

## **O wpływie promieniowania jonizującego na beton, przegląd stanu wiedzy**

### **On the influence of ionizing radiation on concrete – state of the art**

#### **1. Wstęp**

Zmiany właściwości betonu stwierdzone w szeregu obiektów narażonych na promieniowanie jonizujące w ciągu wieloletnich okresów można nazwać oznakami starzenia, wynikającego z sumowania wpływu napromienienia ze zmianami, spowodowanymi naturalnymi procesami dojrzewania betonu w warunkach zewnętrznych, związanych ze zmianami temperatury, cyklami zamrażania, agresji chemicznej, karbonatyzacji i innymi. Zmiany te były przedmiotem badań od wielu lat [Clark (1958), Dubrovskii i in. (1966), Hilsdorf i in. (1978)], prowadzonych w celu oceny trwałości konstrukcji oraz osłon reaktorów i składowisk odpadów radioaktywnych. Nie wszystkie te badania ograniczały się do betonów wykonanych ze zwykłych kruszyw, które były wówczas głównie stosowane, a Hilsdorf i in. (1978) uwzględnili również betony specjalne, z kruszywa barytowego i magnetytowego. Badania te doprowadziły między innymi do wniosku, że podczas przewidywanych wówczas okresów eksploatacji elektrowni jądrowych zmiany właściwości betonu nie spowodują szkodliwego spadku skuteczności osłon.

Zagadnienie zmian własności betonu w wyniku dużych dawek promieniowania zostało podjęte w ostatnich latach, a wpływ długotrwałego promieniowania na składniki i mikrostrukturę betonu jest przedmiotem współczesnych badań i obserwacji. Jest to spowodowane okolicznością, że wiele elektrowni jądrowych na świecie osiąga lub zbliża się do wieku przewidzianego jako graniczny, a przedłużanie eksploatacji staje się poważnym zagadnieniem. W USA w ponad 70 elektrowniach podjęto starania o zezwolenia na eksploatację po 60 latach, a dalsze przedłużanie też jest rozważane. Podjęcie takich decyzji wymaga jednak przede wszystkim zapewnienia trwałości betonu w osłonach i innych elementach betonowych zastosowanych w elektrowni.

Trwałość konstrukcji betonowych reaktorów i zbiorników poddanych promieniowaniu zależy od wielu czynników i była poprzednio wstępnie rozważana [Brandt (2015)]. Dalsza analiza zachodzących zmian i dokładne poznanie procesów starzenia są konieczne, aby określić niezbędne działania i zapewnić bezpieczeństwo użytkowania istniejących i planowanych nowych obiektów. Opublikowany

#### **1. Introduction**

Modifications of concrete properties after longterm exposure to ionizing radiation may be considered as due to ageing. Their effects are related to longterm radiation together with the natural processes of cement paste maturing in the exploitation conditions, i.e. in varying temperature and humidity, freezing and thawing cycles, chemical aggression, etc. These modifications were studied since many years, e.g. by Clark (1958), Dubrovskii et al. (1966), Hilsdorf et al. (1978) in order to determine the durability of concrete shields in nuclear reactors and concrete screen for storage of radioactive waste. Not all investigations were limited to concretes with ordinary aggregate that was mostly used in that time and in Hilsdorf et al. (1978) also concretes with barite and magnetite aggregates have been considered and it was generally agreed that in the forecast periods of exploitation of Nuclear Power Plants (NPP) no modifications of concrete properties in the shields may decrease their efficiency.

The problem of durability of concrete properties after high radiation doses was subjected to advanced studies in last years and the influence of longterm radiation on concrete components and their microstructure was studied in several advanced laboratories. The main reason is that many NPPs in the world reached their scheduled age or approach it and their further exploitation presents serious problem. In over 70 NPPs in the USA there are initiated actions to extend exploitation over 60 years and even longer extensions are considered. Such actions require full assurance of durability of concrete shields and other concrete elements.

The durability of concrete structures in reactors and other installations is a function of multiple factors and was described in several papers, e.g. Brandt (2015), Brandt, Józwiak- Niedźwiedzka (2013). Rosseel, Maruyama et al. (2016) extensive review of studies on the effects of radiation on concrete were presented, where several gaps in present knowledge of this issue were indicated.

In view of foreseen construction of nuclear reactors in Poland present review of the state of knowledge and analysis of the ageing

przegląd zagadnienia wpływu promieniowania jonizującego na właściwości betonowych osłon [Brandt, Józwiak-Niedźwiedzka (2013)] wskazywał na konieczność dalszych pogłębionych badań, których kierunki i wyniki są przedstawione w tym opracowaniu, opartym na najnowszych znanych publikacjach.

## 2. Znaczenie wpływu promieniowania na beton w osłonach

Już 60 lat temu w kilku ośrodkach badawczych podjęto próby określenia poziomów napromienienia, zakładając sumowanie się rozmaitych czynników, mogących doprowadzić do znacznej degradacji betonu. Jedną z pierwszych publikacji był raport R. Clarka (1958) z 1958 roku, który określił skutki tego wpływu jako nieznaczące i trudne do odróżnienia od zmian wywołanych podwyższoną temperaturą betonu. Jednakże badania opublikowane przez Dubrovskii'ego i in. (1967) w 1967 roku, a wydane rok później w języku angielskim, zawierały inną ocenę i wskazywały na wyraźne pęcznienie ziaren kruszywa pod wpływem napromienienia i dalsze zjawiska, świadczące o destrukcji betonu.

Podstawowe pytania odnoszące się do wpływu promieniowania na beton sformułowali Hilsdorf i in. (1978) w następującej formie:

- a) Czy promieniowanie wpływa na właściwości mechaniczne betonu, a zwłaszcza na następujące:
  - wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie,
  - moduł sprężystości,
  - współczynniki rozszerzalności termicznej i przewodnictwa cieplnego,
  - właściwości osłonowe.
- b) Jaka jest krytyczna dawka promieniowania, po przekroczeniu której można spodziewać się poważnych zmian właściwości i lokalnych uszkodzeń betonu?
- c) Czy ta krytyczna dawka promieniowania może być przekroczona w okresie normalnej eksploatacji w istniejących lub projektowanych konstrukcjach betonowych w elektrowniach atomowych ?

Hilsdorf i in. (1978) zebrali dostępne wówczas wyniki i wykazali spadek wytrzymałości na ściskanie i nawet większy na rozciąganie, jako skutki wpływu strumienia neutronów, przy czym stwierdzono zależność od rodzaju neutronów (powolne i prędkie) oraz składu betonu (rodzaj cementu i kruszywa). Zauważono także zmniejszenie modułu sprężystości i stwierdzono możliwość wzrostu pęcznienia wraz ze spadkiem wytrzymałości. Wartość krytyczną napromienienia określono na około  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, zależną od rodzaju neutronów, natomiast występujący równocześnie wpływ temperatury betonu oceniono jako mniej znaczący.

Napromienienie przekraczające tę wielkość krytyczną powoduje także wyraźny wzrost objętości betonu, wpływając na mikrostrukturalne zmiany w kruszywie i jego składzie mineralnym; te zmiany mogą wywoływać uszkodzenia w betonie. W latach pięćdziesiątych

processes are proposed in order to suggest necessary steps in ensuring safe exploitation of existing and future NPPs.

## 2. Influence of irradiation on concrete shields

Already 60 years ago investigations were initiated in a few research centres in order to determine the levels of concrete irradiation. For that aim, it was assumed that various influences may be summed up leading to considerable degradation of concrete. That problem was considered as early as in 1958 by R. Clark who estimated the irradiation effects as negligible and difficult to distinguish from concrete modifications, due to the influence of elevated temperature. Or, the test results published later by Dubrovskii et al. (1967) and translated into English in 1968 supported different opinions. Clear swelling of the aggregate grains as well as other indications of concrete destruction have been observed after irradiation.

Basic questions related to the influence of radiation on concrete have been formulated by Hilsdorf et al. (1978) in a following way:

- a) Does radiation influences the mechanical properties of concrete, and particularly:
  - compressive and tensile strength,
  - elasticity modulus,
  - thermal expansion and thermal conductivity coefficients, and
  - shielding properties.
- b) What is a critical dose of radiation, after which serious modifications of concrete properties and local destructions may be expected?
- c) Whether that critical dose of radiation may appear during the design period of exploitation of existing or designed NPPs?

In this Hilsdorf's et al. (1978) paper all available experimental results were collected and a decrease of concrete compressive strength was shown as well as even higher of tensile strength. These changes were attributed to the impact of neutron flux, and the influence of their energy (slow and rapid neutrons) and of the concrete composition (kind of cement and aggregate) have been observed. Decrease of the modulus of elasticity and possible increase of creep were noted together with the decrease of concrete strength. Critical value of irradiation was determined as equal to approximately  $1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, and related to the kind of neutrons, while the influence of concrete temperature was considered as less important.

Irradiation over that level results in a clear increase of concrete volume, producing also microstructural modifications of aggregate and of microcrystalline structure of cement paste. All these modifications may introduce concrete destructions. In the years fifties it was observed that density of silicates and quartz in the aggregate was decreasing after the influence of rapid neutrons. The volume of quartz is decreasing by 6.6 %. The influence of  $\gamma$  radiation on concrete was not determined at that time, but it was suggested

stwierdzono, że gęstość minerałów glinokrzemianowych i kwarcu w kruszywie ulega zmniejszeniu pod działaniem szybkich neutronów. Również objętość kwarcu zmniejsza się o 6,6% [przemiana  $\beta \rightarrow \alpha$ ]. Wpływ promieniowania  $\gamma$  na beton nie został w tym czasie rozpoznany, ale przypuszczano, że graniczne napromienienie może być rzędu  $10^9$  Gy, co może także przyczynić się do destrukcji betonu.

Na podstawie badań doświadczalnych omówionych przez Hilsdorfa i in. (1978) przyjęto odpowiednio wartości graniczne w przypadku szybkich neutronów  $10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> oraz  $2 \times 10^8$  Gy dla promieniowania  $\gamma$ . Te wielkości i wnioski były w późniejszym okresie kwestionowane ze względu na łączenie wpływu wysokiej temperatury i napromienienia, między innymi przez Maruyama i in. (2013). Okazało się bowiem, że warunki przeprowadzenia badań doświadczalnych, na których oparli swe wnioski Hilsdorfa i in. (1978) znacznie różniły się od tych, w których znajdują się elementy betonowe w reaktorach rozmaitych typów i odmian, budowanych w wielu krajach w następnych latach. Stwierdzono także niezgodności w badanych właściwościach betonów, określaniu rodzajów spoiwa oraz w wymiarach próbek i temperaturze betonu, chociaż sformułowanie zagadnień trwałości i próby ich rozwiązywania proponowane w 1978 roku stanowią nadal ważny poziom odniesienia. Szczegółowe analizy odnoszące się do ówczesnych wyników prowadzą między innymi do wniosków, że w przypadku osłon reaktorów (Pressurized Water Reactor) temperatura betonu nie przekraczała 65°C, więc nie była raczej decydującym czynnikiem destrukcyjnym [Brandt i Józwiak-Niedźwiedzka (2013)]. Zauważono także, że zasadniczy wpływ na trwałość osłon ma wytrzymałość betonu na ściskanie, podczas gdy niektóre doświadczenia i wnioski Hilsdorfa i in. (1978) wynikały z pomiarów wytrzymałości próbek na rozciąganie.

Wobec braku informacji o dawniejszych badaniach oraz konieczności poznania wpływu przekroczenia wartości granicznych, wymienionych powyżej i możliwości ich przekroczenia w okresie eksploatacji konstrukcji betonowych, związanych z energią jądrową, podjęto dalsze prace badawcze. Ocena znaczenia wpływu promieniowania, wobec poważnej liczby „starzejących się” elektrowni jądrowych na świecie, które wymagają podejmowania decyzji o ich losie, zwiększa się systematycznie. Co więcej, także osłony betonowe składowisk odpadów radioaktywnych mogą ulegać destrukcji. Zagadnienia wpływu promieniowania na beton w osłonach reaktorów jądrowych mają jednak przede wszystkim znaczenie przy projektowaniu nowych elektrowni.

### 3. Ocena wpływu napromienienia betonu na podstawie dawniejszych badań

Na podstawie przeglądu współczesnych prac Ablewicz i Dubrowski (1986) zaproponowali następujące dane, charakteryzujące obecne źródła promieniowania:

- gęstość strumieni neutronów, opuszczających reaktor  $5 \cdot 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>·s;
- strumień neutronów z izotopowego źródła  $10^3$ - $10^4$  n/cm<sup>2</sup>·s.

Natężenie promieniowania  $\gamma$  :

that limit of irradiation was approximately  $1 \cdot 10^9$  Gy, after which concrete destruction may be expected.

After the experimental results collection by Hilsdorf et al. (1978) corresponding limit values were admitted for quick neutrons  $1 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> and  $2 \times 10^8$  Gy for  $\gamma$  radiation. These values and conclusions were later questioned among the other by Maruyama et al. (2013), because the influence of irradiation was combined with that of elevated teemperature. It appeared that Hilsdorf's conclusions were based on the tests in experimental conditions which were different from that in which concrete shields are usually exploited in various types of NPPs, in different countries. It has been also observed that concrete compressive strength has a dominant importance on the durability of shields while Hildorf's investigations were based on the results from tensile tests. Nevertheless, conclusions related to the problems with durability proposed in 1978 are up to now a basic knowledge for later studies. Particular analyses of these test results allow to conclude, that i.a. for Pressurized Water Reactor (PWR) installations temperature of concrete does not exceed 65°C, therefore it was not a decisive factor of destruction [Brandt (2015), Brandt and Józwiak-Niedźwiedzka (2013)].

It was considered necessary to determine all consequences of situations when threshold values of irradiation are exceeded during exploitation of NPP and that was why new series of investigations were initiated. Determination of the influence of radiation on concrete is particularly important because large number of NPPs that are approaching the limit age and appropriate decisions on their further activity are necessary. Furthermore, concrete shields in storages of nuclear wastes and in other installations may also be endangered, but the most important is the problem of the durability of concrete for designing of new power plants.

### 3. Investigations of concrete irradiation in the past century

After available information collected by Ablewicz and Dubrowski (1986) the following values of radiation in actual reactors were suggested:

- density of neutron flux leaving a reactor  $5 \cdot 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> s;
- density of neutrons from an isotope source  $10^3$ - $10^4$  n/cm<sup>2</sup> s.

Intensity of  $\gamma$  radiation:

- behind reactor container  $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup>s;
- from isotope source  $10^2$  - $10^3$  MeV/cm<sup>2</sup> s,

and these values may be different in different installations.

Neutron flux in the reactor core may reach  $10^{13}$ - $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s, and even  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>s, while behind reactor flux is lower by 2-3 orders of magnitude.

Shields and other construction elements may be subjected to radiation of approximately  $10^{12}$ - $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s and  $10^{12}$ - $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup>s. After 30 years of exploitation the radiation of concrete shields

- za zbiornikiem reaktora  $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup>·s;
- ze źródła izotopowego  $10^2$  -  $10^3$  MeV/cm<sup>2</sup>·s,

Wielkości te mogą się zmieniać w zależności od rodzaju urządzeń.

Strumienie neutronów w rdzeniu reaktorów energetycznych osiągają  $10^{13}$ - $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·s, a nawet  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>·s, natomiast poza reaktorem są o 2-3 rzędy wielkości mniejsze.

Oslony i konstrukcje budowlane mogą być poddane promieniowaniu rzędu:  $10^{12}$ - $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>·s i  $10^{12}$ - $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup>·s. Po trzydziestoletniej eksploatacji może to powodować napromienienie osłon i konstrukcji wynoszące  $10^{21}$ - $10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> oraz  $10^{11}$ - $10^{12}$  Gy.

Przewody z medium chłodzącym w obiegu pierwotnym mogą dawać  $10^7$ - $10^8$  MeV/cm<sup>2</sup>·s, a w okresie 30 lat dawka pochłonięta może wynosić  $10^6$ - $10^8$  Gy. Oslony zbiorników z produktami rozpadu mogą podlegać promieniowaniu rzędu  $10^{10}$ - $10^{12}$  MeV/cm<sup>2</sup>·s, co w skali jednego roku powoduje napromienienie rzędu  $10^7$ - $10^8$  Gy.

Badania i obserwacje prowadzone w byłym ZSRR w latach siedemdziesiątych i wcześniej doprowadziły do opinii, że przy napromienieniu w granicach od 2 do  $7 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> powstają niewielkie rysy w betonie, spadek współczynnika odkształcalności liniowej o około 25 %, zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 26% i na rozciąganie sięgające 46%. Zmiany te były zależne od rodzaju kruszywa.

Zmiany właściwości betonu przypisywane były różnym czynnikom, a przede wszystkim:

- uszkodzeniom składników mineralnych kruszyw powodującym dodatkowe odkształcenia,
- anizotropią właściwości ziaren kruszywa, powodującą znaczne naprężenia wewnętrzne, a także mikropęknięcia w matrycy cementowej, czemu może towarzyszyć powstawanie rys w elementach betonowych, które inicjują dalsze procesy niszczenia betonu.

Badania przeprowadzone po 12 latach eksploatacji reaktora w Oak Ridge nie pozwoliły na stwierdzenie zmian we właściwościach betonów w osłonach, przy czym oceniano dawkę neutronów epitermicznych i prędkich na 4 do  $8 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>, pochłoniętą przez te osłony, Fillmore (2004). Również badania przeprowadzone w Hanford (USA) przy napromienieniu ocenianym na  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> i po wielu cyklach temperatury między 180 °C a otoczeniem nie doprowadziły do stwierdzenia większych zmian współczynników Poissona, przez Nausa (2010), na podstawie badań opublikowanych jeszcze w 1981 roku (Defigh-Price C. (1981)). Wysłunęto nawet sugestie [Buck (1988)], że duże napromienienie nie wpływa na beton, a jedynie Clifton (1991) zalecał dalsze badania w tym zakresie.

Na podstawie uzyskanych wyników przypuszczano, że promieniowanie ma mniejszy wpływ na matrycę cementową niż na kruszywo, ponieważ rysy w betonie były spowodowane odkształceniami ziaren kruszywa. Z tego powodu wskazywano na celowość zmniejszenia ilości kruszywa w betonie oraz ograniczenie wielkości

and other elements may reach approximately  $10^{21}$ - $10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> and  $10^{11}$ - $10^{12}$  Gy.

Ducts with cooling media in primary circulation may be irradiated up to  $10^7$ - $10^8$  MeV/cm<sup>2</sup>·s, and after 30 years the dose may reach  $10^6$ - $10^8$  Gy. The shields for containers with radioactive waste may be subjected to irradiation of  $10^{10}$ - $10^{12}$  MeV/cm<sup>2</sup>·s, it means that in a year the dose would be equal to approximately to  $10^7$ - $10^8$  Gy.

Investigations and observations in the former Soviet Union in the 70th and earlier, lead to a conclusion that for irradiation between 2 to  $7 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> minor cracks in concrete may be expected, modulus of linear deformability may decrease by approximately 25% and compressive strength by 26%, while tensile strength would decrease by 46%; these reductions were considered as related to the kind of aggregate. Modifications of properties of the concrete were explained by different factors, mainly:

- damages in crystalline phases of aggregate that produce additional deformations,
- anisotropy of aggregate grains that induce high internal stress and microcracks in cement matrix;

These phenomena may cause cracks in concrete elements also and initiate further degradation of concrete.

Investigations carried on by Fillmore (2004) after 12 years of exploitation of the reactor in Oak Ridge (USA) did not supply proofs for any modifications in concrete properties in the shields. It was assumed that the shields absorbed epithermic and rapid neutrons with the dose of 4 do  $8 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>. The tests made in Hanford (USA) after irradiation of approximately  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> in several thermal cycles between 180 °C and environment temperature did not allow to observe appreciable modifications of the Poisson's coefficient [Naus (2010)] after the tests published in 1981, (Defigh-Price C. (1981)). It was even suggested by Buck (1988) that high irradiation did not influence concrete and only in the paper by Clifton (1991) the necessity of further studies were suggested.

On the basis of available results it was supposed that the influence of radiation is less important for cement matrix than for aggregate and that the cracks in concrete were induced by deformations of the aggregate grains. It was the reason that a decrease of the aggregate volume in concrete was suggested together with limitation of the grain diameters, because the importance of these effects may depend on the quality and grading distribution of aggregate. However, after last decade the general opinion that the influence of high doses of radiation on concrete properties is negligible is modified.

#### 4. Results of recent investigations of influence of irradiation on concrete

In the paper by Sopko et al. (2004) new test results of  $\gamma$  radiation applied to ordinary concrete at age of 90 days were presented. The concrete strength was determined on specimens  $0.4 \times 0.1 \times 0.1$  m with relatively large dispersion but mean values indicated a 5%

ziaren, ponieważ powstające uszkodzenia mogą zależeć głównie od rodzaju i składu ziarnowego kruszywa. Jednak w ostatnim dziesięcioleciu pogląd o niewielkim wpływie dużych dawek napromienienia na właściwości betonu w osłonach uległ zmianie.

#### 4. Wyniki badań wpływu promieniowania na beton według nowszych źródeł

W artykule Sopko i in. (2004) przedstawiono wyniki doświadczeń polegających na poddaniu zwykłego betonu, po 90 dniach dojrzewania, promieniowaniu  $\gamma$  w zakresie od 300 do 550 kGy. Wytrzymałość próbek 0,4x0,1x01 m wykazała duży rozrzut wyników, ale ich wartości średnie były mniejsze o 5% w przypadku rozciągania przy rozłupywaniu i o 10% na ściskanie, w stosunku do próbek nie poddanych promieniowaniu.

Badania Vodaka i in. (2005) obejmowały zakres napromienienia próbek od 420 do 500 kGy i zasadniczo potwierdziły wyniki opisane przez Sopko i in. (2004). Stwierdzono także zmniejszenie porowatości próbek przekraczające 50 %, spowodowane powstawaniem  $\text{CaCO}_3$ , głównie w formie kalcytu. Nastąpiła więc karbonatyzacja przyspieszona napromienieniem, o czym może świadczyć pojawienie się jej produktów w całej objętości próbek, a nie tylko w pobliżu powierzchni zewnętrznej. Późniejsze badania Vodaka i in. (2011) potwierdziły zachodzenie karbonatyzacji, przyspieszonej napromienieniem.

Według Mirhosseini (2010) wpływ napromienienia na degradację konstrukcji betonowych powinien być uwzględniany, ponieważ powoduje on poważne zmiany właściwości betonu. Należy przede wszystkim wymienić:

- zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 35-80% po napromienieniu od  $2 \cdot 10^{19}$  do  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>;
- poważne zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie od 20 do 80% w przypadku strumienia wynoszącego  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń Mirhosseini (2010) zaproponował trzy poziomy napromienienia:  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>, i  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> jako wielkości krytyczne, na które mogą być narażone konstrukcje żelbetowe w elektrowniach jądrowych. Na podstawie informacji uzyskanych z elektrowni jądrowych należą do nich przede wszystkim ściany. Wytrzymałość na ścinanie połączona z rozciąganiem była bardzo zmniejszona w gęsto zbrojonych (1,35-1,88%) elementach, po napromienieniu wynoszącym  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Żelbetowe panele poddane dwuosowemu ścinaniu i jednokierunkowemu ściskaniu wykazały znaczne osłabienie po napromienieniu wynoszącym  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> i  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Formy zniszczenia były różne: od zerwania zbrojenia do zniszczenia przez ścinanie, w przypadku zbrojenia w zakresie od 0,9 do 1,88%. Wytrzymałość na rozciąganie paneli żelbetowych była znacznie zmniejszona w przypadku krytycznych wielkości napromieniania.

Wnioski z przeprowadzonych badań Maruyama i in. (2013) wskazują na spadek wytrzymałości na ściskanie pod wpływem

decrease in tension by splitting and 10% in compression with respect to specimens that were not subjected to radiation.

Investigations presented in Vodak et al. (2005) paper covered series of irradiated specimens with up to 420 – 500 kGy and the above results were basically confirmed. A decrease of concrete porosity before the occurrence of calcite  $\text{CaCO}_3$ , what was indication of the carbonation due to irradiation and its products was found in the inner concrete volume and not on the surfaces of the specimens. Later tests published by that group Vodak et al. (2011) confirmed the occurrence of carbonation process.

According to Mirhosseini (2010) the influence of irradiation on degradation of concrete structures should be taken into account, wherein:

- Compressive strength is decreasing by 35-80% after irradiation of  $2 \cdot 10^{19}$  to  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>;
- Tensile strength is reduced considerably by approximately 80% when this action is reaching  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>.

The results obtained in these investigations allowed to propose three levels of irradiation:  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> and  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> as critical values of exposure of concrete structures in NPP. This concerns mainly walls and shields that are analyzed on the basis of results obtained from existing power stations. Resistance against shearing was considerably decreased in highly reinforced (1.35-1.88%) elements after irradiation with  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Reinforced concrete panel under bi-axial shearing and uni-axial compression were very much weakened after irradiation level of  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> -  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Various forms of destruction were observed from rupture of reinforcement to concrete damages by shearing, even with reinforcement from 0.9 to 1.88 %. Ductility of concrete panels was strongly decreased when irradiation reached threshold values.

The conclusions from tests of Maruyama et al. (2013) indicate a decrease of compressive strength after neutron irradiation. The reason is swelling of siliceous aggregate. Minerals structures are deformed and a part of energy of collisions of neutrons is the reason of permanent damages. Siliceous aggregate, because of its high density, is susceptible to the damage by flux of neutrons.

The effect of ionizing radiation on concrete was analyzed by Samarin (2013), who has shown contradictions in several published test results that may be due to interacting of high dose of radiation with elevated temperature. Changes of concrete properties in the shields were tested among the other by Batten (1960) who found the decrease of compressive strength by 30% already after six months of neutron flux influence of  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> sec., at constant temperature of approximately 50 °C, and similar drop of strength was observed in the control specimens maintained at 200 °C. However, during next three years of radiation no further decrease of strength was found and the reasons of that fall have not been explained. The investigations of Alexander (1963) did not show any modifications of concrete after the dose of  $10^{10}$  rad =  $10^8$  Gy. The tests made by Price (1957) in Atomic Energy Research Es-

promieniowania neutronowego, jednak dalsze doświadczenia są potrzebne. Przyczyną spadku wytrzymałości w tych badaniach było pęcznienie kwarcu w kruszywie. Sieci przestrzenne niektórych minerałów ulegają zdefektowaniu, a część energii przekazanej im w zderzeniach z neutronami powoduje trwałe uszkodzenia. Kruszywo krzemionkowe o dużej gęstości łatwiej ulega uszkodzeniom w wyniku napromieniowania przez strumień neutronów.

Zagadnienie wpływu promieniowania jonizującego na beton w konstrukcjach osłonowych rozpatrywał Samarin (2013), wskazując na sprzeczności w niektórych opublikowanych wynikach badań, co może wynikać z nakładającego się oddziaływania dużej dawki promieniowania i podwyższonej temperatury. Zmiany właściwości betonu w osłonach badał także Batten (1960) wskazując na spadek wytrzymałości betonu na ściskanie o 30%, już po sześciu miesiącach oddziaływania strumienia neutronów wynoszącego  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>·s, w stałej temperaturze około 50 °C. Podobne zmniejszenie wytrzymałości stwierdzono w kontrolnych próbkach przechowywanych w temperaturze 200 °C. Jednak napromieniowanie w ciągu następujących trzech lat nie wpłynęło na dalszy spadek wytrzymałości i jego przyczyny nie zostały wówczas wyjaśnione. Badania prowadzone w tym okresie nad wpływem promieniowania gamma [Alexander (1963)] nie wykazały zmian właściwości betonu w przypadku dawki wynoszącej  $10^{10}$  rad =  $10^8$  Gy. Inne badania z lat pięćdziesiątych [Price (1957)] prowadzone w Wielkiej Brytanii (Atomic Energy Research Establishment, Harwell) wskazywały na spadek o 17% wytrzymałości betonu, i powstawanie rys w wyniku napromieniowania strumieniem  $0,5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>s.

Różnice w opiniach o uszkodzeniach wystąpiły także w odniesieniu do neutronów powolnych i prędkich, publikowano bowiem opinie zarówno o spadku jak i o wzroście wytrzymałości betonu na ściskanie pod wpływem strumienia o wielkości około  $5 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>s.

Raport podsumowujący wyniki badań dotyczących wpływu promieniowania neutronowego i promieniowania  $\gamma$  opublikował zespół William, Xi i Naus (2013), który poddał analizie dotychczasowe badania, proponując przyjęcie następujących wartości granicznych napromieniowania, które okazały się w znacznej mierze potwierdzone przez późniejsze badania:

- promieniowanie neutronowe:  $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>;
- promieniowanie  $\gamma$ :  $3 \times 10^5$  Gy.

## 5. Zmiany mikrostruktury i właściwości betonu według najnowszych badań

Wymagania w stosunku do osłon betonowych w elektrowniach jądrowych muszą odpowiadać rodzajowi i natężeniu przewidywanego promieniowania, w okresie normalnej eksploatacji. Dotyczy to równocześnie promieniowania  $\gamma$  i promieniowania neutronowego, które są zatrzymywane przez materiał o dużej gęstości. Stal i beton spełniają to wymaganie, a w przypadku określonej grubości osłony, promieniowanie pierwotne i wtórne  $\gamma$  jest zatrzymywane proporcjonalnie do ich gęstości. Przegroda

tablishment (UK), Harwell, indicated that resistance of concrete against cracking decreased by 17% after irradiation dose of  $10^{10}$  rad =  $10^8$  Gy.

Considerable differences in opinions concerning damages due to slow and rapid neutrons were presented: information are concerning both decrease and increase of concrete compressive strength under neutron flux of approximately  $5 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>s.

William et al. (2013) the present knowledge on influence of neutron and  $\gamma$  radiation contained in the above mentioned and elder reports, were analysing. As a result, the following threshold values of radiation were proposed that were later confirmed:

- for neutron radiation  $5 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>;
- for  $\gamma$  radiation  $3 \times 10^5$  Gy.

## 5. Modification of microstructure and properties of concrete in the shields

Requirements for concrete shields in NPPs should correspond to type and intensity of foreseen radiation during scheduled normal exploitation. That concerns both  $\gamma$  and neutron radiation, the latter is stopped by medium with high density. These requirements are satisfied by steel and concrete and with appropriate thickness of a shield initial and secondary  $\gamma$  radiation is stopped, proportionally to their density. A concrete wall should have sufficient density and contain heavy aggregate in order to slow rapid neutrons, but should also contain hydrogen to slow down intermediary neutrons and to stop slow neutrons. Bound water is the main source of hydrogen in concrete because free water disappears by diffusion during ageing and the rate of this process is increasing at high temperature. Volume of bound water in cement matrix should be completed by water bound in aggregate and the components with low atomic number, e.g. boron.

In a few papers published recently, a possibility to identify the traces of radiation was considered. Remec et al. (2013) analyzed the changes in concrete with respect to possible extension of exploitation of NPPs in the US. Initially the reactors were built for 40 years of exploitation and next permissions to extend activity up to 60 years were granted. Even further extensions for 80 or more years are considered because of increase of requirement for electricity. It appeared difficult to collect reliable information on the absorbed dose of radiation in reactor shields. Furthermore, the differences in published reports on the concrete properties in the biological shields are considerable and the conditions of exploitation of reactors during seventies and at present are different with respect to the reactor built at present. Old collected data are not unequivocal: there are authors who confirm data published by Hilsdorf (1978), which were criticized by the other, e.g. Vodak et al. (2005).

Remec et al. (2013) aimed to prepare methods for systematic analysis of influence of radiation of concrete using two approaches:

betonowa powinna mieć dostateczną gęstość, zawierając ciężkie kruszywa, aby spowalniać prędkie neutrony, a jednocześnie musi zawierać wodór w sieciach przestrzennych minerałów, w celu spowalniania pośrednich neutronów i zatrzymywania powolnych. Głównym źródłem wodoru w betonie jest woda krystalizacyjna, ponieważ woda wolna jest wydalana podczas dojrzewania betonu tym szybciej, im temperatura jest wyższa. Ilość wody związanej w matrycy cementowej musi być uzupełniona przez wodę związaną w kruszywie i składniki zawierające minerały o niskiej liczbie atomowej, na przykład bor.

W kilku pracach opublikowanych w ostatnich latach, rozpatrywano możliwe do identyfikacji ślady promieniowania. Remec i in. (2013) rozpatrywali zmiany występujące w betonach, ze względu na przewidywane przedłużenie eksploatacji reaktorów jądrowych w USA. Reaktory budowane pierwotnie na 40 lat eksploatacji, uzyskiwały następnie zezwolenia na eksploatację do 60 lat. Przewidywane jest dalsze przedłużanie do 80 i więcej lat, ze względu na zapotrzebowanie na energię. Zebranie danych o dawce napromienienia w osłonach działających reaktorów okazuje się trudne. Co więcej, rozbieżności w wynikach publikowanych badań dotyczących właściwości betonów w osłonach biologicznych są znaczne, a warunki eksploatacji reaktorów ocenianych w latach siedemdziesiątych różnią się od reaktorów budowanych współcześnie. Dawniejsze badania są niejednoznaczne: jedni autorzy potwierdzali wyniki opublikowane przez Hilsdorfa (1978), a inni je kwestionowali, na przykład Vodak i in. (2005).

Remec i in. (2013) mieli na celu przygotowanie metod systematycznego analizowania wpływu napromienienia betonu dwiema drogami:

- badając beton w pracujących reaktorach, łącznie z oceną wielkości dawek promieniowania neutronowego i  $\gamma$ , pochłoniętych w okresie eksploatacji;
- poddając próbki betonu promieniowaniu z innych źródeł, o dużej intensywności.

Przykład wyników obliczeń napromienienia betonu osłonowego pokazano na rysunku 1. W przekroju osłony reaktora widać rozkład dawki promieniowania  $\gamma$  i neutronowego, wzdłuż promienia przez osłonę stalową i ścianę betonową, przedzielone pustką powietrzną. Przewidywany duży program badawczy powinien obejmować obliczenia na podstawie modelowania zjawisk, również obserwacje i pomiary warstw pośrednich między kruszywem a matrycą cementową, przy zastosowaniu mikroskopii skaningowej i tomografii. Konieczne jest uzyskanie informacji trójwymiarowych o zmianach, zachodzących w matrycy, także za pomocą spektroskopii rentgenograficznej.

Ściana osłony jest utworzona z warstwy stalowej zbiornika o grubości 22 cm, pustej szczeliny około 15 cm oraz betonowej osłony biologicznej o grubości około 120 cm. Na wykresach widać spadek intensywności obu postaci promieniowania oraz spadek nagrzewania wzdłuż grubości złożonej osłony. Wyniki obliczeń wskazują na

- testing concrete in existing reactors together with estimation how large doses of neutron and  $\gamma$  radiation were absorbed during service;
- subjecting concrete specimens to radiation from other highly intensive sources.

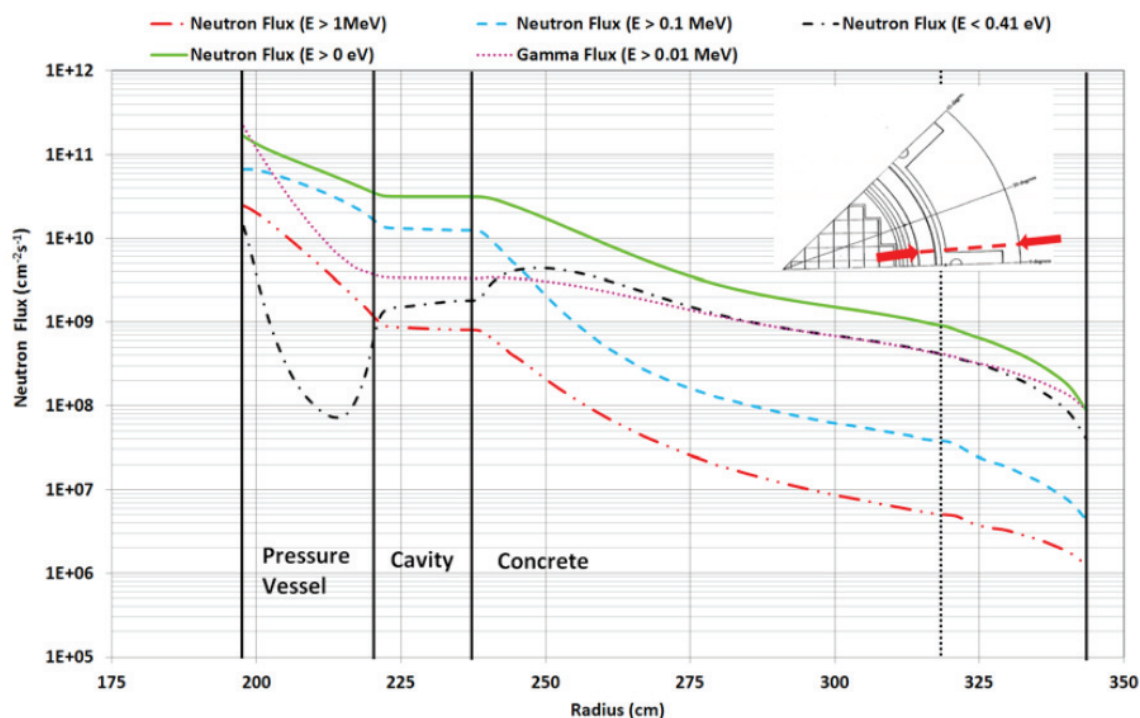
The example of calculation results of irradiation by Remec et al. (2016) is shown in Fig. 1. On a cross-section of a reactor shield the distribution of doses of  $\gamma$  and neutron radiation is presented along the radius across the steel cover and concrete wall, separated with an air void. A large modelling program is foreseen in order to cover distribution of  $\gamma$  and neutron radiation on the basis of observations and measurement in intermediary layers between aggregate and cement matrix, using scanning microscopy and tomography. It is necessary to get three-dimensional data also on the modifications of cement matrix with X-ray spectrograph.

The reactor wall is constructed with a steel cover 220 mm thick, air void of approximately 150 mm and biological concrete shield of 1200 mm. The decrease of intensity of radiation by both shield kinds is shown across the wall, together with decrease of concrete heating. The results of computations indicate how radiation and heating fall by several orders of magnitude in the case of a wall shown in Fig. 1.

Paper by Field et al. (2015, part I) contains a review of the state of the art of the effect of neutron irradiation on concrete. Its aim was to prepare an investigation of the results of a long-term exploitation of concrete structures in a model NPP with light-water reactors (LWR), where particular attention is concentrated on the behaviour of concrete biological shields. The analysis was consisting of three parts: a) estimation of the level of irradiation of concrete after foreseen exploitation during 80 years, b) generalization of test results and conclusions published by Hilsdorf et al. (1978), c) determination of mechanisms and irreversible damages of concrete due to irradiation.

On the basis of the results presented in several papers, Field et al. (2015, Part.I) were drawn the following conclusions:

1. In the concrete subjected to radiation with neutrons considerable decrease of compressive strength may occur when level of irradiation equal to  $1,0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> was attained, and this fall may reach 50% of initial strength;
2. Irradiation of concrete with neutrons has higher influence on tensile than on compressive strength; decrease of 75% in tension corresponds to 50% in compression. As a result, traditional relations, e.g. standard or experimental formulae to determine tensile strength on the basis of compression tests cannot be used.
3. The modulus of elasticity indicates slow decrease under neutron radiation, and it becomes important under the dose above  $1,0 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> also. Similar decrease is observed at elevated temperature; influence of both neutrons and temperature should be investigated in the future.



Rys. 1. Rozkłady strumienia neutronów i promieniowania  $\gamma$  oraz nagrzewania wzdłuż grubości osłony reaktora PWR, uzyskane w wyniku obliczeń, Remec i in. (2013)

Fig. 1. Distribution in radial direction from the core of neutron and  $\gamma$  fluxes and heating rates in three-loop PWR, Remec et al. (2013)

zmniejszenie promieniowania i nagrzewania o wiele rzędów wielkości w przypadku przedstawionej na rysunku 1 ściany osłonowej.

Publikacja Fielda i in. (2015, cz.I) zawiera przegląd obecnego rozpoznania wpływu napromienienia betonu neutronami. Celem tego przeglądu było przygotowanie badań skutków długotrwałej eksploatacji konstrukcji betonowych w typowych elektrowniach atomowych z reaktorami lekkowodnymi (LWR - Light Water Reactor), przy czym szczególną uwagę zwrócono na stan betonowych osłon biologicznych. Tematyka została tu podzielona na trzy części: a) oszacowanie poziomu napromienienia betonu w osłonach w okresie przewidywanej eksploatacji przez 80 lat; b) rozszerzenie wyników badań i wniosków opublikowanych przez Hilsdorfa i in. (1978) przez uwzględnienie danych poprzednio nieznanych, c) określenie możliwych mechanizmów nieodwracalnych uszkodzeń betonu, spowodowanych napromienieniem.

Na podstawie przeglądu publikacji, autorzy Field i in. (2015, cz.I) sformułowali następujące wnioski.

1. Beton napromieniony neutronami może wykazywać wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie w przypadku gdy ich strumień przekracza poziom  $1,0 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>, przy czym spadek ten może osiągać 50% pierwotnej wytrzymałości.

2. Napromienienie betonu neutronami ma większy wpływ na wytrzymałość betonu na rozciąganie niż na ściskanie. Utrata 75% wytrzymałości na rozciąganie odpowiada spadkowi wytrzymałości na ściskanie o 50%. W rezultacie, tradycyjne zależności, na przykład wzory normowe lub doświadczalne, używane do wnio-

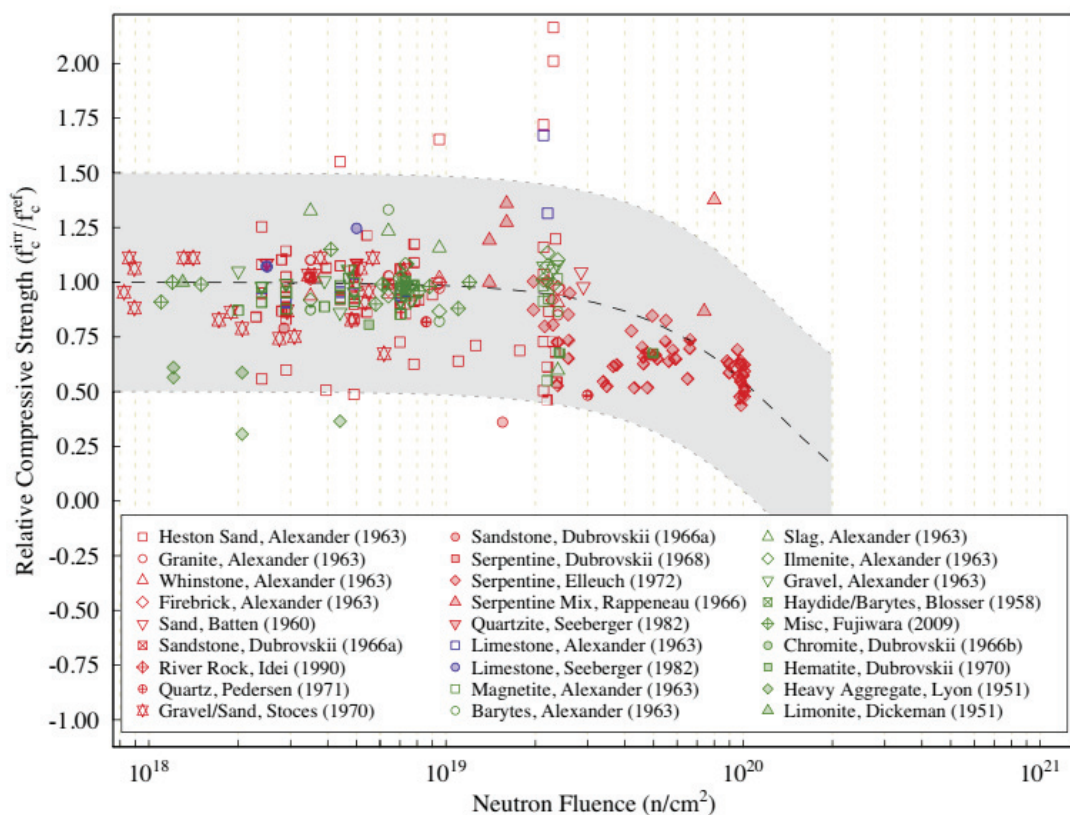
4. Clear decrease of mechanical properties is attributed to various factors, but there are indications that swelling after long-term exposure to radiation is of primordial importance. Resistance against radiation depend on the kind of aggregate. It was deduced from experiments that siliceous aggregate is presenting the highest risk of harmful results of radiation and elevated temperature. These aggregates are susceptible to amorphous products formation, even under low irradiation and also for swelling and have higher coefficients of thermal expansion.

5. Fluence of rapid neutrons ( $E > 0,1$  MeV) on biological shields after long-term exploitation reach such level that swelling of the cement matrix may be expected - [Radiation Induced Volumetric Expansion (RIVE)], and decrease of its mechanical properties may lead to degradation of the biological shields in the LWR installations. Risk estimation should be based on the analysis of concrete composition (w/c ratio, kind of aggregate, temperature during exploitation, etc.), sensitivity of the cement matrix to radiation, influence of radiation on aggregate and distribution of neutron flux in the biological shield.

Available basis of data on irradiation of concrete indicates clearly the appearance of swelling due to radiation (RIVE) and concrete degradation after neutron radiation.

However, influence of several parameters like limit value of electron flux, effects of elevated temperature due to radiation, sensitivity of concrete composition and of properties of aggregate cannot be distinguished neither estimated on the basis of present knowledge. Further investigations, carefully designed for various particular aspects, are necessary in order to complete present knowledge.





Rys. 2. Zmiany wytrzymałości na ściskanie betonów z różnymi kruszywami w zależności od dawki napromienienia, badanych przez różnych badaczy [Field, Remec, Le Pape (2015, cz. I)]

Fig. 2. Relative compressive strength of concrete and mortar specimens versus neutron fluence, after various investigations, Field, Remec, Le Pape (2015, Part I)

skowania o wytrzymałości na rozciąganie przy braku pomiarów wytrzymałości na ściskanie nie mają zastosowania.

3. Moduł sprężystości ulega stopniowemu zmniejszeniu pod działaniem promieniowania neutronowego, co staje się wyraźne gdy ich strumień również przekracza  $1,0 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Podobne zmniejszenie tego modułu obserwowano po oddziaływaniu wysokiej temperatury, a łączny wpływ działania neutronów i podwyższonej temperatury powinien być przedmiotem dalszych badań.

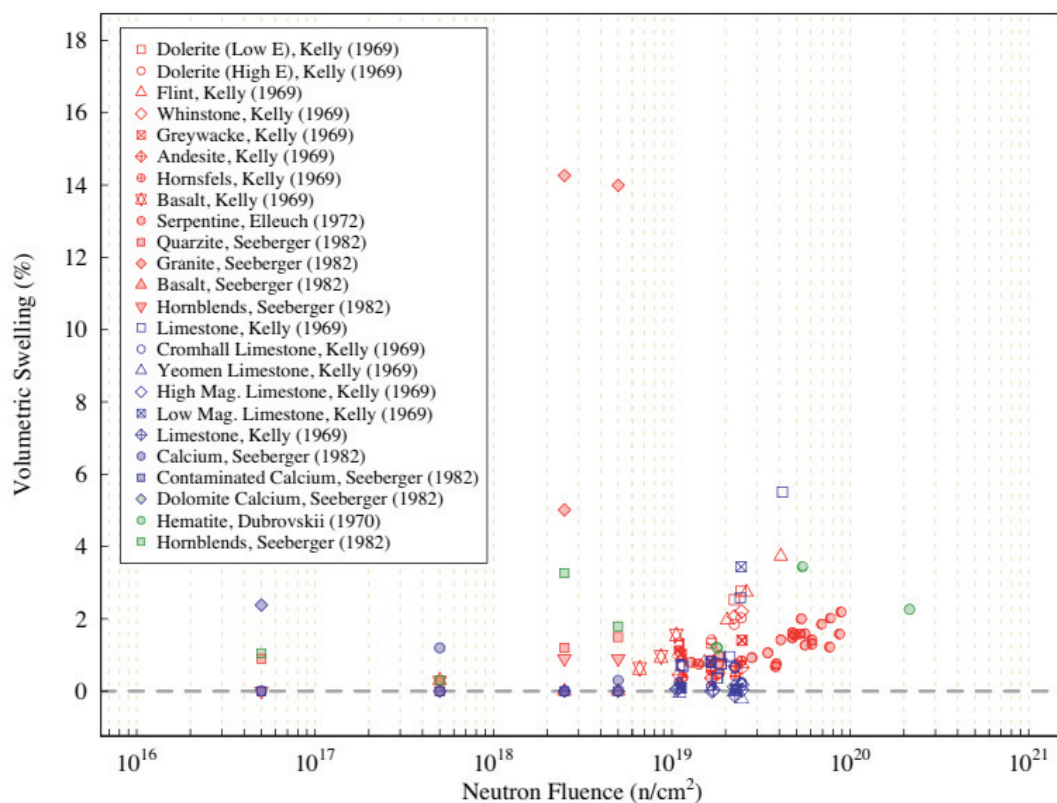
4. Spadek właściwości mechanicznych jest przypisywany różnym czynnikom, ale istnieją wskazania, że rozszerzalność spowodowana napromienieniem podczas długotrwałej eksploatacji jest zjawiskiem o pierwszorzędym znaczeniu. Odporność na promieniowanie jest zależna od rodzaju kruszywa. Wyniki badań wskazują, że krzemionkowe kruszywa stwarzają największe ryzyko wystąpienia szkodliwych wpływów promieniowania i wysokiej temperatury. Kruszywa te łatwo przechodzą w formy bezpostaciowe, nawet pod wpływem małego napromienienia, z czym związane są duże współczynniki rozszerzalności cieplnej.

5. Oceniane wielkości strumienia szybkich neutronów ( $E > 0,1$  MeV) w osłonach biologicznych podczas długotrwałej eksploatacji (>40 lat) mogą osiągać poziom, przy którym spodziewane jest pęcznienie pod wpływem promieniowania (RIVE – Radiation Induced Volumetric Expansion), a spadek właściwości mechanicznych

This critical review indicates the next step to understand the influence of basic variables related to degradation of concrete structure under radiation. The results obtained after many investigations realized since 1951 indicate that critical value of flux is approximately equal to  $1,0 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>.

Results of investigations published by Field et al. (2015, Part I) indicate that appreciable modifications of structure and properties are possible in the shields subjected to long-term radiation (> 40 years). In order to discover these modifications it is important to know the properties of concretes directly after casting in the shields and absorbed doses of radiation. It is therefore doubtful whether such modifications are perceptible in the specimens from old nuclear reactors, e.g. taken out in 2016 from the shields of reactor EWA in Świerk.

Field et al. (2015 Part I) published information on modifications of compressive strength of concrete specimens as a function of the radiation level [Fig. 2]. These results are collected from various tests executed between 1951 and 1990 by many researchers, and concern different kinds of aggregate and concrete. Similar diagrams are made also for tensile strength and for the modulus of elasticity. Without any doubt these values have been obtained in different conditions and perhaps their reconstruction from old sources is not perfectly coherent. However, all results shown in Fig. 2 indicate considerable fall of strength with large dispersion,



Rys. 3. Pęcznienie objętościowe rozmaitych kruszyw stosowanych do betonów osłonowych przez różnych badaczy w funkcji dawki napromienienia [Field K.G., Remec I., Le Pape Y. (2015)]

Fig. 3 .Concrete and mortar volumetric swelling versus neutron fluence, after various investigations, [Field K.G., Remec I., Le Pape Y. (2015, Part I)]

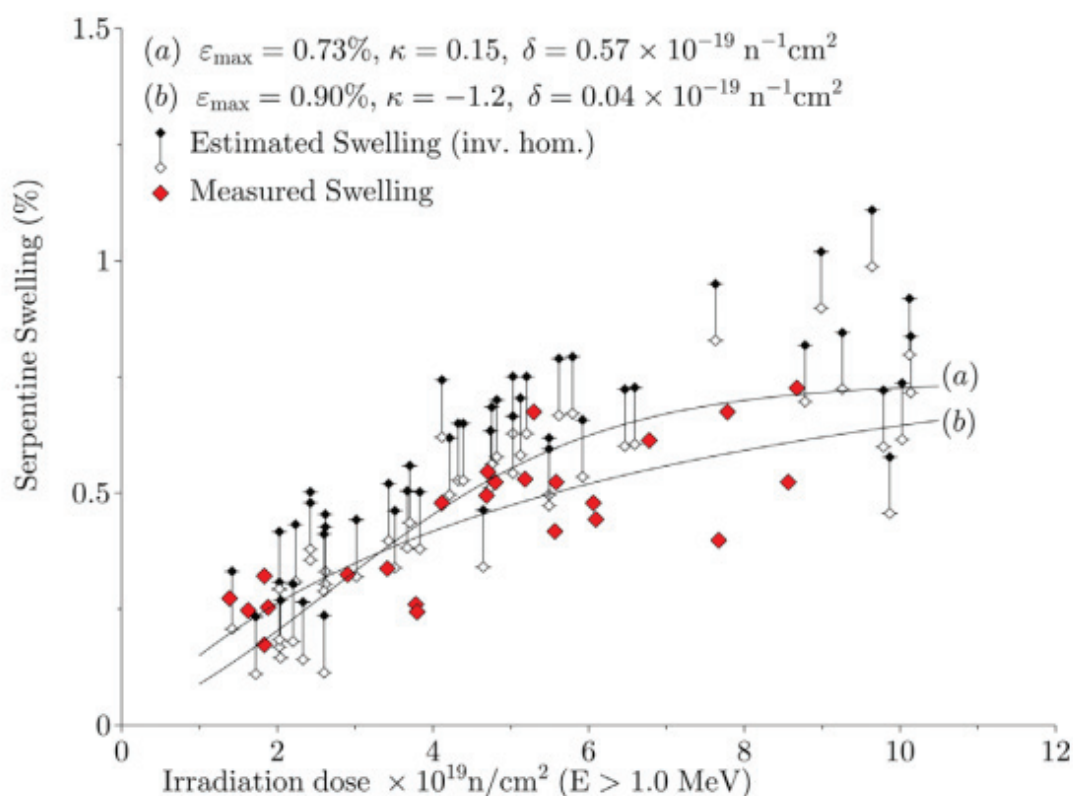
proceeds to possible degradation of biological shields in reactors of the LWR type. The assessment of risk should be based on the knowledge of the concrete composition (w/c ratio, aggregate type, operating temperature, etc.), tolerance in relation to irradiation, the influence of irradiation on the aggregate, and also the distribution of the neutron flux in the biological shield.

Existing data on irradiated concrete suggests that it is worth pointing out the occurrence of swelling under the influence of irradiation (RIVE) and concrete degradation under the influence of neutron irradiation. However, the influence of important factors, mainly the magnitude of the neutron flux, in the case where swelling is significant and the total energy associated with a certain level of this flux, as well as the effects of increased temperature during irradiation, and many other variables, related to the concrete composition and aggregate type, cannot be separated and properly evaluated on the basis of current knowledge of these issues. Further research, carefully planned in relation to individual factors, is necessary to fill the gaps in current knowledge of these issues. The presented overview indicates the next step in the direction of a more thorough understanding of the basic variables related to concrete degradation under the influence of irradiation and should be a potential impulse for further research on this problem. Known results, obtained in previous numerous studies, conducted over a long period (starting from 1951 r.)

are showing the decrease of strength corresponding to a critical value of radiation equal to approximately  $1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Similar collections of test results for tensile strength, modulus of elasticity and volume swelling of concretes with different aggregates indicate also a qualitative modification after radiation of that order.

Values of swelling of several kinds of aggregates [Fig. 3] measured and published by various authors indicate an increase of volume by a few percent after absorbing the same dose of radiation. It is therefore acceptable to admit that the swelling of aggregate is a reason of volume increase of concrete in the shields when a certain level of irradiation is obtained. When the test results are classified according to the type of aggregate, e.g. limestones, flints etc., and then a classification of swelling according to its magnitude is possible as related to their transformation into an amorphous phase. Such a general classification may be not sufficient for a quantitative analysis, because minor differences in mineral composition influence the susceptibility of aggregate to damage by radiation.

The results analyzed above indicate that a dose of  $1 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> may correspond to the limit value of radiation and after that dose considerable qualitative modifications in concrete appear. However, the variety of composition of tested concretes should be considered as well as the variety of applied aggregates from granites and dolomites to flints and serpentines. Furthermore, not only doses of radiation were different but also temperature: in Figs. 2



Rys. 4. Pęcznienie ziaren serpentynitu w funkcji dawki promieniowania  $\gamma$ , Le Pape i in. (2015, cz.II)

Fig. 4. Swelling of serpentinite grains as function of  $\gamma$  radiation dose, (a) after calculations, (b) after measurements, Le Pape et al. (2015, cz.II)

wskazują wyraźnie na krytyczną wielkość strumienia neutronów, równą  $1,0 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$ .

Wnioski z badań Fielda i in. (2015, cz.I) wskazują na możliwość znacznych zmian mikrostruktury i właściwości betonów, poddanych długotrwałemu (> 40 lat) napromienieniu. Aby potwierdzić te zmiany, potrzebna jest znajomość właściwości betonów bezpośrednio po wbudowaniu. Jest więc wątpliwe, aby jakieś zmiany można było zidentyfikować w próbkach, pochodzących z rozbieranych reaktorów atomowych, na przykład w próbkach pobranych w 2016 r. z osłon reaktora EWA w Świerku.

Zebrane przez Fielda i in. (2015, cz.I) przykładowe zmiany wytrzymałości na ściskanie próbek betonu w funkcji napromienienia są pokazane na rysunku 2. Wyniki te pochodzą z rozmaitych badań, przeprowadzonych w latach od 1951 do 1990 przez różnych badaczy, przy czym dotyczą rozmaitych kruszyw i betonów. Analogiczne wykresy obejmują także wytrzymałość na rozciąganie i moduł odkształcalności.

Niewątpliwie warunki prowadzenia tych badań i wykonania pomiarów były różne, a prawdopodobnie nie są dokładnie poznane. Jednak wszystkie wyniki pokazane na rysunku 2, pomimo znacznego rozrzutu, wskazują na spadek wytrzymałości w pobliżu wartości napromienienia około  $1 \cdot 10^{19}$ . Podobne zależności wynikają z analogicznych danych dla wytrzymałości na rozciąganie, modułu odkształcalności i objętościowego pęcznienia betonów z różnym

and 3 full and empty signs indicate temperature above and below  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively.

The influence of swelling of aggregate grains due to neutron flux on behaviour of concrete was studied by Le Pape et al. (2015, Part II), where test results on the swelling of serpentinite are presented among the other (Fig. 4).

Later observations published by Le Pape et al. (2016) indicate influence of temperature on kinetics of the aggregate swelling (RIVE); that conclusion was based on observations in temperature below  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  and above  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . The swelling due to radiation (RIVE) may induce serious deformations even comparable or higher than deformations due to alkali-aggregate reaction. Reduction of neutron fluence by the depth of concrete biology cover is the reason of variation of RIVE due to limited swelling. The influence of stress reduction due to RIVE on potential damages of concrete structure should attract future investigations.

A microstructural model of concrete subjected to neutron radiation was proposed in Le Pape et al. (2013) paper. When compared with published experimental results of limited extent it may be concluded how important is to consider separately the influence of irradiation of aggregate and cement matrix and to understand their interaction. The decisive importance of aggregate on degradation and swelling of concrete was confirmed and quantified. The preliminary damage of cement matrix is considerably increased by aggregate swelling,

kruszywem, to znaczy wskazują na zasadniczą jakościową zmianę właściwości po takim napromienieniu.

Pomiary pęcznienia rozmaitych rodzajów kruszyw (rysunek 3), pochodzące z badań różnych autorów, wskazują na kilkuprocentowy przyrost objętości po przekroczeniu takiej samej dawki napromienienia. Można na tej podstawie przypuszczać, że właśnie pęcznienie kruszywa jest powodem wzrostu objętości betonów osłonowych, po przekroczeniu określonej dawki promieniowania. Zgrupowanie wyników badań według rodzaju kruszywa, na przykład wapienie, krzemienie lub inne, pozwala na próbę ilościowej oceny pęcznienia, wynikającego ze stopniowego przechodzenia minerałów w formę bezpostaciową. Do celów analizy ilościowej taka ogólna klasyfikacja może okazać się niewystarczająca, ponieważ niewielkie różnice w składzie mineralnym wpływają na podatność kruszywa na uszkodzenia, spowodowane promieniowaniem.

Przedstawione wyniki wykazują, że dawka  $1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> może odpowiadać granicznej wartości napromienienia, a po przekroczeniu tego poziomu powstają znaczne zmiany jakościowe w betonie. Trzeba jednak zwrócić uwagę na różnorodność składów betonów, które były badane, a także na rozmaite rodzaje użytych kruszyw: od granitów i dolomitów do krzemieni i serpentynitu. Co więcej, oprócz różnych dawek napromienienia, także temperatura betonów była różna: na rysunkach 2 i 3 pełne i puste formy geometryczne dotyczą odpowiednio temperatury większej i mniejszej od 100 °C.

Zagadnienie wpływu pęcznienia ziaren kruszywa spowodowanego strumieniem neutronów na zachowanie się betonu podjęte zostało w pracy Le Pape i in. (2015, cz.II), w którym przedstawiono wyniki doświadczeń, dotyczących między innymi pęcznienia serpentynitu (rysunek 4).

Dalsze obserwacje zawarte w pracy Le Pape i in. (2016) wskazują na wpływ temperatury na szybkość objętościowej rozszerzalności kruszywa (RIVE); wniosek ten oparto na obserwacjach wykonanych w temperaturze niższej od 45°C i wyższej od 150 °C. Rozszerzalność objętościowa spowodowana promieniowaniem (RIVE) może wywołać poważne odkształcenia, porównywalne albo nawet większe od pęcznienia, wywołanego reakcją kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu. Osłabienie strumienia neutronów wraz z głębokością betonowej osłony biologicznej powoduje zmienność RIVE z powodu ograniczonego pęcznienia. Wpływ ograniczonych naprężeń wywołanych przez RIVE na potencjalne uszkodzenie mikrostruktury powinien być przedmiotem przyszłych badań.

Opracowano micromechaniczny model betonu, poddanego promieniowaniu neutronowemu [Le Pape i in. (2013)]. Z porównania z ograniczonym zakresem publikowanych danych doświadczalnych wynika znaczenie oddzielenia skutków napromienienia kruszywa i zaczynu cementowego oraz zrozumienia ich wzajemnego oddziaływania. Decydujący wpływ kruszywa na degradację i pęcznienie został potwierdzony i określony ilościowo. Istniejące uprzednio uszkodzenie zaczynu cementowego jest wyraźnie powiększone przez pęcznienie kruszywa, chociaż zmniejszenie właściwości sprężystych kruszywa wpływa na mniejsze przekazywanie pęcznienia na zaczyn.

even as elastic properties of aggregate are reduced and swelling is only partly transmitted to the matrix.

After a detailed review of published papers by Field et al. (2015) it may be concluded that only Kelly et al. (1969) and Elleuch et al. (1972) presented systematic information on cement paste, aggregate and concrete characteristics before and after irradiation. In order to understand the mechanism of concrete irradiation, however, further experimental investigations are required.

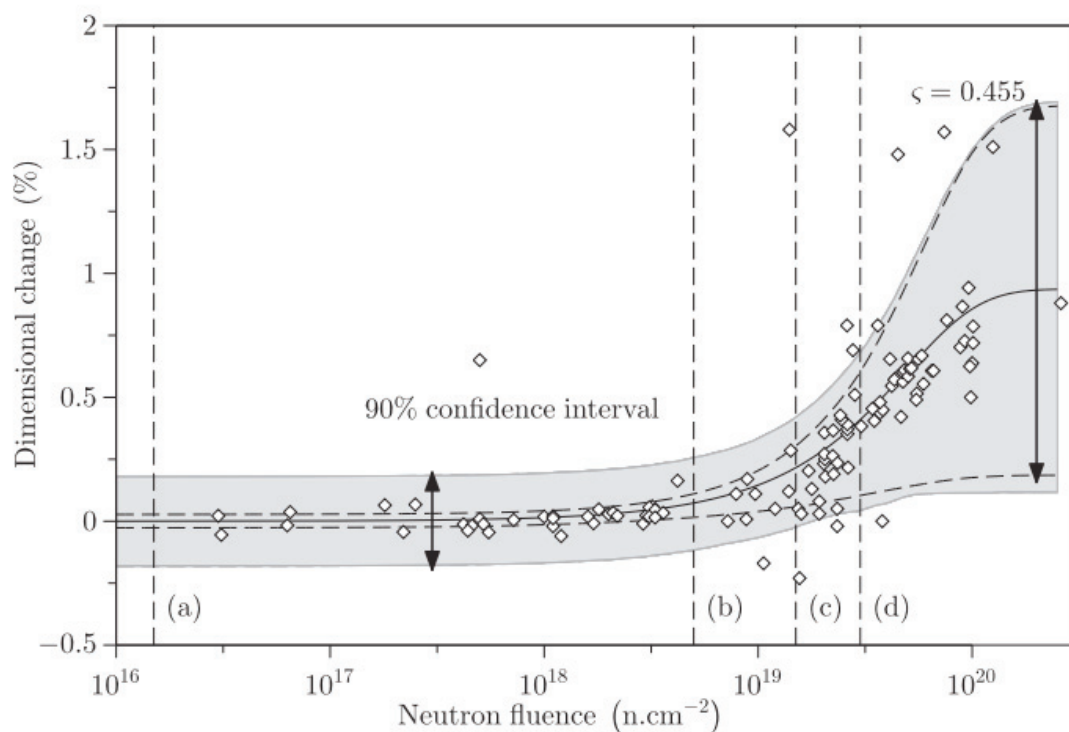
There are serious limitations for modelling of concrete based on homogenisation of a random medium that should be considered again. In particular, behaviour of concrete under radiation results from a combination of the influence of neutrons, of the radiolysis under  $\gamma$  radiation, transportation of humidity and thermal effects. Incremental nature of these mechanisms is not modelled when linear approach is adopted in paper by Le Pape et al. (2015, Part II). Or, such mechanisms should be taken into account in modelling because various kinetics of these mechanisms may introduce different macroscopic behaviour that may have basic influence on an appropriate consideration of the results of accelerated tests in the conditions created by active reactor.

Detailed classification of aggregates, (i.e. dolomites, siliceous et al.) that are applied for these investigations enables a qualitative analysis and identification of voluminous swelling, which is caused mostly by transformation of siliceous minerals to their amorphous phase. Such classification may be inadequate for a quantitative analysis because differences of mineralogical composition decide on the aggregate sensitivity to damage due to radiation.

Swelling is caused by transformation of silicate minerals to amorphous phase and damages to the cement matrix. Such modifications after appropriate fluence level may be observed in the analysed specimens, and particularly in flint grains, as indicated in paper by Zubov and Ivanov (1966).

After Le Pape (2015) critical value of fluence of neutron is equal to  $3,1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV) after 80 years of exploitation; this is only approximate value that indicate a possibility of negative effects of radiation on a concrete shield. Diagram based on the model proposed by Zubov and Ivanov (1966) is shown in Fig. 5 in the form of distribution of 114 points obtained from calculation, while the envelope indicates the general relation between variation of dimensions expressed [in %] as function of fluence of neutrons.

Simplified cylindrical model of a concrete biological shield (CBS) was analysed for water pressure reactor (PWR) with a prototype shape. It appears that volume swelling may induce increase of stress that exceeds considerably the strength of irradiated concrete. Because of appreciable attenuation of neutron flux in concrete the difference in swelling appears mainly in that part of concrete shield that is situated close to a reactor. Differences in swelling due to radiation (RIVE) is the reason of high double-axial compression, mainly in the vicinity of the reactor cavity, and tensile circumferential stress, distributed towards internal parts of concrete shield (CBS). During exploitation of the reactor, excessive tensile stress



Rys. 5. Zmiany wymiarów osłony betonowej w funkcji strumienia neutronów, Le Pape (2015)

Fig. 5. Irradiated concrete dimensional changes as a function of the neutron fluence Le Pape (2015)

Z przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury w artykule Field i in. (2015) wynika, że tylko dane opublikowane przez Kelly i in. (1969) oraz Elleuch i in. (1972) zawierają systematyczne informacje, dotyczące charakterystyki zaczynu cementowego, kruszywa i betonu, zbudowanego z tych składników, przed i po napromienieniu. Zrozumienie mechanizmu wpływu napromienienia betonu wymaga dalszych badań doświadczalnych w tym zakresie.

Poważne ograniczenia zaproponowanego modelowania, opartego na teorii homogenizacji ośrodka losowego, powinny być ponownie rozpatrzone. W szczególności, zachowanie się betonu poddanego promieniowaniu wynika z połączenia skutków rozmaitych mechanizmów, obejmujących uszkodzenia wywołane działaniem neutronów, radiolizę pod wpływem promieniowania  $\gamma$  i transport wilgoci, połączone z efektami termicznymi. Zwiększający się wpływ tych mechanizmów nie jest modelowany przez przyjęte ujęcie liniowe w pracy Le Pape i in. (2015, cz. II). Te mechanizmy powinny być ujęte w modelowaniu, ponieważ różna szybkość tych procesów może powodować różne makroskopowe zachowania. To zagadnienie ma podstawowe znaczenie, w celu odpowiedniej oceny wyników przyspieszonych badań doświadczalnych, w warunkach działającego reaktora.

Obszerna klasyfikacja kruszyw (wapienne, krzemionkowe i inne), zawarta w tym artykule dostarcza ilościowego podziału, który prowadzi do identyfikacji objętościowego pęcznienia, spowodowanego głównie przejściem do fazy bezpostaciowej minerałów krzemionkowych. Do analizy ilościowej ta ogólna klasyfikacja może być nieodpowiednia, ponieważ różnice w składzie mineralnym będą

appears earlier than high compressive stress inside the shield. That is why monitoring of the effects of radiation in concrete shield may be realised from the accessible external side of the shield. However, potential external cracking is limited by circumferential reinforcement.

In the proposed model of elastic deformation of concrete is supposed the calculated depth of over-stressed concrete may not be considered as a depth of damage, but it represents first approximation of potential damage due to irradiation (RIVE) after longterm exploitation. The depth of overloaded concrete in a prototype biological shield (CBS) with a depth of 1.5 m cast with concrete of compressive strength of 40 MPa is on average equal to 86 mm in the compressed zone and 1.08 m in the tensile zone. These results correspond to the maximum of neutron fluence on the surface equal to  $3.1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV), after 80 years of exploitation of the reactor. The structural role of irradiated concrete cannot be neglected for extended exploitation of the reactor with light water (LWR), therefore for further investigations it is needed to build a special model of reinforced concrete taking into account that irradiated concrete behaves as an elastic material. In addition, in the pressure shield of the reactor (RPV-Reactor Pressure Vessel) and in the system of steam supply (NSSS-Nuclear Steam Supply System) additional stress may appear under seismic actions and that effect would require three-dimensional analysis.

In the model the first order effects from irradiation are considered for the behaviour of concrete structure of the shield and several limitations of the model should be considered in future investigations, namely:

wpływać na podatność kruszywa na uszkodzenie spowodowane napromienieniem.

Pęcznienie wiąże się z przejściem minerałów krzemianowych do fazy bezpostaciowej, a następnie z uszkodzeniem mikrostruktury matrycy cementowej. Zmiany tego rodzaju przy odpowiednim poziomie strumienia neutronów mogą być dostrzeżone w badanych próbkach, zwłaszcza w ziarnach kruszywa krzemionkowego [Zubov, Ivanov (1966)].

Według Le Pape (2015) krytyczna wielkość strumienia neutronów wynosi  $3,1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  MeV) po 80 latach eksploatacji; jest to wartość orientacyjna, wskazująca na możliwość wystąpienia szkodliwych skutków napromienienia betonu w obudowie. Wykres oparty na wykorzystaniu modelu Zubova i Ivanova (1966) pokazany jest na rysunku 5 w postaci rozkładu 114 punktów, w których wykonano obliczenia i pokazano obwiednie, wskazuje na zależność zmienności wymiarów w funkcji strumienia neutronów.

Rozpatrzono uproszczony cylindryczny model betonowej osłony biologicznej (CBS) wodnego reaktora pod ciśnieniem (PWR), o prototypowym kształcie. Okazuje się, że pęcznienie objęściowe może powodować rozwój naprężeń mechanicznych, znacznie przekraczających wytrzymałość napromienionego betonu. Z powodu znacznego osłabienia przepływu neutronów w betonie różnica pęcznienia występuje głównie w części betonowej osłony, usytuowanej w sąsiedztwie reaktora. Różniczkowe pęcznienie spowodowane promieniowaniem (RIVE) powoduje wysokie dwuosiowe naprężenia ściskające, głównie w osłonie betonowej w pobliżu wnęki reaktora oraz rozciągające naprężenia obwodowe szeroko rozłożone w kierunku wnętrza betonowej osłony (CBS - Concrete Biological Shield). Nadmierne naprężenia rozciągające występują wcześniej niż zbyt duże naprężenia ściskające we wnętrzu betonowej osłony podczas eksploatacji reaktora. Wobec tego, monitorowanie skutków napromienienia w betonowej osłonie może być prowadzone od dostępnej części osłony, to znaczy od zewnętrznej średnicy. Jednakże potencjalne powstawanie widocznego zarysowania jest ograniczone ze względu na obecność obwodowego zbrojenia.

W zaproponowanym modelu, zakładającym sprężyste odkształcenia betonu, obliczeniowa głębokość nadmiernie obciążonego betonu nie może być bezpośrednio uznana za głębokość uszkodzenia, ale stanowi pierwsze przybliżenie potencjalnego zasięgu uszkodzenia, spowodowanego przez napromienienie (RIVE), w wyniku długotrwałej eksploatacji. Grubość warstwy betonu nadmiernie naprężonego w prototypowej osłonie biologicznej (CBS) o całkowitej grubości 1,5 m z betonu o wytrzymałości na ściskanie 40 MPa, wynosi przeciętnie 8,6 cm w strefie ściskanej oraz 1,08 m w strefie rozciąganej. Te wyniki odpowiadają maksymalnemu strumieniowi neutronów na powierzchni betonu o wartości:  $3,1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  MeV), uzyskanej po 80 latach eksploatacji reaktora. Ponieważ znaczenie konstrukcyjne napromienionego betonu nie może być pominięte w przypadku przedłużonej eksploatacji reaktora z lekką wodą (LWR), to potrzebne jest zbudowanie specjalnego modelu żelbetu (RC), uwzględniającego zachowanie

- influence of reinforcement on the stress distribution;
- effects of development of damages in three dimensional space;
- development of damage and stress distribution in concrete;
- interdependence of humidity transportation, transfer of radiation and heat, transfer of neutron fields,  $\gamma$  radiation and three dimensional temperature fields;
- influence of concrete shrinkage on the damage development;
- influence of irradiated concrete creep on relaxation of stress due to swelling after irradiation (RIVE).

Giorla et al. (2015) proposed a simulation for swelling and damage propagation in concrete after irradiation, using experimental results published by Elleuch et al. (1972). Parameters of that model were carefully calibrated with regression analysis of available experimental data. Unknown parameters were replaced by data after theoretical consideration or known values that were previously published. Backward numerical analysis was applied for parameters when experimental estimation was difficult, like limit strain at final rupture. Simulated calculations published by Remec et al. (2016) indicate a possibility of concrete damages during exploitation.

Swelling due to radiation (RIVE) induce damages and their propagation around aggregate grains in a form of cracks across hardened cement paste; also the connections of cracks between grains are possible. Values of swelling after irradiation obtained from simulation correspond well with experimental data, and determined levels of damage confirm well previous estimations that were based on micromechanical analysis of properties after irradiation [Le Pape et al. (2015, Part. II)].

## 6. Concluding remarks

Experimental observations and works on modeling of processes in concrete reactor shields published in last few years open new possibilities for the results interpretation. Published reports concern reactors of different construction and conditions of exploitation, in which also various kinds of concretes with different components have been used.

Preliminary conclusions concern mainly light water reactors (LWR). It appears that gradual worsening of concrete properties in the shields after 40 years of exploitation is possible. That conclusion is confirmed by several damages in the shields of different reactors discovered after control verifications. In most cases local damages are caused by conventional actions of environment, but structural modifications in concrete due to excessive irradiation are also identified. Full estimation of their importance and reasons, particularly with respect to extension of exploitation of reactors is not available.

Ageing of concrete in the shields after long term exploitation and absorption of high doses of irradiation are subjected to studies in order to ensure the safety in existing NPPs, and also for appropriate design of concrete shields in new generations of reactors.

się napromienionego betonu, aby dalej prowadzić te badania. Dodatkowo, skutki w ciśnieniowej obudowie reaktora (RPV – Reactor Pressure Vessel) i w systemie zaopatrzenia reaktora w parę (NSSS – Nuclear Steam Supply System) powstałe w naprężeniach w betonowej osłonie (CBS) pod wpływem oddziaływań sejsmicznych, wymagają przeprowadzenia analizy trójwymiarowej (3D).

W modelu uwzględniono efekty pierwszego rzędu od napromienienia w zachowaniu się konstrukcji betonowej osłony, a liczne ograniczenia modelu powinny być uwzględnione w przyszłych badaniach, mianowicie:

- znaczenie uzbrojenia w rozkładzie naprężeń;
- skutki rozwoju efektów w przestrzeni trójwymiarowej;
- rozwój uszkodzenia i rozkład naprężeń w betonie;
- wzajemna zależność transportu wilgoci, przenoszenia napromieniania i przekazywania ciepła na rozwój zawartości wewnętrznej wilgoci, oraz pól neutronów, promieni  $\gamma$  i przestrzennych pól temperatury;
- wpływ skurczu na rozwój uszkodzenia;
- wpływ pełzania napromienionego betonu na relaksację naprężeń spowodowanych pęcznieniem w wyniku napromieniania (RIVE).

Giorla i in (2015) przeprowadzili symulację pęcznienia i propagacji uszkodzeń betonu poddanego promieniowaniu korzystając z wyników doświadczalnych opisanych przez Elleuch i in. (1972). Parametry modelu zostały starannie skalibrowane, stosując analizę regresji dostępnych danych doświadczalnych. Brakujące czynniki przyjęto na podstawie danych teoretycznych lub znanych wartości, uprzednio zaakceptowanych w publikacjach. Numeryczną analizę wstępną zastosowano do parametrów, których ocena doświadczalna była trudna, takich jak graniczne odkształcenie jednostkowe przy całkowitym zniszczeniu.

Powiększenie objętościowe spowodowane promieniowaniem (RIVE) wywołuje powstanie i propagację uszkodzeń wokół ziaren kruszywa w postaci rys przechodzących przez stwardniały zaczyn cementowy, a także tworząc połączenia rys pomiędzy ziarnami. Wielkości pęcznienia po napromienieniu uzyskane w wyniku symulacji dobrze odpowiadają wynikom doświadczalnym, a uzyskane poziomy uszkodzenia w pełni potwierdzają poprzednie oceny, oparte na mikromechanicznej interpretacji właściwości po napromienieniu (Le Pape et al. 2015, cz. II). Wyniki przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych, między innymi przez Remeca i in. (2016), wskazują na możliwość znacznego pogorszenia właściwości betonów w osłonach już po upływie 40 lat eksploatacji; okazuje się więc, że dalsze badania w tym zakresie są konieczne.

## 6. Uwagi końcowe

Przedstawione wyniki doświadczalne i uzyskane z modelowania otwierają nowe perspektywy interpretacji doświadczeń, zmierza-

It is not possible to transfer directly environmental conditions and development of processes during exploitation of those constructions to the reactors that are designed and built at present. Both structures of modern reactors and properties of applied materials are different, than in the past. Presented review of research results on the influence of irradiation of concrete is related to verification of concrete shields in existing NPPs and to construction of safe shields in new generations of reactors. However, there are still several open questions to be answered in future research.

## Literatura / References

1. Ablewicz Z., Dubrowski W.B. (1986) Osłony przed promieniowaniem jonizującym. Arkady, Warszawa, 300 str.
2. Alexander, S.C., Effects of irradiation on concrete: final results. K. Harvell, U.K. Atomic Energy Research Establishment, 1963.
3. Batten, A.W.C., Effects of irradiation on the strength of concrete, United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell, 1960.
4. Brandt A.M. (2015) Trwałość betonu w konstrukcjach związanych z energetyką atomową, *Konf. „Awaryjne Budowlane”, Międzyzdroje*, 27-42.
5. Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiedzka D. (2013) – O wpływie promieniowania jonizującego na mikrostrukturę i właściwości osłon betonowych – przegląd. *Cement Wapno Beton*, **4**, 2013, 216-237.
6. Buck A.D. (1988), Characterization of radioactive concrete by petrographic and physical means, *ACI Mat. Journal*, 55-58, January-February.
7. Clark R. (1958) Radiation damage to concrete. *Techn. Rep. HW-56195*, Gen. Electric, Hanford Lab. Richland, WA.
8. Clifton J.R. (1991) Predicting the Remaining Service Life of Concrete, *NI-STIR.4712*, US. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555.
9. Defigh-Price C. (1981) Effects of Long-Term Exposure to Elevated Temperature on the Mechanical Properties of Hanford Concrete, *Report RHO-C-54*, Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
10. Dubrovskii V.B., Ibragimov Sh.Sh., Kulakovskii M.Ya., Ladygin A.Ya., Pergamenshchik B.K. (1966) Radiation damage in ordinary concrete. *Transl. Atomnaya Energiya*, **4**, 310-316, October 1967.
11. Elleuch, L., Dubois, F., Rappeneau, J. (1972) Effects of neutron radiation on special concretes and their components. *Special Publication of The American Concrete Institute*, **43**, 1071–1108.
12. Field K.G., Remec I., Le Pape Y. (2015) Radiation effects in concrete for nuclear power plants – Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects. *Nuclear Engineering and Design*, **282**, 144–157.
13. Fillmore D. L. (2004) Literature review of the effects of radiation and temperature on the aging of concrete. *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*, Idaho Falls, Idaho 83415..
14. Giorla A., Vaitova M., Le Pape Y., Stemberk P., (2015) Meso-scale modeling of irradiated concrete in test reactor. *Nuclear Engineering and Design*, December, 59-73
15. Hilsdorf H.K., Kropp J., Koch H.J. (1978) The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. *ACI*, SP 55-10, 223-251
16. Kelly B., Brocklehurst J., Mottershead D., McNearney S., Davidson I., (1969) The effects of reactor radiation on concrete. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Information Meeting on Prestress Concrete and Reactor Pressure Vessels and their Thermal Isolation*, Brussels, 237–265.
17. Le Pape Y., Field K.G., Remec I., (2013) Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling, *Nuclear Engineering and Design*, **282**, 126-143.

jących do przewidywania zmian betonu w osłonach reaktorów. Wstępne wnioski mogą dotyczyć zjawisk spodziewanych podczas rzeczywistej eksploatacji reaktorów rozmaitej konstrukcji, chociaż dyskutowane wyniki dotyczą głównie reaktorów lekkowodnych typu LWR. Publikowane wnioski z badań i obserwacji zachowania się betonowych osłon w reaktorach są niezmiernie cenne, jednak dotyczą rozmaitych betonów i ich składników, a także różnych konstrukcji reaktorów i warunków ich eksploatacji. Przeniesienie warunków środowiskowych i skali czasu eksploatacji tych konstrukcji na obecnie budowane i projektowane reaktory nie może być bezpośrednie.

Współcześnie projektowane i budowane osłony betonowe wymagają dalszych studiów i doświadczeń, a podstawowe zagadnienie trwałości osłon betonowych podczas eksploatacji reaktora nie zostało w pełni rozwiązane.

18. Le Pape Y. (2015) Structural effects of radiation-induced volumetric expansion on unreinforced concrete biological shield, *Nuclear Eng. a. Design*, **295**, 534–548.
19. Le Pape Y., Giorla A., Sanahuja J. (2016) Combined effects of temperature and irradiation on concrete damage. *J.of Adv.Concr.Tech.*, vol. **14**, 70-86, *Jap.Concr.Inst.*
20. Maruyama I., Kontani O. i in. (2013) Evaluation of irradiation effects on concrete structure –background and preparation of neutron irradiation test, *Proc. of the ASME Power Conf. 'Power 2013'* July 29–August 1, 2013, Boston, Massachusetts, USA.
21. Mirhosseini S.S. (2010) The effects of nuclear radiation on aging reinforced concrete structures in nuclear power plants. MAS Thesis, Univ. of Waterloo, Civ.Eng., Canada, 141 pp.
22. Naus D.J. (2010) A Compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures. NUREG/CR-7031 ORNL/TM-2009/175.
23. Price, B.T. et al, (1957), *Radiation shielding*, Pergamon Press, London, 267-277.
24. Remec I., Field K.G., Naus D.J., Rosseel T.M., Busby J.T. (2013) – Concrete aging and degradation in NPPs: LWRS Program R&D Progress Report, *Trans. of the Amer.Nucl. Soc.*, vol. 109, Washington, D.C. 403-406.
25. Remec I., Rosseel T.M., Field K.G., Le Pape Y. (2016) Characterization of radiation fields in biological shields of nuclear power plants for assessing concrete degradation. *EPJ Web of Conf.*, Oak Ridge Nat.Lab., 9pp.
26. Samarin A. (2013) Use of concrete as a biological shield from ionising radiation. *Energy and Environmental Engineering* **1(2)**, 90-97.
27. Sopko V., Trtík K., Vodák F., (2004) Influence of  $\gamma$  irradiation on concrete strength. *Acta Polytechnica*, **44**, 1, 57-58. Vodák F., Trtík K., Sopko V., Kapičková O., Demo P. (2005) Effect of  $\gamma$ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cem.&Concr.Res.*, **35**, 1447-1451.
28. Vodák F., Vydra V., Trtík K., Kapičková O. (2011) Effect of  $\gamma$  irradiation on properties of hardened cement paste. *Materials and Structures*, **44**, 101-107.
29. William K., Xi Y., Naus D. (2013) A review of the effects of radiation on microstructure and properties of concretes used in Nuclear Power Plants, United States Nuclear Regulatory Commission (NUREG). 106 str.
30. Zubov, V., Ivanov, A. (1966) Expansion of quartz caused by irradiation with fast neutrons. *Sov. Phys. Crystallogr.* **11**, 372–374.
31. The paper has been prepared within the Project "Durability and efficiency of concrete shields against ionizing radiation in nuclear power structures" (Project no PBSII/A2/15/2014), National Centre for Research and Development.
32. Artykuł został przygotowany w ramach Projektu „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej”, PBS II/A2/15/2014.