

dr inż. Tomasz Piotrowski¹⁾

Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym

NGS-Concrete – New Generation Shielding Concrete against ionizing radiation

DOI: 10.15199/33.2015.09.10

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań dotyczących właściwości osłonowych betonów przed promieniowaniem jonizującym, które obejmowały pomiary liczby neutronów termicznych w kanale bloku parafinowego. Dwa specjalnie zaprojektowane układy pomiarowe pozwoliły na przeprowadzenie oznaczeń przy wyizolowanej ze źródła Pu-Be wiązki neutronów prędkich i termicznych. Zliczoną przez detektor helowy liczbę neutronów termicznych analizowano w odniesieniu do tła (liczby neutronów w pustym kanale). Badaniom poddano betony referencyjne (zwykły z kruszywem żwirowym i ciężki z kruszywem magnetytowym) oraz betony modyfikowane polimerem i tlenkiem gadolinu. Wyniki potwierdziły dużą skuteczność gadolinu w absorpcji neutronów termicznych, wpływ polimeru był korzystny jedynie w przypadku betonu zwykłego, natomiast dla betonu ciężkiego wynik był niezgodny z założeniami teoretycznymi. Dalsze badania w celu wyjaśnienia tej anomalii są konieczne.

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

Abstract. In this study there are presented first stage results of research on ionizing radiation shielding properties of concrete. They were based on measures of the number of thermal neutrons in the channel located a paraffin block. Two specially designed measuring set-ups allowed to perform measurement under fast neutron beam and thermal neutron beam isolated from the source of Pu-Be. The number of thermal neutron counted by a helium detector were analyzed in relation to the background (the number of neutrons in an empty channel). The study involved reference concretes (normal-weight concrete with gravel and heavy-weight concrete with magnetite aggregate) and concrete modified with polymer and gadolinium oxide. The results confirmed the effectiveness of gadolinium in the absorption of thermal neutrons, while the impact of the polymer was positive only in the case of ordinary concrete whereas the heavy concrete result was inconsistent with the theoretical assumptions. Further research in order to explain this anomaly are necessary.

Keywords: shielding concrete, ionizing radiation, neutron transport.

Promieniowanie jonizujące może być bardzo szkodliwe dla człowieka, szczególnie w przypadku, gdy mamy do czynienia z promieniowaniem gamma lub neutronowym. Aby ochronić żywe organizmy przed napromieniowaniem, stosuje się specjalne osłony instalacji wykorzystujących promieniowanie jonizujące, takich jak reaktory badawcze (np. reaktor „Maria” w Świerku) i instalacje medyczne. Zastosowanie promieniowania jonizującego w medycynie jest bardzo powszechne. Służy ono m.in. do:

- **diagnostyki:** rentgenodiagnostyki, tomografii komputerowej czy medycyny nuklearnej, czyli rejestracji promieniowania emitowanego przez zgromadzony w tkance radiofarmaceutyk, celowo podany pacjentowi;

- **radiologii zabiegowej:** mało inwazyjnej metody przeprowadzania zabiegów wspomaganych obrazowaniem techniką rentgenowska;

- **teleradioterapii:** niszczenia tkanki nowotworowej za pomocą promieniowania jonizującego.

Istotnym polem aplikacji osłon przed promieniowaniem jonizującym jest także ich zastosowanie w magazynach materiałów rozszczepialnych oraz przy zestalaniu odpadów promieniotwórczych.

Najważniejszym obszarem zastosowań betonów osłonowych są jednak elektrownie jądrowe. W Polsce w ostatnim czasie podjęto decyzję o rozpoczęciu procesu zmierzającego do budowy pierwszej elektrowni jądrowej. Uchwała Rady Ministrów z 28 stycznia 2012 r. w sprawie programu wieloletniego pod nazwą „Program polskiej energetyki jądrowej” ustaliła jego realizację na lata 2014 – 2030. Tymczasem pod koniec lipca br. organizacja Greenpeace opublikowała na swojej stronie internetowej **harmonogram projektu budowy** pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, z którego wynika, że miałyby ona rozpocząć dostarczanie energii dopiero w 2031 r. Inwestor, czyli spółka PGE EJ1 twierdzi, że ...*daty przed-*

*stawione w dokumencie oraz w informacji prasowej Greenpeace, w tym data uruchomienia pierwszego bloku, nie mogą być traktowane jako wiążące. Dokument przygotowany został kilka miesięcy temu przez jednego z doradców i nie został nigdy zatwierdzony przez organy korporacyjne Spółki. Tymczasem 5 sierpnia 2015 r. PGE EJ1 przedstawiła jedynie następujący **harmonogram projektu przygotowania budowy** w formie tzw. pośrednich kamieni milowych:*

- II połowa 2015 r.: złożenie w Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska (GDOŚ) wniosku o wydanie **decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach** oraz wniosku o ustalenie zakresu raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko (wraz z KIP – Kartą Informacyjną Przedsięwzięcia) i rozpoczęcie **postępowania zintegrowanego**;

- 2016 r.: rozpoczęcie badań dotyczących lokalizacji;

- 2017 r.: wskazanie preferowanej lokalizacji i rozpoczęcie opracowywania raportu o oddziaływaniu przedsię-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Ładowej; e-mail: t.piotrowski@il.pw.edu.pl

wzięcia na środowisko oraz raportu lokalizacyjnego;

- 2018 r.: uzyskanie opinii prezesa Polskiej Agencji Atomistyki (PAA) dotyczącej planowanych rozwiązań organizacyjno-technicznych;

- 2019 r.: rozstrzygnięcie **postępowania zintegrowanego**, uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach oraz ustaleniu lokalizacji i **uzyskanie decyzji zasadniczej**.

Jest to, jak widać, etap poprzedzający proces budowlany trwający w założeniu ok. 5 lat i składający się z uzyskania pozwolenia na budowę, budowy i odbiorów technicznych. Zdaniem **prof. A. Strupczewskiego** [1] należy do tego doliczyć półtora roku na rozruch, licząc od zakończenia budowy do chwili dostarczenia pierwszych MWh do sieci, następnie jeszcze kilka miesięcy na pracę próbną, zanim pierwsza w Polsce elektrownia jądrowa zostanie uznana za w pełni sprawdzoną. W wariancie harmonogramu przedstawionym przez Greenpeace założono duży bufor bezpieczeństwa na czas trwania konsultacji społecznych, które będą przeprowadzane aż cztery razy, tj. przed wydaniem decyzji o:

- uwarunkowaniach środowiskowych (GDOŚ);
- pozwoleniu na budowę (PAA);
- pozwoleniu na prace przygotowawcze (województwo, jeżeli GDOŚ nałoży obowiązek przeprowadzenia ponownej oceny oddziaływania na środowisko);
- pozwoleniu na budowę (województwo).

Wydaje się, że wcześniej czy później, elektrownia jądrowa w Polsce powstanie i zwiększy bezpieczeństwo energetyczne kraju przez dywersyfikację wykorzystywanych źródeł.

Beton jako osłona przed promieniowaniem

Ze względu na dosyć niski koszt oraz jednocześnie możliwość spełnienia funkcji konstrukcyjnych, beton jest podstawowym materiałem stosowanym do budowy osłon przed promieniowaniem jonizującym. Osłony betonowe mają zwykle dużą grubość, ale względy konstrukcyjne nie wymagają wysokiej wytrzymałości, natomiast niezbędna jest odpowiednia trwałość i szczelność. W Polsce prace badawcze dotyczące zastosowania betonu jako osłon w obiektach związanych z wytwarzaniem energii jądrowej były rozpoczęte przed 1970 r.,

a później rozwijane w związku z zamierzeniem budowy reaktora w Żarnowcu [2-4]. Tymczasem po awarii w Czarnobylu w 1986 r. i podjęciu w 1990 r. decyzji o postawieniu „Elektrowni Jądrowej Żarnowiec w Budowie” w stan likwidacji, co było jednoznaczne z zaprzestaniem budowy, badania dotyczące osłon betonowych przed promieniowaniem jonizującym były prowadzone w Polsce dużo mniej intensywnie. Inspiracją do podjęcia tego tematu badawczego na Wydziale Inżynierii Ładowej Politechniki Warszawskiej były wyniki symulacji komputerowych, które zostały przeprowadzone podczas szkolenia edukatorów na potrzeby polskiej energetyki jądrowej w INSTN (Instytucie Badań Nuklearnych) we Francji, zorganizowanym przez Ministerstwo Gospodarki w 2010 r. Badania te opublikowane w 2012 r. [5] i 2013 r. [6] przez zespół utworzony przez Kierownika Projektu pt. *Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym*, realizowanego w ramach programu LIDER wskazywały, iż optymalny skład betonu osłonowego przed promieniowaniem gamma jest inny niż w przypadku osłon przed promieniowaniem neutronowym. Wynika to ze specyficznego oddziaływania neutronów z ośrodkiem. W związku z tym, że neutrony nie mają ładunku, ich zatrzymanie może nastąpić jedynie na skutek zderzenia z jądrami atomów wchodzących w skład osłony. Prawdopodobieństwo zaistnienia takiego zderzenia opisuje tzw. przekrój czynny. Jego wartość dla danego atomu nie jest stała i zależy od prędkości (energii) neutronów oraz rodzaju reakcji, jaki opisuje. Neutron napotykać na swojej drodze jądro atomu ośrodka, może ulec zderzeniu sprężystemu, niesprężystemu i zostać zaabsorbowany. W związ-

ku z tym, że przekroje czynne na absorpcję neutronów o dużych energiach (tzw. neutronów prędkich) są małe, to aby uzyskać osłabienie strumienia neutronów prędkich, 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 (tzw. termicznych) przez atomy pierwiastków wchodzących w skład betonu. Ma to istotne znaczenie w przypadku promieniowania jonizującego emitującego głównie neutrony prędkie, czyli w tzw. reaktorach IV generacji oraz jednej z najnowszych metod teleradioterapii – terapii szybkimi neutronami (FNT – Fast Neutron Therapy).

Materiały do badań

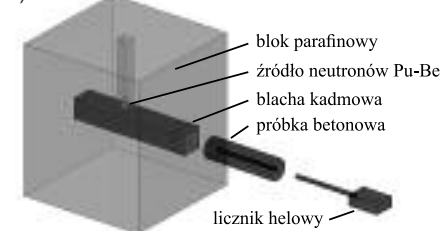
W pierwszym etapie badań, realizowanych w ramach projektu LIDER, betonami referencyjnymi był beton zwykły (Z) i beton ciężki z kruszywem magnetytowym (M) o jednakowej zawartości cementu, stosunku w/c oraz objętości kruszywa w jednostce objętości betonu. W celu uzyskania korzystnych właściwości, betony referencyjne zmodyfikowano przez dodanie polimeru w postaci żywicy epoksydowej (E) (10% w stosunku do masy cementu) oraz tlenku gadolinu (G) (2 i 5% w stosunku do masy cementu). Skład, gęstość i wytrzymałość na ściskanie betonów poddanych badaniom przedstawiono w tabeli. Celem zastosowania polimeru, jako modyfikatora, było wprowadzenie do struktury betonu atomów wodoru, które skutecznie spowalniają neutrony prędkie do neutronów termicznych. Natomiast gadolin ma duży przekrój czynny na absorpcję neutronów termicznych.

Skład i podstawowe właściwości betonów poddanych badaniom w pierwszym etapie projektu
Composition and basic properties of concretes used in a first stage of research project

Symbol betonu	Skład betonu [kg]							Właściwości	
	CEM I 42,5 R	woda	żwir 2/16	magnetyt 8/20	piasek 0/2	żywica epoksydowa	Gd ₂ O ₃	gęstość [kg/m ³]	f _c [MPa]
Z	380	152	1345	–	576	–	–	2,38	49,91
ZE	380	152	1345	–	576	38	–	2,31	37,98
ZEG2	380	152	1345	–	576	38	7,6	2,31	37,88
M	380	152	–	2260	350	–	–	3,61	56,92
ME	380	152	–	2260	350	38	–	3,45	42,14
MEG2	380	152	–	2260	350	38	7,6	3,44	39,37
MEG5	380	152	–	2260	350	38	19	3,39	40,78
MG2	380	152	–	2260	350	–	7,6	3,24	47,19
MG5	380	152	–	2260	350	–	19	3,45	47,35

Badania i uzyskane wyniki

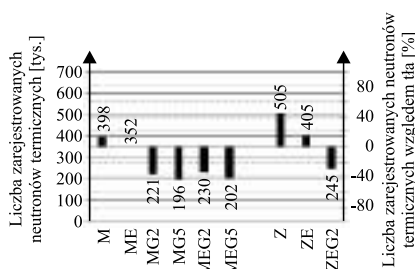
Pierwszy etap badań polegał na przeprowadzeniu pomiarów liczby neutronów termicznych za przegrodą betonową za pomocą detektora helowego. W związku z tym, że źródło Plutonowo-Berylowe (Pu-Be) użyte w badaniach emituje szerokie spektrum energetyczne neutronów, zaprojektowano dwa układy pomiarowe z wykorzystaniem bloku parafinowego, w których ze źródła wyizolowano wiązki neutronów prędkich oraz neutronów termicznych. W pierwszym układzie, przedstawionym na rysunku 1a, próbkę umieszcza-



Rys. 1. Układy pomiarowe do zliczania liczby neutronów termicznych za przegrodą betonową: a) pomiar przy wiązce neutronów prędkich; b) pomiar przy wiązce neutronów termicznych

Fig. 1. Experimental set-up systems for thermal neutron counting behind concrete barrier: a) measurement under isolated fast neutron beam; b) measurement under isolated thermal neutron beam

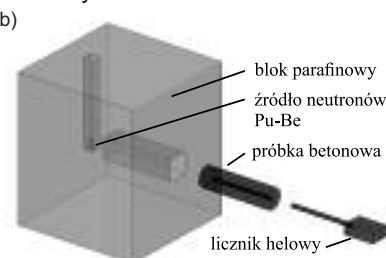
no w kanale osłoniętym blachą kadmową, która pochłania większość neutronów termicznych emitowanych przez źródło Pu-Be. W efekcie do próbki dochodziły jedynie neutrony prędkie, o czym świadczy mała liczba neutronów (ok. 350 tys.) zliczonych w ciągu 500 s przez licznik helowy umieszczony w pustym kanale (rysunek 2). Po włożeniu licznika do środka specjalnie wykonanych cylindrów z betonów referencyjnych (Z, M) liczba neutronów zwiększyła się nawet do ponad 500 tys. Dodatek polimeru powodował zmniejszenie



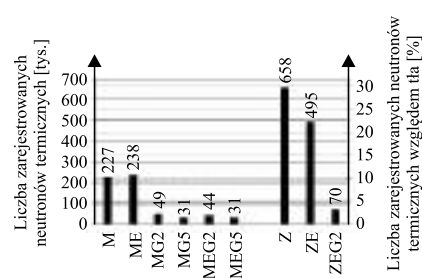
Rys. 2. Wyniki pomiaru liczby neutronów termicznych za przegrodą betonową przy wyizolowaniu ze źródła Pu-Be wiązki neutronów prędkich (tło – 350 tys. neutronów)

Fig. 2. Results of thermal neutron counting behind concrete barrier under isolated fast neutron beam (background – 350 000 neutrons)

zenie (ZE) lub eliminację tego przyrostu (ME). Najskuteczniejszy okazał się dodatek gadolinu, który zarówno we współpracy z polimerem (ZEG2, MEG2), jak i bez (ZG2, MG2) powodował spadek liczby zarejestrowanych neutronów termicznych do ok. 220 – 230 tys., czyli o 30% w stosunku do tła. Zwiększenie ilości tlenu gadolinu z 2% do 5%, w stosunku do masy cementu, powodowało dalszy spadek zarejestrowanych neutronów termicznych do ok. 200 tys. (ok. 40% w stosunku do tła), niezależnie od tego, czy modyfikowano beton polimerem czy nie.



Skuteczność gadolinu została potwierdzona badaniami w drugim układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1b. Źródło Pu-Be oddalono w nim od kanału, który nie był osłonięty blachą kadmową. W efekcie praktycznie wszystkie neutrony prędkie emitowane przez źródło zostały spowolnione do neutronów termicznych przez atomy wodoru w składzie parafiny znajdującej się w bloku. Liczba neutronów termicznych zarejestrowanych przez licznik helowy w pustym kanale w czasie 500 s, to ok. 2 220 tys. (rysunek 3). Po umieszczeniu licznika wewnątrz próbki z betonu zwykłego (Z) liczba ta spadła o ok. 70% (do 660 tys.), a w przypadku betonu ciężkiego aż o 90% (do 230 tys.). Dodanie polimeru okazało się skuteczne jedynie w przypadku betonu zwykłego (ZE) – liczba zarejestrowanych neutronów termicznych spadła do 500 tys. W przypadku betonu ciężkiego takiego spadku nie zarejestrowano. Najbardziej skuteczny okazał się ponownie dodatek gadolinu, który sprawił, że jedynie 3% (44 – 49 tys.) neutronów termicznych przechodzi przez próbkę betonową. Zwiększenie zawartości tego modyfikatora do 5% powodowało



Rys. 3. Wyniki pomiaru liczby neutronów termicznych za przegrodą betonową przy wyizolowaniu ze źródła Pu-Be wiązki neutronów termicznych (tło 2 220 tys. neutronów)

Fig. 3. Results of thermal neutron counting behind concrete barrier under isolated thermal neutron beam (background – 2 220 000 neutrons)

wał dalszy spadek rejestrowanych neutronów do ok. 1,5% w stosunku do tła (31 tys.). Zmiana nie jest już tak znacząca, więc dodawanie stosunkowo drogiego tlenu gadolinu powyżej 2% jest rozwiązaniem nieekonomicznym.

Analizując wyniki uzyskane przy wyizolowanej wiązce neutronów prędkich, należy zaznaczyć, że liczba zarejestrowanych neutronów termicznych zależy od dwóch zjawisk, których efekt jest przeciwny – spowalniania neutronów prędkich do neutronów termicznych (wzrost liczby zarejestrowanych neutronów termicznych) oraz absorpcji neutronów termicznych (spadek). W związku z tym wzrost liczby zarejestrowanych neutronów termicznych w stosunku do tła może świadczyć o tym, iż beton spowolnił neutrony prędkie, generując taką ich liczbę, której nie jest w stanie zaabsorbować – przypadek betonów niemodyfikowanych (Z, M). Natomiast jeżeli obserwujemy spadek liczby zarejestrowanych neutronów termicznych w stosunku do tła, to może być on spowodowany słabym spowalnianiem neutronów prędkich przy jednocześnie wysokim poziomie absorpcji neutronów termicznych lub w przypadku, gdy założymy spowalnianie neutronów prędkich na poziomie co najmniej betonów referencyjnych, zwiększonym poziomie absorpcji neutronów termicznych.

Wyniki uzyskane w drugim układzie pomiarowym wskazują, że przy modyfikacji betonu tlenkiem gadolinu mamy do czynienia z drugą opcją. Zaskakujący efekt uzyskano w przypadku modyfikacji betonu polimerem. Wprawdzie dla betonu zwykłego efekt jest podob-

ny jak w przypadku gadolinu, natomiast zakładając podobny poziom absorpcji neutronów termicznych dla próbek z referencyjnego betonu ciężkiego (M) i modyfikowanego polimerem (ME), co potwierdza wynik pomiaru przy wyizolowanej wiązce neutronów termicznych, należałoby się spodziewać wzrostu liczby zarejestrowanych neutronów przy wiązce neutronów prędkich. Tymczasem liczba zarejestrowanych neutronów termicznych spadała z ok. 400 tys. do 350 tys. Istotna w tym przypadku mogła być zawartość w próbkach wody wolnej i związanej chemicznie, czego efekt został potwierdzony w równoległe prowadzonych pomiarach [7 – 9]. W celu wyjaśnienia tego efektu, konieczne jest przeprowadzenie kolejnych badań.

Planowane badania i efekt końcowy

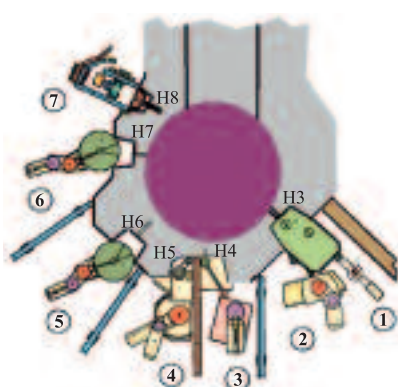
W kolejnym etapie badań w przypadku wybranych betonów zostaną przeprowadzone pomiary osłabiania wiązki neutronów, a także promieniowania gamma we wzorcowych polach promieniowania w hali kalibracyjnej Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych w Departamencie Energetyki Jądrowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych – LPD DEJ NCBJ (fotografia), a następnie w wiązce kanału poziomego H8 reaktora MARIA (rysunek 4). Jednocześnie będą wykonane symulacje komputerowe metodą Monte Carlo z wykorzystaniem kodu MCNPX [10].



Hala kalibracyjna Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych w Departamencie Energetyki Jądrowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych (LPD DEJ NCBJ)

[Źródło <http://www.ncbj.gov.pl>]

Dosimetry Calibration Laboratory Hall at the Department of Nuclear Energy National Centre for Nuclear Research (LPD DEJ NCBJ) [The source of <http://www.ncbj.gov.pl>]



Rys. 4. Przekrój poziomy rdzenia i konfiguracja kanałów poziomych reaktora MARIA

[Źródło <http://www.ncbj.gov.pl>]

Fig. 4. Horizontal cross section of the core and horizontal channels configuration in MARIA reactor [The source of <http://www.ncbj.gov.pl>]

Planowany efekt prowadzonych badań, to optymalizacja i opracowanie wytycznych do projektowania, wykonywania i kontroli jakości nowej generacji betonu osłonowego przed promieniowaniem jonizującym. Optymalizacja materiałowa będzie polegała na modyfikacji betonu na poziomie atomowym, tj. wypełniaczami zawierającymi atomy o właściwościach rozpraszających i absorbujących promieniowanie neutronowe, które spowodują uzyskanie korzystnych właściwości osłonowych bez pogorszenia innych parametrów użytkowych betonu. Opracowane rozwiązanie materiałowe powinno mieć duży potencjał patentowy. W perspektywie pozwoli na opracowanie kompozytów budowlanych (nowej generacji betonów osłonowych przed promieniowaniem jonizującym oraz zapraw do scalania odpadów promieniotwórczych) na potrzeby m.in. budowy elektrowni jądrowych w ramach „Programu polskiej energetyki jądrowej” oraz innych obiektów, w których wykorzystywane są techniki jądrowe, w tym laboratoriów badawczych i obiektów medycznych.

Wnioski

Badania przeprowadzone w ramach projektu „Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym” potwierdziły, iż beton ciężki stosowany jako osłona nie zawsze jest optymalnym rozwiązaniem materiałowym. W przypadku, gdy mamy do czynienia z promieniowaniem neutronowym, stosowanie betonu ciężkiego kil-

kanaście razy droższego od betonu zwykłego jest nieracjonalne w aspekcie technicznym i ekonomicznym. Dużo skuteczniejszym i tańszym rozwiązaniem jest optymalizacja betonu z zastosowaniem modyfikacji polimerami, a szczególnie tlenkiem gadolinu.

Składam podziękowania Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju za finansowanie projektu badawczego pt. „Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym”, realizowanego w ramach programu Lider IV (LIDER/033/639/L-4/12/NRDC/2013) przez pięcioosobowy zespół w Instytucie Inżynierii Budowlanej na Wydziale Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej. Cement do badań dostarczyła firma Lafarge, a kruszywo magnetytowe – SURICO.

Literatura

- [1] Strupczewski A., Harmonogram budowy pierwszej elektrowni jądrowej – czy jądrowka się opłaca?, www.nuclear.pl.
- [2] Pohl E., Technika jądrowa w budownictwie, Arkady, Warszawa 1967, s. 263.
- [3] Ablewicz Z., Jóźwik B., Budownictwo w technice jądrowej, Arkady, Warszawa 1978, s. 313.
- [4] Ablewicz Z., Dubrowski, W. B., Osłony przed promieniowaniem jonizującym, Arkady Warszawa 1986, s. 300.
- [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. doi: 10.2478/s13531-011-0063-0.
- [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. doi: 10.2478/bpasts-2013-0015.
- [7] Piotrowski T., Mazgaj M., Żak A., Skubalski J., Importance of atomic composition and moisture content of Cement Based Composites in neutron radiation shielding. Procedia Engineering (2015) 616 – 623. doi: 10.1016/j.proeng. 2015.06.188.
- [8] Piotrowski T., Skubalski J., Analiza zjawiska transportu neutronów przez przegrody betonowe i możliwości jego wykorzystania w badaniach materiałowych, Materiały Budowlane 5 (501) 2014, 94 – 96.
- [9] Piotrowski T., Tefelski D. B., Żak A., Skubalski J., Experiments on neutron transport through concrete member and the potential for the use in material investigation, submitted to ActaPhys Pol A (2015).
- [10] Piotrowski T., Tefelski D. B., Sokolowska J. J., Jaworska B., NGS-Concrete – New Generation Shielding Concrete against ionizing radiation – the potential evaluation and preliminary investigation, submitted to ActaPhys Pol A (2015).

Przyjęto do druku: 07.08.2015 r.