

dr inż. Tomasz Piotrowski\*  
dr Janusz Skubalski\*\*

# Analiza zjawiska transportu neutronów przez przegrody betonowe i możliwości jego wykorzystania w badaniach materiałowych

*Analysis of neutrons transport through concrete member and the possibilities of its use in building material investigation*

**Streszczenie.** Symulacje komputerowe wskazują, iż wzrost gęstości przegrody ma niewielki wpływ na osłabienie promieniowania neutronowego. Optymalna kompozycja składu betonu osłonowego przed promieniowaniem gamma jest inna niż optymalna kompozycja betonu osłonowego przed promieniowaniem neutronowym. W artykule przedstawiono dwa badania eksperymentalne pozwalające na analizę zjawiska transportu neutronów przez zaprawy cementowe i naprawcze zaprawy polimerowo-cementowe PCC. Przedmiotem analizy był m.in. wpływ rodzaju cementu, dodatku polimeru oraz wilgotności na transport neutronów oraz możliwości wykorzystania tego zjawiska w badaniach materiałowych.

**Słowa kluczowe:** transport neutronów, beton osłonowy, promieniowanie jonizujące.

**Abstract.** Monte Carlo computer simulations indicate that an increase in the density of the shielding member has minor effect on the weakening of neutron transport and, therefore, the optimal composition of a shielding concrete against gamma radiation is different than the optimal composition of shielding concrete against neutron radiation, which results from the atomic composition of the barrier. The article presents an analysis of neutrons transport through concrete cement mortar and PCC mortar. The goal was to find an influence of the cement type and moisture content on the shielding properties against neutron of a composite and the possibility of using this phenomenon in building material investigation.

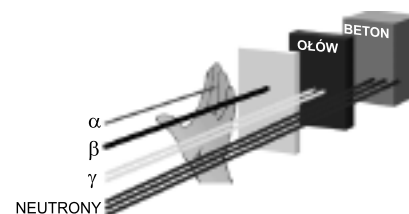
**Keywords:** neutron transport, shielding concrete, ionizing radiation.

Beton jest podstawowym materiałem stosowanym do budowy osłon przed promieniowaniem jonizującym ze względu na niewielki koszt oraz możliwość spełniania funkcji konstrukcyjnych. W związku z tym, że beton jest kompozytem, można optymalizować jego skład, aby wybrane cechy techniczne były optymalne. Istotą problemu optymalizacji betonów osłonowych jest fakt, iż w przypadku ochrony przed promieniowaniem gamma zwiększenie gęstości osłony, np. przez zastosowanie betonu ciężkiego, jest zazwyczaj wystarczająco skutecznym rozwiązaniem (choć niezbyt ekonomicznym), to jednak wzrost gęstości przegrody ma niewielki wpływ na osłabienie promieniowania neutronowego. Wynika to ze zróżnicowania oddziaływania neutronów z ośrodkiem, w zależności od ich energii kinetycznej i tzw. przekrojów czynnych na różne reakcje z różnymi atomami wchodzącymi w skład betonu.

## Transport neutronów przez przegrody betonowe

Najprostszym sposobem opisu transportu neutronów jest postrzeganie ich ruchu jako dyfuzji opisywanej prawem Ficka, które jest wykorzystywane m.in. w opisie transportu gazów przez beton [1], w tym także karbonatyzacji [2]. Neutron jest składową jądra atomowego, która jest elektrycznie obojętna, tj. nie ma ładunku elektrycznego i w związku z tym nie powoduje jonizacji ośrodka podczas przechodzenia przez niego. Główne znaczenie w procesie transportu neutronów przez ośrodek mają więc zjawiska będące efektem zderzeń neutronów z jądrami atomów ośrodka. W związku z tym, że zachodzą one stosunkowo rzadko, neutrony mogą przenikać przez grube warstwy materiałów. Rysunek 1 przedstawia poglądową przenikalność różnych rodzajów promieniowania jonizującego, z którego neutrony (prędkie) charakteryzują się największym zasięgiem.

Podczas zderzeń neutronów z materiałem, w zależności od energii kinetycznej neutronu (prędkości) i rodzaju jądra, mogą zachodzić zjawiska **rozpraszania** (sprężystego i niesprężystego), **absorpcji** (wychwytywanie radiacyjnej



Rys. 1. Przenikalność różnych rodzajów promieniowania jądrowego [3]

( $n$ ,  $\gamma$ ) lub z emisją cząstek naładowanych), **reakcji jądrowej** ( $n$ ,  $2n$ ) lub ( $n$ ,  $3n$ ) oraz **reakcji rozszczepienia**. Z punktu widzenia osłabiania strumienia neutronów najistotniejsze są dwa pierwsze. Rozpraszanie zachodzi, gdy ma miejsce wymiana energii kinetycznej wynikającej z prędkości między neutronem a jądrem atomu. Wyróżniamy rozpraszanie sprężyste, w którym podobnie jak w mechanice następuje utrata energii przez neutron proporcjonalnie do iloczynu masy neutronu i masy jądra atomu, z którym się zderzył.

Rozpraszanie niesprężyste zachodzi, gdy energia neutronów jest większa niż energia najniższego stanu wzbudzenia jądra (zazwyczaj  $> 1$  MeV). Wtedy neutron jest niejako wychwytywany przez jądro, a powstałe jądro złożone rozpada się z emisją neutronu o innej

\* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej

\*\* Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Wydział Farmacji

energii. Drugim istotnym, obok rozpraszania, zjawiskiem zachodzącym podczas transportu neutronów przez beton jest absorpcja. W takim przypadku, w wyniku reakcji jądrowej polegającej na wychwycie neutronu przez jądro, powstaje silnie wzbudzone jądro pośrednie. Posiada ono nadmiar energii i emituje ją przez przemianę jądrową, której towarzyszy emisja kwantu gamma lub rozszczepienie jądra. Miarą prawdopodobieństwa zajścia danego oddziaływania przy zderzeniu neutronu z jądrem są tzw. przekroje czynne, zdefiniowane jako pole powierzchni, w które musi trafić neutron, by doszło do danego zjawiska.

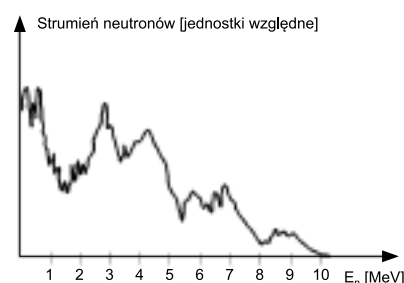
W związku z tym, że przekrój czynny na absorpcję neutronów o dużej energii, tzw. prędkich, jest mały, to aby uzyskać osłabienie strumienia neutronów, należy wykonać przegrodę tak, aby atomy, z których się składa, spowodowały najpierw wytracenie energii w procesach rozpraszania sprężystego i niesprężystego, a następnie nastąpiła absorpcja neutronów powolnych przez atomy pierwiastków wchodzących w skład betonu. Osłabianie promieniowania neutronowego jest zatem procesem dwustopniowym (1 – spowolnienie, 2 – absorpcja). Spowalnianie neutronów prędkich zachodzi głównie w wyniku sprężystych zderzeń z jądrami pierwiastków lekkich oraz rozpraszania niesprężystego na jądrami pierwiastków ciężkich, w przypadku których energia najniższego stanu wzbudzenia jest dużo mniejsza niż dla pierwiastków lekkich (np. Pb – 0,4 MeV, O – 6,0 MeV). Dokładne obliczenie osłabiania neutronów możliwe jest za pomocą obliczeń numerycznych, ale jak dotąd nie opracowano niezawodnej metody obliczeniowej, którą można by polecić inżynierom budowlanym do praktycznego stosowania. Od lat sześćdziesiątych XX wieku zakłada się natomiast, że z dużym prawdopodobieństwem można przyjmować, iż osłony z betonu zawierającego 8 – 10% wody (wolnej i związanej), z ewentualnym dodatkiem krzemianu boru (ok. 70 kg/m<sup>3</sup>), przy grubości koniecznej do osłaniania reaktora od promieniowania gamma, będą również wystarczająco osłabiały promieniowanie neutronowe [4]. Symulacje komputerowe przeprowadzone metodą Monte Carlo wskazują, że zarówno rodzaj betonu (zwykły/ciężki), jak i jego wytrzymałość na ściskanie mają istotny wpływ na właściwości osłonowe przed promieniowaniem neutronowym [5 – 6]. Spadek dawki za przegrodą jest proporcjonalny do wartości wytrzymałości i wynika ze wzrostu zawartości cementu i masy wody związanej w wyniku jego hydratacji. W artykule przedstawiono wprawdzie przewagę betonu ciężkiego nad betonem zwyk-

łym przy promieniowaniu odpowiadającemu wiązce z reaktora, ale zaobserwowano pewne zaburzenia na grubości ok. 25 cm. W wyniku przeprowadzonych symulacji dla monoenergetycznych neutronów o energii 1 MeV i 10 MeV wykazano, że beton ciężki okazał się gorszy w osłabianiu promieniowania do grubości 30 – 40 cm. Stwierdzono natomiast, że rodzaj cementu, a uwzględniono CEM I 42,5 R i CEM II/B-V 32,5R, nie wpływał istotnie na właściwości osłonowe.

**Detekcja neutronów** odbywa się z wykorzystaniem reakcji jądrowych, w wyniku których otrzymuje się cząstki naładowane (proton lub cząstkę alfa). Jedną z podstawowych reakcji wykorzystywanych w detekcji jest reakcja  $^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p + 0,764 \text{ MeV}$ . W przeprowadzonych pomiarach wykorzystany został proporcjonalny licznik helowy wypełniony gazem roboczym izotopu  $^3\text{He}$ .

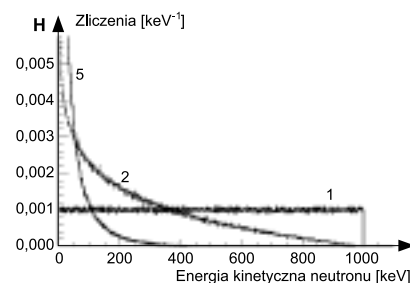
### Badania eksperymentalne

Przeprowadzono dwa programy eksperymentalne. Pierwszy polegał na pomiarze stopnia absorpcji neutronów termicznych w przegrodzie betonowej o określonej grubości, a drugi na pomiarze w tej przegrodzie stopnia tzw. termalizacji, czyli spowalniania neutronów prędkich do neutronów termicznych. Interpretując wyniki, lepszą osłonę stanowi beton, który zaabsorbuje większą liczbę neutronów w pierwszym badaniu i jednocześnie spowolni większą liczbę neutronów prędkich, co wykaże wzrost liczby zarejestrowanych neutronów termicznych w badaniu drugim. W obu przypadkach do pomiaru zastosowano licznik helowy, a neutrony otrzymano ze źródła Pu-Be, którego widmo energetyczne przedstawiono na rysunku 2.



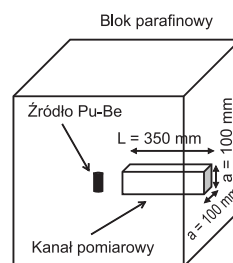
Rys. 2. Widmo energetyczne neutronów źródła Pu-Be [7-8]

W pierwszym badaniu, aby do próbki betonu dochodziły jedynie neutrony termiczne, emitowane przez źródło neutrony prędkie poddano procesowi termalizacji w bloku parafinowym otaczającym źródło Pu-Be. Wykorzystano w tym celu zjawisko rozpraszania sprężystego i niesprężystego w zderzeniach neutronów prędkich z atomami wodoru, które wchodziły w skład moderatora – parafiny, otaczającej źródło. Na rysunku 3 przedstawiono symu-



Rys. 3. Termalizacja w wodrze dla neutronów o energii początkowej 1 MeV [9]

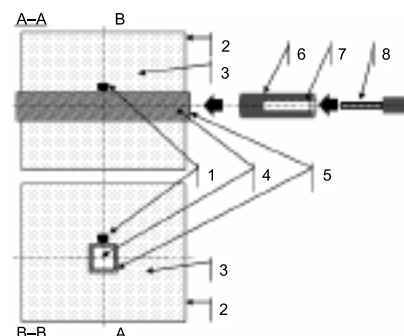
lacje zmiany energii neutronów dla moderatora wodorowego (1 – 5 zderzeń) i węgla (1 – 20 zderzeń). Schemat układu pomiarowego pierwszego programu eksperymentalnego w bloku parafinowym pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego w bloku parafinowym ze źródłem Pu-Be

W przypadku drugiego programu eksperymentalnego zastosowano układ z kanałem z blachy kadmowej przedstawiony na rysunku 5 i określono stopień spowalniania neutronów prędkich w próbkach betonowych z uwzględnieniem składu pierwiastkowego oraz wilgotności.

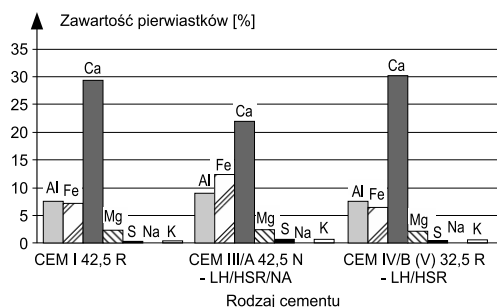
Podczas pomiarów w drugim eksperymencie tylko neutrony prędkie emitowane przez źródło przechodzą do kanału pomiarowego, w którym znajduje się badana próbka betonu. Do kanału nie docierają natomiast neutrony termiczne, gdyż jest on obłożony filtrem wykonanym z blachy kadmowej, w której absorbowane są dochodzące neutrony termiczne [10]. W związku z tym, że do próbki za filtrem dochodzą jedynie neutrony prędkie, a licznik helowy umieszczony wewnątrz próbki reje-



Rys. 5. Układ pomiarowy z kanałem z blachy kadmowej: 1 – źródło neutronów Pu-Be; 2 – obudowa zewnętrzna; 3 – parafina; 4 – kanał pomiarowy; 5 – blacha kadmowa; 6 – analizowana betonowa próbka; 7 – otwór pomiarowy dla licznika helowego; 8 – licznik helowy z przedwzmacniaczem

struje neutrony termiczne, to można powiedzieć, że powstały one na skutek spowolnienia neutronów prędkich w próbce betonu. Jest to efekt głównie zderzeń z atomami wodoru zawartego w badanej próbce, co pozwoliło z kolei na skorelowanie liczby zarejestrowanych neutronów ze stopniem uwodnienia (wilgotnością) betonu. Do przeprowadzenia badań zostały przygotowane specjalne cylindryczne próbki pozwalające na umieszczenie detektora wewnątrz w specjalnym otworze.

W celu określenia wpływu cementu o różnym składzie atomowym na właściwości osłonowe, badaniu poddano normowe zaprawy cementowe wykonane z CEM I 42,5R, CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA i CEM IV/B (V) 32,5-LH/HSR, w których można zaobserwować różną względną zawartość pierwiastków dominujących: Al, Fe i Ca. Na rysunku 6 zaprezentowano średnią zawartość



Rys. 6. Średnia zawartość pierwiastków w stwardniałym zaczynie cementowym

pierwiastków w składzie stwardniałych zaczynów cementowych zbadaną metodą spektrometrii rentgenowskiej (XRF). Aby stwierdzić wpływ dodatku polimeru, przeprowadzono również badania trzech zapraw polimero-cementowych (PCC – Polymer Cement Composites): normowej z dodatkiem dyspersji polimerowej oznaczonej jako PCC (ZN+P) oraz dwóch komercyjnie dostępnych zapraw do naprawy betonu zgodnych z PN-EN 1504-3 i oznaczonych PCC-1 i PCC-2.

## Wyniki pomiarów

Wyniki badań przedstawiono jako względną liczbę zarejestrowanych przez detektor helowy neutronów termicznych ( $W_{cp}$ ) w odniesieniu do stałej początkowej wartości – tła ( $cps_0$ ) zgodnie z zależnością:

$$W_{cp} = \frac{\Delta[cps_0; cps_t]}{cps_0} \cdot 100\%$$

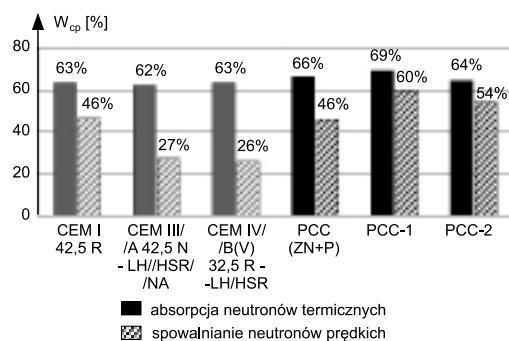
gdzie:

$W_{cp}$  – względna liczba zarejestrowanych neutronów termicznych;

$cps_t$  – liczba zarejestrowanych neutronów termicznych wychodzących z próbki betonowej;

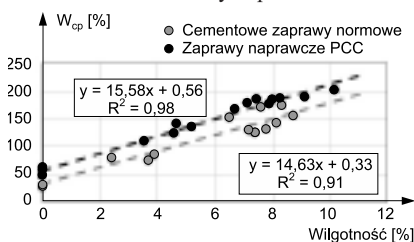
$cps_0$  – liczba zarejestrowanych neutronów termicznych bez próbki betonu w kanale pomiarowym.

Wobec początkowej liczby zliczonych przez detektor neutronów termicznych w bloku parafinowym, na osłonie grubości 4 cm zatrzymano 62 – 63%, niezależnie od rodzaju cementu wykorzystanego jako spoiwo (rysunek 7). Dodatek polimeru okazał się korzystny, gdyż właściwości osłonowe kompozytów PCC są lepsze



Rys. 7. Wyniki absorpcji neutronów termicznych i spowalniania neutronów prędkich

niż zaprawy normowej – absorpcja wynosi od 64 do 69% i jest wprost proporcjonalna do uzyskanej wytrzymałości na ściskanie. Można zaobserwować natomiast istotny wpływ rodzaju cementu na spowalnianie neutronów prędkich. Normowa zaprawa cementowa z cementem portlandzkim CEM I wykazuje prawie dwukrotnie lepsze spowolnienie strumienia neutronów prędkich niż zaprawy normowe z innymi cementami. Wyraźnie widać też wpływ polimeru na spowolnienie neutronów – zaprawy PCC spowalniają nawet dwukrotnie skuteczniej niż normowe zaprawy cementowe. Pomiar spowalniania neutronów prędkich przeprowadzono także przy różnej wilgotności próbek. Na rysunku 8 można zaobserwować wyraźną zależność liniową wzrostu względnej liczby osłabianych neutronów prędkich na przegrodzie od zawartości wody w próbce.



Rys. 8. Wyniki spowalniania neutronów prędkich do neutronów termicznych w próbkach cementowych zapraw normowych i zapraw naprawczych PCC w zależności od wilgotności

## Podsumowanie

W badaniach eksperymentalnych potwierdzono niewielki wpływ rodzaju cementu na właściwości osłonowe przegród betonowych

przed promieniowaniem neutronowym, natomiast wykazano istotny korzystny wpływ dodatku polimeru na te właściwości. Zaprawy naprawcze typu PCC wykazują lepsze właściwości zarówno jeśli chodzi o absorpcję neutronów termicznych, jak i spowalnianie neutronów prędkich. Jest to efekt wzrostu liczby atomów wodoru w matrycy wynikających z zawartości łańcuchów węglowodorowych polimerów. Proporcjonalność wyników pomiaru spowalniania neutronów prędkich w próbkach o różnej wilgotności potwierdza możliwość zastosowania tego typu metod w badaniach materiałowych, w tym pomiaru wilgotności, zawartości polimeru w PCC, czy zawartości matrycy asfaltowej w mieszance mineralno-asfaltowej MMA.

Artykuł powstał w ramach projektu nr LIDER/033/639/L-4/12/NCBR/2013 pt. „NGS-Concrete Nowej Generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym”, w ramach IV edycji programu Lider realizowanego przez NCBiR oraz grantu dziekańskiego WIL PW zrealizowanego w 2013 r. W pracy wykorzystano wyniki z realizacji inżynierskich prac dyplomowych Marcina Podolaka i Sebastiana Kochanowskiego pod kierunkiem dr. inż. Tomasza Piotrowskiego.

## Literatura

- [1] Chmielewska B., Effect of Polymer Additive on Gas Permeability Coefficient of Concrete, Advanced Materials Research, 687, 2013, Ed. Ru Wang and Zhen-gong Yang, Trans Tech Publications Ltd, 191 – 197;
- [2] Czarniecki L., Woyciechowski P., Metody oceny przebiegu karbonatacji betonu, Materiały Budowlane 2 (426) 2008, 5 – 7.
- [3] Materiały Polskiej Agencji Atomistyki – www.paa.gov.pl.
- [4] Pohl E., Technika jądrowa w budownictwie, Arkady, Warszawa 1967.
- [5] Piotrowski T., Tefelski D. B., Polański A., Skubalski J., Monte Carlo simulations for optimization of neutron shielding concrete, Cent Eur J Eng 2 (2) 2012, 296 – 303.
- [6] Tefelski D. B., Piotrowski T., Bildeanu V., Polanski A., Skubalski J., Monte-Carlo aided design of neutron shielding concretes, Bull Pol Acad Sci. Tech Sci, 61 (1) 2013, 161 – 171.
- [7] Deiev O. S., GEANT 4 Simulation of neutron transport and scattering in media. Probl At Sci Technol 3 (85) 2013, 236 – 241.
- [8] Anderson M. E., Neff R. A., Neutron energy spectra of different size  $^{239}\text{Pu}$ - $^{9}\text{Be}$  (a, n) sources, Nucl Instrum Methods, 2 (99) 1972, 231 – 235.
- [9] Peralta L., Monte Carlo simulation of neutron thermalisation in matter, Eur. J. Phys. 23 (3) 2002, 307 – 314.
- [10] Sirakov I. et al, ENDF-6 compatible evaluation of neutron induced reaction cross sections for 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116 Cd, EUR 25800 – Joint Research Centre – Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission, 2013.