

prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki<sup>1)</sup>

# Zagadnienia długotrwałej funkcjonalności betonu w osłonach przeciwko promieniowaniu jonizującemu w elektrowniach jądrowych

*Problems of the long term concrete performance in shielding structures against ionizing radiation in nuclear power plants*

DOI: 10.15199/33.2015.09.08

**Streszczenie.** Konsorcjum „Atomshield” realizuje projekt badań stosowanych, dotyczących trwałości i skuteczności betonowych osłon przed promieniowaniem w elektrowniach jądrowych. W pracy przedstawiono genezę problematyki oraz wybrane rezultaty przeprowadzonych badań. Kryteria oceny długotrwałej funkcjonalności betonu, adekwatne do wysokiej niezawodności reaktorów generacji III+, obejmują m.in. nieprzepuszczalność betonu wobec mediów ciekłych i gazowych, wskaźniki ryzyka wystąpienia wewnętrznych zjawisk ekspansyjnych i wczesnych spękań betonu. Omówiono wdrożenie opracowanej technologii betonu z kruszywem magnetytowym do budowy masywnych bunkrów akceleratorów wysokoenergetycznych.

**Słowa kluczowe:** beton osłonowy, elektrownia jądrowa, projektowanie betonu, trwałość.

**Abstract.** The research on the long term performance of concrete shielding structures in nuclear power plants is being conducted by the „Atomshield” consortium. The motivation and preliminary results of the investigation are presented. The long term performance criteria adequate for Gen III+ reactors include impermeability of concrete for liquids and gases, risk indicators for damage driven by ASR or DEF, early age cracking parameters, and other. The successful application of concrete containing magnetite aggregate in massive structures for shielding of high energy particle accelerators is described.

**Keywords:** concrete design, long term performance, nuclear power plant, shielding concrete.

W wyniku rozstrzygnięcia konkursu NCBiR-PBS II, w 2014 r. rozpoczęło działalność konsorcjum naukowe ATOMSHIELD. Liderem konsorcjum jest Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, a partnerami Narodowe Centrum Badań Jądrowych; Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych oraz Hydrobudowa-1 Betoniarnia-Laboratorium. Celem działania konsorcjum jest realizacja projektu badań stosowanych, dotyczących trwałości i skuteczności betonowych osłon przed promieniowaniem w energetyce jądrowej. Fizyczne podstawy rozpraszania i osłabiania promieniowania jądrowego w osłonach są znane od kilkudziesięciu lat. Wiedza podstawowa, wyłożona np. w podręczniku Shultis i Faw [1], została wdrożona do praktycznego stosowania w konstrukcjach pierwszych reaktorów jądrowych, budowanych od lat pięćdziesiątych XX wieku.

Obecnie na świecie funkcjonuje ponad 430 jądrowych reaktorów energetycznych, niektóre z nich od przeszło 30 lat bez zasadniczych zastrzeżeń. Czy wobec tego potrzebne są dalsze prace dotyczące długotrwałej funkcjonalności konstrukcji osłonowych? W artykule, opracowanym na podstawie publikacji [2], przedstawiono odpowiedź na to pytanie, omawiając genezę problematyki, cele i zadania projektu oraz wybrane rezultaty badań.

## Znaczenie konstrukcji osłonowych

Reaktory jądrowe są źródłem bardzo przenikliwego promieniowania neutronowego i promieniowania gamma. Skutki długotrwałego narażenia człowieka na to promieniowanie mogą być śmiertelne, dlatego też wokół reaktorów buduje się wielowarstwowe osłony zwane biologicznymi. Podobnie zresztą osłania się inne źródła promieniowania szkodliwego dla ludzi, pochodzącego z akceleratorów cząstek, źródeł izotopowych, lamp rentgenowskich czy materiałów i odpadów radioaktywnych. Specjalny beton osłonowy jest podstawo-

wym materiałem do budowy warstwowej osłony reaktora i pierwotnego obiegu chłodzenia oraz przechowalników paliwa i odpadów radioaktywnych.

Na obecnym etapie zaawansowania programu energetyki jądrowej Polsce oferowane są nowoczesne jądrowe bloki energetyczne generacji III+, wyposażone w reaktory lekkowodne [3]. W porównaniu z reaktorami wcześniejszej generacji spełniają one znacznie bardziej zastrzone kryteria bezpieczeństwa – wysoka niezawodność urządzeń zapewnia ok. 100-krotne relatywne zmniejszenie prawdopodobieństwa ciężkiej awarii. W przypadku nowych konstrukcji reaktorów oczekuje się także wysokiej niezawodności infrastruktury, obejmującej budowlę i urządzenia podtrzymujące działanie systemów operacyjnych w elektrowni jądrowej.

W różnych wariantach technologii reaktorów generacji III+ betonowe konstrukcje osłonowe i nośne stanowią elementy rozwiniętego, pasywnego systemu bezpieczeństwa reaktorowego. Beton w konstrukcjach osłonowych jest projektowany integralnie wraz z innymi systemami zabez-

<sup>1)</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN; e-mail: mglinic@ippt.pan.pl

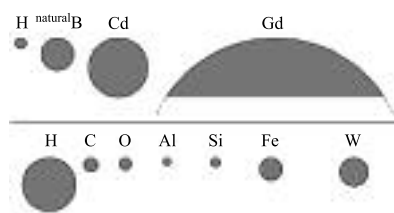
pieczeń przed uwolnieniem szkodliwego promieniowania lub radioaktywnych substancji do środowiska zewnętrznego.

## Zagadnienia projektowania betonu osłonowego

Osiągnięcie wysokiego poziomu niezawodności konstrukcji osłonowych wymaga nie tylko wyrafinowanego projektowania konstrukcyjnego, ale także odpowiednio wyrafinowanego projektowania materiałowego, w którym skład betonu, z uwagi na osłonność wobec promieniowania jądrowego, polega na selekcji składników o odpowiednim składzie pierwiastkowym. Służą do tego przede wszystkim informacje podane w kompendium Jaegera [4] oraz monografii Kaplana [5], a także w monografii Ablewicza i Józwicka [6]. Główne właściwości materiałowe, charakteryzujące osłonność betonu, to m.in.:

- makroskopowy przekrój czynny na absorpcję i wychwytywanie neutronów termicznych;
- makroskopowy przekrój czynny na usunięcie neutronów prędkich;
- liniowy współczynnik osłabiania promieniowania  $\gamma$ .

Wymienione parametry są obliczane jako średnia ważona odpowiednich wielkości fizycznych, wyznaczonych dla poszczególnych pierwiastków, z których zbudowane są składniki betonu. Interakcja promieniowania gamma z materiałem osłony w dużym stopniu zależy od liczby atomowej pierwiastków tworzących osłonę. Liniowy współczynnik osłabiania promieniowania  $\gamma$  można podwyższyć przez zwiększenie gęstości betonu, np. zastosowanie kruszywa barytowego lub z rud żelaza (tzw. kruszywa ciężkich). Na rysunku 1 pokazano w sposób uproszczony porównanie przekrojów czynnych kilku pierwiastków na osłabianie promieniowania neutronowego. Widoczne są różnice rzędów wielkości – im większy prze-



**Rys. 1. Schematyczne porównanie efektywności wybranych pierwiastków na osłabianie neutronów (pole powierzchni koła odpowiada przekrojowi czynnemu w odniesieniu do wodoru; skala obu części rysunków celowo jest różna – na podstawie [7])**  
*Fig. 1. Simplified comparison of neutron shielding efficiency of selected elements in relation to hydrogen [7]*

krój czynny (przekrój koła), tym większe prawdopodobieństwo określonej interakcji neutronów z atomami danego pierwiastka.

Pierwiastkami uprzywilejowanymi, z uwagi na wysoki przekrój czynny na osłabianie neutronów, są m.in. pierwiastki ziem rzadkich, bor (zwłaszcza w postaci izotopu  $^{10}\text{B}$ ) oraz wodor. Składniki betonu pozytywnie wpływające na jego osłonność, obecne w różnych dostępnych minerałach, powodują jednak kłopoty technologiczne przy wytwarzaniu i wbudowywaniu betonu, nie wspominając już o znacznym zwiększeniu kosztów mieszanki betonowej. Rola wody też jest ambiwalentna: jest pożądana jako źródło wodoru, ale niepożądana w formie niezwiązanej jako składnik obniżający odporność betonu na oddziaływanie środowiska agresywnego. W związku z tym projektowanie i wykonanie betonu o zwiększonej niezawodności w konstrukcjach osłonowych elektrowni jądrowych wymaga analizy oddziaływań sprzężonych: promieniowania jądrowego i oddziaływań termiczno-wilgotnościowych z oddziaływaniami agresywnymi środowiska zewnętrznego.

## Cele i zakres badań

Celem projektu „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej” realizowanego przez ATOMSHIELD jest opracowanie metod projektowania i określenie kryteriów oceny funkcjonalnej i trwałości betonu w osłonach przed szkodliwym promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej. Opracowane metody zostaną wykorzystane do przygotowania receptur i technologii betonu osłonowego o podwyższonej funkcjonalności oraz sprawdzone w skali przemysłowej w wytwórni betonu. Badania mikrostruktury betonów oraz badania długoterminowych właściwości materiałowych, w tym osłonności, będą uzupełnione symulacjami numerycznymi.

Zakres badań obejmuje opracowanie receptur betonów osłonowych do różnego zastosowania w budownictwie związanego z energetyką jądrową. Przy projektowaniu betonów osłonowych uwzględnione są różne wymagania w zależności od przewidzianego rodzaju promieniowania jądrowego oraz wymaganych warunków bezpieczeństwa i trwałości. Prace badawcze obejmują m.in. szczegółową analizę dostępnych składników do betonów osłonowych i optymalizację składu betonów oraz zaawansowane badania mikrostrukturalne i wytrzymałościowe. Zasadnicze znaczenie ma określenie kryteriów i metod wyznaczania

trwałości oraz przeprowadzenie takich badań w warunkach przyspieszonych.

Udział w projekcie czterech partnerów zapewni kompleksowe rozwiązanie zagadnienia:

- zespół z IPPT PAN projektuje materiały i wykonuje ich badania, obejmujące przede wszystkim charakterystykę mikrostruktury i właściwości fizycznych związanych ze zjawiskami transportu ciepła, cieczy i gazów, a także zapewnia koordynację badań;

- zespół z NCBJ przygotowuje i prowadzi specjalistyczne badania związane z ekspozycją próbek betonu na promieniowanie gamma i neutronowe;

- zespół z OSiMB Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych wykonuje próby w skali półtechnicznej produkcji cementu specjalnego przeznaczonego do betonów osłonowych oraz badania długoterminowych właściwości materiałowych;

- zespół z firmy Hydrobudowa-1 Betoniarnia-Laboratorium zajmuje się opracowaniem receptur betonu metodą doświadczalną na podstawie rozpoznania źródeł specjalnych składników i odpowiedniej technologii oraz wykonaniem prób technologicznych w wytwórni betonu towarowego wraz z wykonaniem elementów próbnych i elementów masywnych.

## Kryteria długotrwałej funkcjonalności betonu

Funkcje betonowych konstrukcji osłonowych obejmują przede wszystkim następujące właściwości użytkowe [2]:

- 1) nośność i sztywność przy normalnej pracy reaktora oraz integralność konstrukcyjną przy obciążeniach awaryjnych;

- 2) osłonność wobec promieniowania jądrowego, emitowanego z reaktora i innych źródeł;

- 3) przepuszczalność powietrza, pary wodnej lub wody, potencjalnie skażonych radioaktywnie z otoczenia reaktora, obiegu pierwotnego chłodzenia lub miejsca składowania materiałów promieniotwórczych do otoczenia.

Długotrwała funkcjonalność konstrukcji osłonowych i konstrukcji wspierających obejmuje zagadnienia stabilności właściwości betonu w czasie użytkowania konstrukcji, związanego ze specyficznymi oddziaływaniami lub zjawiskami w betonie (tabela). Obciążenia mechaniczne nie są tu ujęte bezpośrednio, ponieważ są przedmiotem projektowania konstrukcyjnego. Efekty długotrwałych oddziaływań i zjawisk należy uwzględnić, projektując beton na trwa-

## Długotrwałe oddziaływania na betonowe konstrukcje osłonowe [2]

Long term effects on concrete protective structures [2]

Grupa	Oddziaływanie środowiska i specyficzne zjawiska w betonie
1	oddziaływanie środowiska zewnętrznego, w postaci wpływów atmosferycznych i wód gruntowych
2	oddziaływanie podwyższonej temperatury w normalnych warunkach pracy reaktora
3	wewnętrzne zjawiska ekspansywne
4	oddziaływanie promieniowania jądrowego

łość w przewidywanym okresie eksploatacji, sięgającym co najmniej 60 lat.

Pierwsza grupa oddziaływań przedstawionych w tabeli obejmuje normowe klasy ekspozycji zgodne z PN-EN 206. Normowe, recepturowe podejście do trwałości betonu ma ograniczenia w odniesieniu do specjalnych betonów osłonowych. Wynika to przede wszystkim ze specyficznych właściwości kruszyw ciężkich lub dodatków specjalnych, niestosowanych w technologii betonów zwykłych. Kruszywa pochodzą ze złóż minerałów ciężkich, często o małej twardości i niekoniecznie łatwych do skruszenia do żądanej formy regularnych ziaren o sprecyzowanych granicach uziarnienia. Niekorzystne uziarnienie i wynikająca z tego podwyższona wodożądność stosu okruszowego radykalnie utrudniają uzyskanie małych wskaźników wodno-cementowych przy wymaganej konsystencji i jednorodności mieszanki betonowej.

Dodatki specjalne, zawierające pierwiastki o dużym przekroju czynnym na osłabianie promieniowania neutronowego, takie jak np. związki boru, negatywnie wpływają na wiązanie i twardnienie cementu [5]. Z tych powodów rozpatrywanie zagadnień trwałości betonów w konstrukcjach osłonowych wymaga podejścia funkcjonalnego, a nie recepturowego, szczególnie że podejście normowe jest z definicji ograniczone do okresu użytkowania konstrukcji nieprzekraczającego 50 lat, co jest niedostateczne w przypadku bezpieczeństwa konstrukcji elektrowni jądrowych.

Konstrukcje reaktorów na ogół spełniają wymagania dotyczące ograniczenia temperatury w wentylowanych osłonach betonowych do 65 °C w całej konstrukcji lub do 95 °C miejscowo przy normalnej eksploatacji reaktora. Na podstawie analizy oddziaływań środowiskowych na beton osłonowy w otoczeniu reaktora stwierdzono [2], że sprzężenie oddziaływań termicz-

nych ze zjawiskami transportu wilgoci jest czynnikiem decydującym o długotrwałej stabilności właściwości mechanicznych i fizycznych betonu. W związku z tym zaproponowano wskaźniki długotrwałej funkcjonalności betonu, adekwatne w zastosowaniach osłonowych, charakteryzujące przede wszystkim mikrostrukturę i nieprzepuszczalność betonu.

## Zapobieganie spękanom i wewnętrznym zjawiskom ekspansywnym

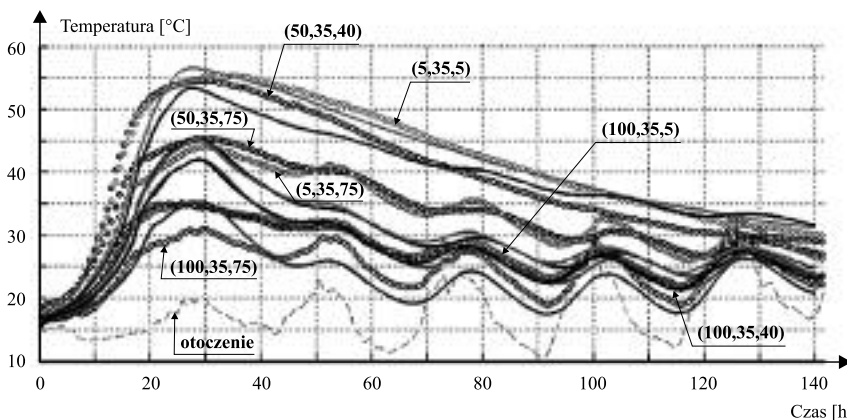
Dodatkowym kryterium projektowania betonu jest monolityczność konstrukcji, rozumiana jako zapobieganie występowaniu rozwarstwień i wczesnych spękań betonu. Analiza Zergera i Noëla [8], dotycząca usterek zaobserwowanych w trakcie budowy i uruchamiania elektrowni jądrowych, wykazała wprawdzie nieliczne usterki związane z pracami betoniarскими, ale przypisano im istotne znaczenie z uwagi na obniżenie ochrony radiologicznej. Wyszczególniono przede wszystkim spękania płyty fundamentowej pod budynkiem reaktora, związane z dużą objętością wbudowanej jednorazowo mieszanki betonowej.

Przyjęta w badaniach ATOMSHIELD metoda polega na spowolnieniu i obniżeniu wydzielania ciepła podczas hydratacji cementu, zwłaszcza przez zastosowanie cementów specjalnych o niskim ciepłe hydratacji LH, zarówno z grupy cementów portlandzkich, jak i wieloskładnikowych. Recep-

turowe założenia są weryfikowane na podstawie obliczeń rozkładu temperatury w twardniejącym betonie i monitorowania temperatury w elementach masywnych (rysunek 2). Do obliczeń niezbędne są właściwości termofizyczne twardniejącego betonu osłonowego, które nie są dostępne w przypadku betonów zawierających kruszywa specjalne. W związku z tym do identyfikacji parametrów modelu wykorzystuje się analizę odwrotną problemu przepływu ciepła w twardniejącym betonie.

Ryzyko wystąpienia wewnętrznych zjawisk ekspansywnych ASR (destrukcja wewnętrzna betonu na skutek reakcji między wodorotlenkami sodu i potasu obecnymi w cieczy porowej i reaktywną krzemionką w kruszywie) oraz DEF (wewnętrzna destrukcja siarczanowa, tzw. powstawanie opóźnionego ettringitu) w betonie nie było do niedawna rozpatrywane przy projektowaniu osłon w elektrowniach jądrowych [9]. W kilku opublikowanych pracach stwierdzono szkodliwą reakcję ASR w kluczowych konstrukcjach infrastruktury elektrowni jądrowych, np. w Ikata (Japonia), Seabrook (USA), Gentilly 2 (Kanada), dlatego prace badawcze w ramach ATOMSHIELD objęły zarówno identyfikację minerałów potencjalnie reaktywnych w ziarnach kruszyw specjalnych, jak też mikroskopową identyfikację produktów reakcji. Na fotografii 1 pokazano obecność mikrokrystalicznego kwarcu w ziarnach hematytu, a na fotografii 2 wypełnione żelazem spękania przechodzące przez ziarna i matrycę.

Przyspieszone badania ekspansji próbek betonu z kruszywem hematytowym, przeprowadzone zgodnie z normą ASTM C1260, wykazały wydłużenie próbek

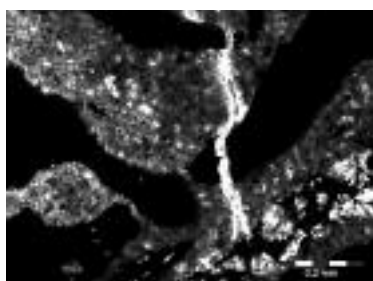


Rys. 2. Widok elementu masywnego, w którym przebiega pomiar rozkładu temperatury w twardniejącym betonie oraz przykładowe porównanie temperatury zmierzonej (kółka) z wynikami modelu numerycznego (linie ciągłe)

Fig. 2. Temperature development in hardening concrete in a massive element (dots – measured, lines – numerical prediction)



**Fot. 1. Mikroskopowy widok mikrokrystalicznego kwarcu w ziarnach hematytu**  
Photo 1. Microcrystalline quartz in hematite grain



**Fot. 2. Wypełnione żelem spękania zaprawy cementowej poddanej przyspieszonym testom ASR [10]**  
Photo 2. ASR gel in cement mortar [10]

o 0,3%, czyli znacznie przekraczające granicę reaktywności kruszywa.

Oceny ryzyka wystąpienia szkodliwej destrukcji siarczanowej DEF, zgodnie z [9], dokonuje się na podstawie składu cementu, zawartości alkaliów czynnych w betonie, warunków ekspozycji środowiskowej na wilgoć oraz maksymalnej temperatury betonu podczas twardnienia. Maksymalna temperatura twardniejącego betonu jest przedmiotem analizy przy wspomnianym zapobieganiu spękanom termicznym.



**Fot. 3. Widok pompy podającej mieszankę betonową o gęstości min. 3200 kg/m<sup>3</sup> do szalunków bunkra akceleratorów wysokoenergetycznych w Ośrodku Radioterapii w Warszawie** [Fot. Grzegorz Nowowiejski]  
Photo 3. Pumping of concrete mixture > 3200 kg/m<sup>3</sup> into formwork of particle accelerator building in Warsaw

## Wdrożenie technologii betonu z kruszywem magnetytowym

Trudności z uzyskaniem jednorodnej mieszanki zawierającej kruszywa specjalne (często o niekorzystnym kształcie ziaren i zwiększonej wodozadności) mogą przyczynić się do segregacji mieszanki i powstawania wczesnych spękań betonu, podobnie jak niedostateczna lub nadmierna zawartość cementu. Konieczna jest więc staranna selekcja składników mieszanki i odpowiedni dobór ich proporcji, aby uniknąć wczesnych spękań betonu uznanych za szczególnie szkodliwe z uwagi na długotrwałą funkcjonalność betonu w konstrukcjach osłonowych.

Skuteczność opracowanego sposobu projektowania składu betonu osłonowego zademonstrowana została przez wdrożenie technologii betonu z kruszywem magnetytowym na budowie Ośrodka Radioterapii z Oddziałem Onkologicznym Centralnego Szpitala MSW w Warszawie przy ul. Wołoskiej. Projektem mieszanki betonowej, jej wykonaniem i dostarczeniem zajęła się Hydrobudowa-1 Betoniarń-Laboratorium. Betonowanie odbywało się w okresie 7 marca – 20 kwietnia 2015 r. i obejmowało ściany trzech bunkrów o objętości ok. 200 m<sup>3</sup> każdy oraz trzy stropy bunkrów o objętości ok. 140 m<sup>3</sup> każdy (fotografia 3). Zaprojektowano klasę wytrzymałości betonu C 25/30.

Podczas produkcji gęstość mieszanki betonowej wynosiła 3300 – 3400 kg/m<sup>3</sup>, konsystencja mierzona opadem stożka 17 – 20 cm, natomiast wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach 40 – 50 MPa. Przy betonowaniu, z powodu dużej gęstości mieszanki betonowej i parcia na deskowanie, naprężenia w ściągach deskowania były monitorowane za pomocą umieszczonych tensometrów, a szybkość betonowania dostosowano do zarejestrowanych naprężeń. W przypadku zbliżania się naprężeń do wartości granicznych betonowanie było przerywane lub spowalniane do momentu, aż naprężenia zaczynały się zmniejszać. Szybkość betonowania ścian bunkrów wynosiła: pierwsze 80 – 100 m<sup>3</sup>: ok. 24 m<sup>3</sup>/h, kolejne 60 – 70 m<sup>3</sup>: ok. 12 m<sup>3</sup>/h, kolejne 20 – 30 m<sup>3</sup>: ok. 20 m<sup>3</sup>/h i ostatnia część, tj. ok. 10 – 15 m<sup>3</sup>: 6 m<sup>3</sup>/h. Betonowanie stropów przeprowadzono za pomocą pompy przy prędkości ok. 18 m<sup>3</sup>/h.

Omówione wdrożenie nie dotyczyło wprowadzenia obiektu energetyki jądrowej, ale zgromadzone doświadczenia w skali

przemysłowej mają duże znaczenie, ponieważ dotyczą nie tylko projektowania składu betonu osłonowego, ale całej technologii wykonania i wbudowania. W związku z tym przyczynią się do osiągnięcia celów ATOMSHIELD, ponieważ oczekuje się, że jego rezultaty będą służyły projektantom i producentom materiałów osłonowych oraz nadzorowi monitorującemu budowę i stan obiektów energetyki jądrowej.

Artykuł przygotowano w ramach projektu „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej”, PBSII/A2/15/2014, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2014 – 2016.

## Literatura

- [1] Shultis J. K., Faw R. E. (1996) Radiation Shielding, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [2] Glinicki M. A. (2015) Długotrwała funkcjonalność betonu w konstrukcjach osłonowych elektrowni jądrowych. IPPT PAN, Warszawa.
- [3] Kielbasa W. (2012) Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych z reaktorami III generacji oferowanych Polsce. Część III. Podstawowe cechy bezpieczeństwa rozwiązań projektowych jądrowych bloków energetycznych oferowanych Polsce, Wiadomości Energetyczne, Rok LXXX, nr 6, 6 – 11.
- [4] Jaeger R. G., ed. (1975) Engineering Compendium on Radiation Shielding. Vol. II. Shielding Materials, Springer-Verlag, New York.
- [5] Kaplan M. F. (1989) Concrete radiation shielding: nuclear physics, concrete properties, design and construction. Longman Scientific & Technical, Harlow, England.
- [6] Ablewicz Z., Józwiak B. (1978) Budownictwo w technice jądrowej. Arkady, Warszawa.
- [7] Craft A. E. (2012) Design, construction, and demonstration of a neutron beamline and a neutron imaging facility at a Mark-I Triga reactor, PhD thesis, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.
- [8] Zerber B., Noël M. (2011) Nuclear power plant construction: What can be learned from past and on-going projects? Nuclear Engineering and Design, 241, 8, 2916 – 2926.
- [9] Coppel F., Lion M., Vincent Ch., Roure T. (2012) Approaches developed by EDF with respect to the apprehension of risks of internal expansion of the concrete on nuclear structures: Management of operating power plants and prevention for new power plants, International Workshop NUCPERF 2012, Cadarache, France.
- [10] Józwiak-Niedzwiedzka D., Glinicki M. A., Gibas K., Jaskulski R., Denis P., Garbaciak A. (2015) Expansion due to alkali-silica reaction of heavy aggregates used for nuclear shielding concrete, Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites, BMC-11, Warsaw, September 28 – 30, 2015, 353 – 360.

Przyjęto do druku: 22.07.2015 r.