15	67,5	4,5	57,4	0,697
20	78,0	4,5	67,9	0,824
25	83,5	4,5	73,4	0,891
30	86,5	4,5	76,4	0,927
35	89,0	4,5	78,9	0,958
40	90,0	4,5	79,9	0,970
45	91,5	4,5	81,4	0,988
50	92,5	4,5	82,4	1,000

7.2 aktywności lutetu

Okładki kadmowe pochłaniają tylko ozęść neutronów o energii 0,46 eV 1 stąd niepewność co do tego jaką część nadkadmowej oałki rezonansowej stanowi wkład rezonansów europu o energiach większych niż 0,46 eV, a jaką część stanowi wkład rezonansu przy 0,46 eV. Gdyby udało się wykonać okładki kadmowe nieskończenie cienkie, nie pochłaniałyby one neutronów rezonansowych, a jedynie neutrony termiczne o energii mniejszej niż 0,46 eV. Wówczas omówione powyżej zagadnienie nie występowałoby. Opisany poniżej tok postępowania pozwala na wprowadzenie poprawek określających pochłanianie neutronów o energii 0,46 eV przez kadm.

Metoda opracowana w MIT polega na pomiarze aktywności fo-lii europu w zależności od grubości filtra kadmowego. Zakłada się, że okładki kadmowe są dostatecznie grube, by powstrzymać wszystkie neutrony o energiach leżących poniżej rezonan-su europu. Grubość najcieńszej, użytej w doświadczeniu blachy kadmowej wynosiła 0,01". Wynik pomiaru przedstawiono na rys. 15. Jak wynika z przedstawionego wykresu, aktywność europu spada bardzo szybko wraz ze wzrostem grubości okładki kadmowej i przy dużych grubościach ustala się na stałym poziomie. Ponieważ przy energiach >0,46 eV przekrój czynny kadmu jest stosunkowo mały (<10 barn) przyjętojże stałą wartość aktywności europu uzyskano na skutek pochłaniania neutronów o energiach powyżej 0,46 eV, w rezonansach Eu. Odejmując tę wartość stałej aktywności od pozostałych aktywności przed-stawionych na rys. 15, otrzymuje się w rezultacie aktywności wywolane pochlanianiem neutronów w rezonansie przy 0,46 eV. Osłabienie izotropowego strumienia neutronów przez okładki kadmowe można z dużą dokładnością opisać całką wykładniczą drugiego rodzaju $E_2(x \Sigma_{cd})$, gdzie Σ_{cd} jest makroskopowym przekrojem czynnym kadmu, a x jest grubością blachy kadmowej [3]. Na rys. 16 przedstawiono funkoję E₂(9,3 x), która pokrywa się najlepiej z punktami pomiarowymi²(skorygowane aktywności). Wartość $\Sigma_{\rm Cd}$ = 9,3 cm⁻¹ leży blisko wartości 8,9 om⁻¹, ważnej dla energii 0,46 eV [11]. Zastosowanie funk-cji E₂ pozwala na ekstrapolację aktywności europu pokrytego kadmen do wartości przy x = 0.

Znajomość stałej aktywności oraz aktywności ekstrapolowanej europu pozwala na skorygowanie danych doświadczalnych do wartości przy termicznych energiach obcięcia 0,194 eV lub 0,785 eV, tzn. poniżej lub powyżej rezonansu 0,46 eV. Jak zostanie później wyjaśnione, do wyznaczenia zmian temperatury neutronów w oparciu o aktywację europu interesować nas będzie tylko aktywność spowodowana neutronami o energii mniejszej niż 0,194 eV.

Aktywność europu pokrytego blachą kadmową o zerowej grubości, spowodowaną wychwytem neutronów rezonansowych o energii 0,46 eV, otrzymuje się z wykresu przedstawionego na rys. 16. Dodając do tej aktywności stałą aktywność spowodowaną wszystkimi rezonansami europu, leżącymi powyżej 0,46 eV (rys. 15), uzyskuje się całkowitą aktywność europu, spowodowaną



sktywności względne



grubość okładki kadmowej x

Rys. 16. Aktywność Eu, spowodowana wychwytem neutronów w rezonansie 0,46 eV, w zależności od grubości okładek kadmowych

neutronami o energiach wyższych niż energia 0,2 eV. przy której zaczyna się kształtować rezonans mający swój szczyt przy 0,46 eV, (rys. 5). Stosunek aktywności europu, spowodowanej neutronami o energiach większych od 0,2 eV, do aktywności fo-lii okrytej blachą kadmową o grubości 0,023" (rys. 15), wynosi 2,246. Jeżeli teraz od całkowitej aktywności folii euronie okrytych kadmem, odejmiemy iloozyn 2,246 Aeni Am powych Aeni jest zmierzoną aktywnością folii okrytej bla-(gdz1e ohą kadmową c grubości 0,023"), uzyska się aktywność termiczspowodowaną neutronami o energiach leżących poniżej Ath ną około 0,2 eV. W załączniku 7 przedstawiono aktywności termiczne europu, przy ozym wartości dla posz-Am oraz Aeni czególnych odległości od osi pręta paliwowego brano z rys. 14.

Ponieważ w programie THERMOS najbliższą tej energii jest energia obcięcia 0,194 eV, więc z tegc powodu brano ją pod uwagę przy porównaniu teoretycznych i doświadczalnych aktywności europu (rozdz. 5.1).

4.4.3. Wyznaczanie temperatur neutronów w oparciu o aktywności lutetu i złota oraz europu i złota

Temperaturę neutronów w dowolnym miejscu zestawu podkrytycznego można wyznaczyć na podstawie danych uzyskanych z aktywacji folii Au oraz Lu. Opierając się na zapisie Westcotta, stosunek całkowitej aktywności Lu-177 do całkowitej aktywności Au-198 można wyrazić zależnością

$$R_{Lu}^{0} = \frac{(A_{T}^{0})_{Lu}}{(A_{T}^{0})_{Au}} = \alpha \frac{(1 + \frac{rs}{g})_{Lu} g_{Lu}}{(1 + \frac{rs}{g})_{Au} g_{Au}}$$
(14)

Należy tu jeszcze raz podkreślić, że aktywności występujące w zależności (14) dotyczą pochłaniacza o zerowej grubości (indeks "o"). Wartość c jest stałą, która zawiera między innymi stosunek przekrojów czynnych Lu oraz Au dla neutronów o szybkości 2200 m/sec. Wartość tę mcżna wyznaczyć albo przez pomiar stosunku aktywności w zranym widmie energetycznym (np. neutronami opuszczającymi kolumnę energetyczną reaktora) albo też zakładając na przykład, że temperatura neutronów odpowiada temperaturze, obliczonej na granicy komórki elementarnej, w oparciu o program THERMOS.

Wartość r, proporcjonalną do stosunku koncentracji neutronów epitermioznych do całkowitej koncentracji neutronów, można określić przez pomiar stosunku kadmowego dla folii złota o zerowej grubości. Ponieważ stosunek kadmowy pochłaniacza, którego przekrój czynny podlega prawu 1/v, wyraża się zależnością [20]

$$R_{Cd}^{o} = \frac{g + rs}{r \left[s + \frac{1}{K} \sqrt{\frac{T_{n}}{T_{o}}}\right]}$$
(15)

przeto dla złota

$$r = \frac{g_{Au}}{(R_{Cd}^{0})_{Au} s_{Au} + \frac{(R_{Cd}^{0})_{Au}}{K} \sqrt{\frac{T_{n}}{T_{o}}} - s_{Au}}$$
(16)

Symbolem K oznaczono współozynnik uwzględulający pochłanianie neutronów przez okładki kadmowe. W niniejszej pracy stosowano okładki kadmowe o grubości 0,023", dla których K = 2,106 [19].

Stosując zależność określającą wartość s [20]

$$s_{Au} = 17,28 \sqrt{T_{g}/T_{o}}$$
 (17)

lub

$$\frac{s_{Au}}{17,28} = \sqrt{T_{u}/T_{0}}$$
(17a)

równanie (16) przyjmie postać

$$r = \frac{g_{Au}}{g_{Au} [1,0275 \ (R_{Cd}^{0})_{Au} - 1]}$$
(18)

a równanie (14) postać następującą

$$R_{Lu}^{0} = \frac{\alpha (1 \div \frac{rs}{\beta})_{Lu} g_{Lu}}{\left[\frac{1,0275 (R_{Cq}^{0})_{Au}}{1,0275 (R_{Cq}^{0})_{Au}}\right] g_{Au}}$$
(19)

Zależności (14) i (19) ważne są dla przypadku, gdy folie posiadają zerową grubość (nieskończenie rozcieńczone). Stosunki kadmowe folii o zerowej grubości można uzyskać przez pomiar stosunków kadmowych przy różcych grubościach folii Au i przez ekstrapolację tych wartości do zera. Korzystając z wykresu Browna [3] (rys. 17), na którym figurują stosurki

$$(R_{Cd} - 1) = A_{th}/A_{ep1}$$
(20)

odozytujemy

$$\begin{bmatrix} 0,002 \\ (R_{Cd}^{0} - 1) \\ (R_{Cd}^{0} - 1) \end{bmatrix}_{Au} = \begin{bmatrix} (R_{Cd} - 1)_{0.0984 \text{ g/om}^2} \\ (R_{Cd}^{0} - 1) \end{bmatrix}_{Au} = 3,158 \quad (21)$$

0,002 0,002 Ponieważ wartości. A craz A epi uzyskuje się bezpośrednio na podstawie pomiarów, więc zgodnie z zależnościami (20) i (21) oraz przyjmując, że poprawka uwzględniające samoekranowanie atomów w folii o grubości C,002^m wynosi A^{0,002}/Ath = 0,946 [3], można napiseć

$$(A_{\rm T}^{\rm O})_{\rm Au} = \frac{1}{0.946} (A_{\rm th}^{\rm O},002 + 3,158 A_{\rm epi}^{\rm O},002)_{\rm Au}$$
 (22)

Skojarzenie równań (14), (19) i (22) daje na wynik

$$\frac{0,946 \ (A_{\rm T}^{0})_{\rm Lu}}{(A_{\rm Lu}^{0,002}+3,158 \ A_{\rm ep1}^{0,002})_{\rm Au}} = \frac{\alpha (1 + \frac{r_{\rm S}}{R})_{\rm Lu} \ g_{\rm Iu}}{\left[\frac{1,0275 \ (R_{\rm Cd}^{0})_{\rm Au}}{1,0275 \ (R_{\rm Cd}^{0})_{\rm Au}-1}\right]} g_{\rm Au}$$
(23)

Zależności (18), (21) oraz (23) wraz z tablicami Westcotta [20] pozwalają obliczyć metodą kolejnych przybliżeń temperatury neutronów na podstawie wyznaczonego doświadczalnie rozkładu aktywneści złota oraz lutetu.

W przypadku europu zagadnienie należy potraktować w nieco odmienny sposób. Ponieważ do obliczeń temperatury neutronów będą brane aktywności obliczone dla energii obcięcia 0,194 eV



(rozdz. 4.4.2), która leży zdecydowanie w obrębie widma Maxwella-Boltzmanna (r=0), więc zamiast zależności (23) należy napisać

$$\frac{0,946 \ (A_{T}^{0})_{Eu}^{0,194eV}}{(A_{Th}^{0,002} + 3,158 \ A_{ep1}^{0,002})_{Au}} = \frac{\alpha g_{Eu}}{\left[\frac{1,0275 \ (R_{Cd}^{0})_{Au}}{1,0275 \ (R_{Cd}^{0})_{Au}-1}\right]} g_{Au}$$
(24)

Równania (23) oraz (24) zostały zaprogramowane dla cyfrowej maszyny matematycznej ZAM-2. Wartość α wysnaczono na podstawie temperatury na brzegu komórki $T_n(14)=57$ °C, obliczonej

w oparciu o program THERMOS oraz aktywności złota, lutetu i europu w tymże miejscu. Metodą kolejnych przybliżeń wyznaczono temperatury neutronów w zależności od promienia rozpatrywanej komórki elementarnej.

W zestawieniu 2 przedstawiono wartości temperatur neutronów, obliczone w oparciu o dane doświadczalne. Do obliczeń brano aktywności zestawione w załączniku 7.

Zestawienie 2

R	T _D ^O C				
mm	Lu-Au	Eu-Au			
1	2	3			
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	151,6 151,0 132,0 89,7 76,3 68,2 64,2 61,5 60,0 59,3 57,0	77,1 76,3 70,8 63,7 68,6 60,5 57,0			

Temperatury neutronów wyznaczone w oparciu o dane doświadczalne

5. OMOWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

5.1. <u>Porównanie aktywności zmierzonych z wartościami obli-</u> czonymi przy użyciu programu THERMOS

W wyniku obliczeń opartych o program THERMOS uzyskuje się aktywności względne, znormalizowane do jedności w osi pręta lub na krawędzi elementarnej komórki. Celem porównania wartości doświadczalnych z teoretycznymi należy więc również odpowiednio znormalizować doświadczalne aktywności termiczne. W pracy niniejszej wszystkie aktywności zostały znormalizowane do jedności na krawędzi komórki elementarnej (pierścień 14). Taki sposób normalizacji można uzasadnić następująco:

a) Rozkład neutronów na krawędzi komórki nieskończenie rozległego układu jest płaski i łatwiej ustalić właściwe położenie krzywej łączącej punkty pomiarowe niż w przypadku stromego przebiegu wewnątrz pręta paliwowego gdzie jest dotkliwy brak miejsca na odpowiednie ułożenie folii aktywacyjnych. W osi pręta można umieścić tylko jedną folię, podczas gdy w moderatorze może być ich znacznie więcej. Dokładność pomiaru w pręcie jest więc znacznie mniejsza.

b) Na krawędzi komórki rozkład neutronów jest bardzo zbliżony do rozkładu makswellowskiego i przez to obliczenia teoretyczne obarczone są mniejszym błędem.

Załącznik 8

Pierścień	R	złoto	lutet	europ
	m m	(E [*] = 0,415 eV)	(E [*] = 0,415 eV)	(E=0,194 eV)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	0 2,844 5,689 8,533 11,378 13,245 16,165 21,117 26,069 31,021 35,973 40,925 45,877 50,829	0,4596 0,4679 0,4897 0,5316 0,6081 0,6915 0,7764 0,8537 0,8963 0,9307 0,9571 0,9571 0,9772 0,9920 1	0,5700 0,5767 0,5945 0,6284 0,6889 0,7497 0,8178 0,8789 0,9121 0,9400 0,9622 0,9795 0,9926 1	0,4070 0,4159 0,4394 0,5692 0,6641 0,7575 0,8424 0,8894 0,9266 0,9549 0,9763 0,9917 1

Względne aktywności termiczne złota, lutetu i europu obliczone przy użyciu programu thermos







Rys. 19. Przestrzenny rozkład względnych aktywności lutetu



Względne aktywności termiczne obliczone w oparciu o program THERMOS przedstawiono w załączniku 8, a względne aktywności termiczne, uzyskane na podstawie pomiarów przedstawiono w załączniku 7. Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami teoretycznymi przedstawiono na rysunkach 18, 19, 20.

Ponieważ w przypadku złota istnieje zadowalająca zgodność pomiędzy wartościami przewidzianymi w obliczeniach opartych o program THERMOS i danymi doświadczalnymi, przeto można stwierdzić, że rozkład neutronów wewnątrz elementarnej komórki badanego małego zestawu podkrytycznego można określać w oparciu o program THERMOS.

Trudno wyjaśnić pewne nieznaczne rozbieżności pomiędzy teorią i doświadczeniem w przypadku lutetu. Doskonała zgodność uzyskana w przypadku złota pozwala przypuszczać, że przekroje czynne lutetu wzięte do obliczeń teoretycznych nie są zbyt dokładne. Należy jednak zaznaczyć, że zauważone rozbieżności są małe w porównaniu z wynikami uzyskiwanymi zazwyczaj w tego rodzaju doświadczeniach.

W przypadku europu można zaobserwować dobrą zgodność teorii z doświadczeniem w obszarze moderatora. Natomiast wewnątrz pręta paliwowego widać duże rozbieżności. Dobór innych energii obcięcia niż 0,194 eV nie poprawił zgodności teorii z eksperymentem, a potwierdził jedynie słuszność obrania tej właśnie wartości.

5.2. <u>Porównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości</u> temperatur neutronów

Na rysunku 21 przedstawiono linią ciągłą wartości temperatur neutronów wzdłuż promienia komórki elementarnej badanego zestawu, obliczone w oparciu o program THERMOS (zestawienie 1). Punktami natomiast zaznaczono temperatury obliczone w oparciu o netodę Westcotta, na podstawie danych doświadczalnych (zestawienie 2).

Jak widać na rys. 21, punkty określające temperaturę neutronów wyznaczoną w oparciu o pomiary aktywności folii europowych posiadają większy rozrzut niż punkty określające temperaturę wyznaczoną w oparciu o aktywności folii lutetowych. Fakt ten należy tłumaczyć w następujący sposób: współczynniki g Westcotta dla lutetu i europu zostały wyznaczone z dokładnością ok. 2,5%. Ponieważ jednak wartość g dla europu zmienia się znacznie wolniej wraz ze zmianą temperatury niż wartość g dla lutetu, wobec tego 2,5 procentowa niepewnośći w wyznaczaniu g prowadzi tu do znacznie większej niepewności w wyznaczaniu temperatury neutronów.

Na brak dokładnej zgodności pomiędzy teoretycznym rozkładem temperatury neutronów i 'rozkładem temperatury wyznaczonym w oparciu o dane doświadczalne wpływa zarówno niedoskonałość programu THERMOS jak i niedoskonałość metody Westcotta. Już Honeck



Rys. 21. Przestrzenny rozkład temperatury neutronów w komórce zestawu podkrytycznego

zauważył, że w przypadku ciasnych siatek paliwowych, przejście z geometrii rzeczywistej na cylindryczną może spowodować pewne niedokładności w obliczeniach przeprowadzonych w oparciu o program THERMOS i zajął się opracowaniem nowego programu w którym uwzględnione mają być rzeczywiste granice komórki ele-mentarnej. Peak [12] potwierdził swoimi doświadczeniami, że zgodność teorii z eksperymentem wzrasta wraz ze wzrostem odległości pomiędzy prętami paliwowymi. Jeżeli chodzi o metodę Westootta, to opiera się ona na dość dowolnym założeniu, że rozkład Maxwella-Boltzmanna łączy się z rozkładem 1/E záwsze przy tej samej w przybliżeniu energii. Na podstawie analizy energetycznych rozkładów neutronów, obliczonych w oparciu o program THERMOS, nie można stwierdzić istnienia tak prostej zależności. Poza tym, ze względu na dużą twardość widma w pobliżu pręta paliwowego i w samym pręcie, nie zawsze można je zastąpić widmem Maxwella-Boltzmanna, Sam Westcott zresztą zaznacza, że jego metoda daje zadowalające wyniki w przypadku debrze moderowanych układów. Celem przekonania się o stopniu zmoderowania neutronów w poszczególnych punktach komórki elementarnej, w zestawieniu 3 przedstawiono obliczone w oparciu o zależności (18) wartości $r = \alpha n_{epi} / (n_{epi} + n_{H-B})$ [15].

Zestawienie 3

R		=	0	10	20	30	40	50
	r	=	0,0938	0,0845	0,0751	0,0678	0,0656	0,0649

Wartości r dla badanego zestawu podkrytycznego

5.3. Wnioski

W badanym zestawie podkrytycznym, przy parametrze siatki paliwowej 4", zgodność danych doświadczalnych z danymi uzyskanymi przy użyciu programu THERMOS jest zadowalająca pomimo tego, że w przypadku lutetu i europu dały się zauważyć nawet dość znaczne odchyłki. Można z tego wyciągnąć wniosek, że THERMOS dostarcza tu dobrych informacji dotyczących stwardnienia widma neutronów w kierunku od moderatora do paliwa.

Ze względu na to, że współczynnik g Westcotta dla europu zmienia się znacznie wolniej wraz z temperaturą niż współczynnik g dla lutetu, wobec tego można wyciągnąć dodatkowy wniosck, że wartości temperatury wyznaczone w oparciu o aktywację lutetu są bardziej wiarygodne niż wartości uzyskane w oparciu o aktywację europu. Biorąc poza tym pod uwagę fakt bardziej skomplikowanego postępowania przy wykorzystywaniu danych doświadczalnych należy stwierdzić, że "termometr" Lu-Au znacznie lepiej nadaje się do badań tego typu. Wyniki bedań przeprowadzonych na małym zestawie podkrytycznym wykazują równie dobrą zgodność pomiedzy teorią i eksperymentem jak na przykład wyniki Browna [3], przeprowadzone na dużym zestawie MIT. W oparciu o badania Peaka [12] oraz w oparciu o badania przedstawione w niniejszej pracy nasuwa się ogólny wniosek, że zastosowanie małych, ekonomicznych zestawów podkrytycznych spełnia warunki wymagane przy wstępnych studiach nad nowymi typami reaktorów jądrowych z uranem i ciężką wodą.

6. OZNACZENIA

A	- aktywność
В	- tło (przy pomiarze aktywności)
D	- poprawka na czas rozdzielczy układu liczącego
E	- energia
g	- współczynnik Westcotta, zależny od temperatury
i	- indeks grupy energetyoznej
J	- funkcja Bessela pierwszego rodzaju, zerowego rzędu
k	- stała Boltzmanna
m	- masa neutronu
M	- liozba zliozeń
n	- gęstość neutronów
R	- promień, stosunek
r	- współrzędna punktu, promień bieżący
8	- współczynnik Westcotta, zależny od temperatury
T	- temperatura (T _o = 293 ⁰ K), ozas napromieniowywania folii
T1/2	- czas połowicznego zaniku
t	- ozas liczony od chwili ukończenia napromieniowywan do chwili rozpoczęcia pomiaru aktywności
V	- szybkość
r	- grubość
œ	- wartość stała
λ	- stala rozpadu
Σ	- makroskopowy przekrój ozynny
0	- mikroskopowy przekrój czynny
ô	- efektywny, mikroskopowy przekrój ozynny
T	- czas liczenia impulsów

Indeksy dotyczą:

()act	-	aktywacji
() _{Cd}	-	kadmu
().ef	-	granicy zestawu, dla której zakłada się warunek brzegowy, że strumień neutronów jest równy zeru,
() _{epi}	-	aktywności spowodowanej neutronami epitermicznymi (powyżej obcięcia kadmowego)
()1	-	i-tej grupy energetycznej
() _{int}	-	granicy przedziału energetycznego
()	-	neutronu
()_	-	wartości najbardziej prawdopodobnej szybkości w widmie Maxwella-Boltzmanna
()_	-	lub () _{red} , wartości zredukowanej
(),	-	aktywności nasycenia
() _m	-	aktywności całkowitej
()_+h	-	aktywności spowodowanej neutronami termicznymi
()0	-	zerowej grubości
()0,002	-	grubości 0,002"
()0,194	-	energii obcięcia 0,194 eV
()	-	wartości średniej
()*	-	granicy energetycznej widma

7. LITERATURA

- BIEHL A.T., WOODS D.: "Intra-Cell Neutron Densities in Natural Uranium-D₂O Lattices", NAA-SR-138, Part I, 1951, Part II, 1953.
- [2] BROWN H., St. JOHN D.S.: "Neutron Energy Spectrum in D₂0", DF-33, 1954.
- [3] BROWN P.S., THOMPSON T.J., KAPLAN I., PROFIO A.E.: "Measurements of the Spatial and Energy Distribution of Thermal Neutrons in Uranium, Heavy Water Lattices" NYO-10205, MITNE-17, 1962.
- [4] GREEN R.E., BEER G.A., CHIDLEY B.G., MILLAR C.H., TUNNI-CLEFFE P.R.: "Experimental Lattice Parameters for NPD and CANDU Type Fuel Elements in D₂O", AECL-1640, 1962.

- [5] GREEN R.E., BIGHAM C.B.: "Lattice Parameter Measurements in ZED-2", Exponential and Critical Experiments, Vol. II, IAEA, Vienna, 1964.
- [6] GREEN E.R., BIGHAM C.B., GIBSON I.H., JARVIS R.G., HALSALL M.J., DRIGGERS F.E., MILLAR C.H.: "Lattice Studies at Chalk River and their Interpretation", AECI-2025, 1964.
- [7] "Heavy Water Lattice Research Project Annual Report", Department of Nuclear Engineering MIT, NYO-9658, 1961.
- [8] HONECK H.C.: "The Distribution of Thermal Neutrons in Space and Energy in Reactor Lattices. Part I: Theory", Nuc. Sci. Eng., 8, 193, 1960.
- [9] HONECK H.C., KAPLAN I.: "The Distribution of Thermal Neutrons in Space and Energy in Reactor Lattices. Part II: Comparison of Theory and Experiment", Nuc. Sci. Eng., 8, 203, 1960.
- [10] HONECK H.C.: "THERMOS. a Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculations", ENL-5826, 1961.
- [11] HUGHES D.J., SCHWARTZ R.B.: "Neutron Cross Sections" Second Ed., ENL-325, 1958, oraz Supplement, 1960.
- [12] PEAK J., KAPLAN I., THOMPSON T.J.: "Theory and Use of Small Subcritical Assemblies for the Measurement of Reactor Parameters", NYO-10204, MITNE-16, 1962.
- [13] "Proceedings of the University Subcritical Assemblies Conference", Gatlinburg, Tennessee, Aug. 28-30, 1961, ORNL Inst. of Nuclear Studies, TID-7619.
- [14] SMIT J.: "Analysis of Neutron Spectra in UO, Lattices Moderated by Mixtures of Light and Heavy Water, Using Resonance Detector Foils", Institut for Atomenergii Kjeller Research Establishment, Kjeller, Norway, 1964.
- [15] ŚWIERZAWSKI T.J.: "Efektywne przekroje czynne w termicznych reaktorach jądrowych", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka Nr 11, 1963.
- [16] THOMPSON T.J.: "The MIT Research Reactor", Proc. 2-nd. UN Int. Conf. PUAE, <u>10</u>, 1958.
- [17] WEINBERG A.M., WIGNER E.P.: "The Physical Theory of Neutron Chain Reactors", The University of Chicago Press, 1958.
- [18] WEITZBERG A., KAFLAN I., THOMPSON T.J.: "Measurements of Neutron Capture in U-238 in Lattices of Uranium Rods in Heavy Water", NYO-9659, Jan., 1962.
- [19] WESTCOTT C.H., WALKER W.H., ALEXANDER T.K.: "Effective Cross Sections and Cd Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors", Proc. 2-nd. Un Int. Conf. PUAE, <u>16</u>, 1958.
- 20] WESTCOTT C.H.: "Effective Cross Section Values for well Moderated Thermal Reactor Spectra", AECL-1101, Nov. 1960.

POMIARY PRZESTRZENNEGO I ENERGETYCZNEGO ROZKŁADU NEUTRONÓW TERMICZNYCH W MAŁYM ZESTAWIE PODKRYTYCZNYM Z URANEM I CIĘŻKĄ WODĄ

Streszczenie

Zestawy podkrytyczne posiadają ważne znaczenie w technice reaktorowej. Służą one między innymi do określania parametrów niezbędnych przy projektowaniu reaktorów jądrowych o identycznej siatce paliwowej. Zestawy podkrytyczne są bardziej ekonomiczne i w znacznie większym stopniu bezpieczne od doświadczalnych reaktorów jądrowych zerowej mocy. Poza tym można w nich łatwo zmieniać konfigurację i skład paliwa jądrowego oraz moderatora. Ważną ich zaletą jest również niski koszt w porówraniu z kosztem reaktorów. Stosowanie małych (miniaturowych) zestawów podkrytycznych do pomiaru parametrów niezbędnych przy wstępnych studiach nad nowymi typami reaktorów jądrowych stwarza szczególne możliwości zaoszczędzenia czasu i kosztów.

Niniejsza praca jest częścią programu badań teoretycznych i doświadczalnych w zakresie fizyki niejednorodnych układów mnożących z częściowo wzbogaconym uranem i ciężką wodą, które zostały przeprowadzone w Massachusetts Institute of Technology (USA). Doświadczenia przeprowadzono na zestawie, w skład którego wchodził cylindryczny zbiornik aluminiowy o wysokości 53 cm i średnicy 51 cm oraz odpowiednie dna sitowe dla umieszczenia prętów paliwowych. Zestaw podkrytyczny był zasilany neutronami pobieranymi z kanału doświadczalnego, którego ujście znajdowało się w sali terapii medycznej usytuowanej pod reaktorem MIT.

Pomiary rozkładów aktywności przeprowadzono dla prętów uranu naturalnege o średnicy 2,57 om w osłonach aluminiowych, które tworzyły siatkę trójkątną o boku 10,16 om. Do pomiarów użyto folii wykonanych ze złota, lutetu i europu. Część tych folii znajdowała się w okładach kadmowych. Przekrój czynny złota na pochłanianie neutronów termioznych podlega prawu 1/v i dlatego folie złote służyły do pomiaru rozkładu gęstości neutronów termicznych. Folie lutetu i europu były używane do wyznaczenia przestrzenno-energetycznego widma neutronów w centralnej komórce siatki. Zmierzone rozkłady aktywności porównano z wynikami obliczonymi w oparciu o program THERMOS na cyfrowej maszynie matematycznej IEM-7090. Obliczenia wykonano w Ośrodku Obliczeniowym MIT, Cambridge, Massachusetts. Temperatury neutronów obliczono na podstawie danych pomiarowych stosując efektywne przekroju czynne Westootta. Uzyskane w ten sposób wartości temperatur zgadzają się dobrze z wartościami obliczonymi w oparciu o THERMOS.

Wyniki badań uzyskane w niniejszej pracy oraz wyniki uzyskane przez Peaka [12] są na tyle zadowalające, by uznać za uzasadnione stosowanie małych zestawów podkrytycznych przy wstępnych studiach nad nowymi typami energetycznych reaktorów jądrowych. ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В МАЛОЙ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ С РЕШЕТКОЙ ИЗ УРАНА И ТЯХЕЛОЙ ВОДОЙ

Содержание

Подкритические сборки играют важную роль в реакторостроения. В них могут быть выполнены аксперименты по параметрам проектируемых ядерных реакторов с идентичными ячейками. Подкритические сборки более акономные и на много более безопасные чем реакторы нулевой мощности для исследовательских целей, а также применительные для изучения различных конфигурации и состава ядерного топлива и замедлителя. Особенно интересным преимуществом является их невысокая стоимость по сравнению с реакторами. Использование малых (министриных) подкритических сборок для определения параметров ядерных реакторов в предварительных исследованиях предлагает определенную возможную экономию времения и денег.

Настоящая работа представляет собой часть акспериментальной и теоретической программы исследований по физике тяжеловодных, частично обогащенных решеток металлического урана, выполненных в Массачусетском Технологическом Институте (США). Измерения были сделаны на установке, которая состоит из алюминиевого цилиндрического бака, высота которого была равна 53 см, а диаметр 51 см, в котором помещалась решетка. В качестве источника служил пучок нейтронов, выходящих из реактора МПТ через отверстие в потолке зала медицинской терания.

Измерения распределения активности были сделаны на решетке с треугольника шагом 10,16 см, в узлах которой располагались металлические блоки из естественного урана дламатори 2,57 см, в алюминиевой оболочке. Пространственное распределение было измеренс с помощью детекторов из золота, лотеция и европия, закрытых кадмием и без кадмия. Так как сечение захвата золота в тепловой области изменяется по закону 1/ч то его активация показывает распределение плотности тепловых нейтронов. Фольги лотеция и европия использовано для определения пространственно-энергетического спектра нейтронов в центральной ячейке решетки. Экспериментальные распределения сравнивались с распределениями, вччисленными по программе ТНКИМОЗ на быстропействующей вычислительной машине 1ВМ-7090 в Вычислительном Центре МІТ, Кембрида, Массачусетс. Температуру нейтронов определения сечений Уесткотта. Этот метод получения хода температури нейтронов по ячейке оправдывается хорошем согласием с расчетами по ТНКИМОЗ.

Результати получени в этой работе, а также результати получени Пиком [12] достаточно предпочтительни для оправдания использования малых подкритических сборок в некоторых предварительных исследованиях новых типов энергетических ядерных реакторов.

MEASUREMENTS OF THE SPATIAL AND ENERGY DISTRIBUTION OF THERMAL NEUTRONS IN URANIUM, HEAVY WATER LATTICE OF SMALL SUBCRITICAL ASSEMBLY

Summary

Suboritical assemblies have important design functions. These include determination of parameters pertinent to the design of a nuclear reactor with identical cells. The suporitical assemblies are more economical and they present far fewer hazards than zero-power oritical research reactors and easily permit to study a great number of configurations and compositions of fuel and moderator. There certainly is also the advantage of the low cost in comparison with reactors. The use of small (miniature) subcritical assembly for the measurement of reactor parameters in the preliminary study of new types of reactors offers special potential savings in time and money.

This research work is a part of an experimental and theoretical program on the physics of heavy water moderated, partially enriched uranium metal lattices being conducted at the Massachusetts Institute of Technology (USA). The experiments were made in the assembly consisted of an aluminum tank in the form of a right circular cylinder 21 in. height and 20 in. diameter, together with appropriate grid plates for the fuel rods. The neutron beam port of the Medical Therapy Facility at the MIT Reactor was used as a neutron source for the assembly.

Intracell activity distributions were measured in the lattice of 1,01 in. diameter, aluminum clad natural uranium rods on triangular spacings of 4 in. The distributions were measured with bare and cadmium-covered foils of gold, lutetium and europium. The gold was used as a 1/v absorber to measure the thermal neutron density distribution. Lutetium and europium foils were used to make the neutron energy spectrum distribution with position in the central lattice cell. The measured activity distributions were compared with those computed with the THERMOS code, using the IBM-7090 computer. The calculations were performed at the MIT Computation Center, Cambridge, Massachusetts. Neutron temperature calculations were made from the data by using Westcott effective cross sections. The temperature changes so calculated agreed well with those predicted by THERMOS. The results obtained in this study and also results published in the Peak's thesis [12] are promissing enough so that the use of small subcritical assemblies in some preliminary studies of new types of power reactors is justified.

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
 - M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty z serii En.:

Energetyka	z.	1,	1956	r.,	s.	174,	zł	26,—
Energetyka	z.	2,	1957	r.,	s.	118,	zł	24,—
Energetyka	z.	3,	1959	r.,	s.	62,	zł	7,—
Energetyka	z.	4,	1960	r.,	s.	113,	zł	22,80
Energetyka	z.	5,	1961	r.,	s.	103,	zł	16,25
Energetyka	z.	6,	1961	r.,	s.	55.	zl	4,15
Energetyka	z.	7,	1961	r.,	s.	60,	zł	5.50
Energetyka	z.	8,	1961	r.,	s.	50,	zł	3,70
Energetyka	z.	9,	196 2	r.,	s.	127,	zł	9,55
Energetyka	z.	10,	1962	r.,	s.	73,	zł	5,50
Energetyka	z.	11,	19 63	r.,	s.	178,	zł	9,30
Energetyka	z.	12,	1964	r.,	s.	89,	zł	4,65
Energetyka	z.	13,	1964	r.,	s.	109,	zł	8,10
Energetyka	z.	14,	1964	r.,	s.	104,	zł	8,15
Energetyka	z.	15,	1964	$\mathbf{r}_{\mathbf{b}}$	s.	69,	zł	4,65
Energetyka	z.	16,	1964	r.,	s.	149,	zł	7,50
Energetyka	z.	17,	1964	r.,	s.	152,	zł	7,10
Energetyka	z.	18,	1965	r.,	s.	128,	zł	6,40
Energetyka	z.	19,	1965	r.,	s.	92,	zł	6,—
Energetyka	z.	20,	1965	r.,	s.	90,	zł	4,70
Energetyka	z.	21.	1966	r.,	s.	120,	zł	8,—
Energetyka	z.	22.	1966	r.,	s.	111,	zł	6, —