

dr inż. Tomasz Piotrowski¹⁾*)
mgr inż. Michał Lidner¹⁾

Oddziaływania przy projektowaniu elektrowni jądrowej

Actions in nuclear power plant design

DOI: 10.15199/33.2015.09.09

Streszczenie. W artykule przedstawiono francuskie wytyczne do projektowania obudowy reaktora elektrowni jądrowej RCC-CW, a w szczególności oddziaływania i obciążenia, które powinny być uwzględnione na etapie projektowania. Przedstawiono w formie tabelaryzowanej, które z nich są określone w normach z grupy Eurokodów konstrukcyjnych, a które nie. Określono również rodzaje podejść projektowych i sytuacji projektowych przedstawionych w normie RCC-CW, jak również sposób ustalania wartości kombinacyjnej oddziaływań w Stanie Granicznym Nośności i Użytkowości.

Słowa kluczowe: oddziaływania, projektowanie, elektrownia jądrowa.

Abstract. The authors describe the French guidelines for the design of a nuclear power plant reactor building RCC-CW, and in particular the actions and loads that should be taken into account at the design stage. It was presented in tabulated form, which ones are specified in the structural Eurocodes and which are not specified. Also types of design domains and design situations which are presented in the code RCC-CW were described, as well as the determination of the value of combination effects in the ultimate limit states and serviceability limit states.

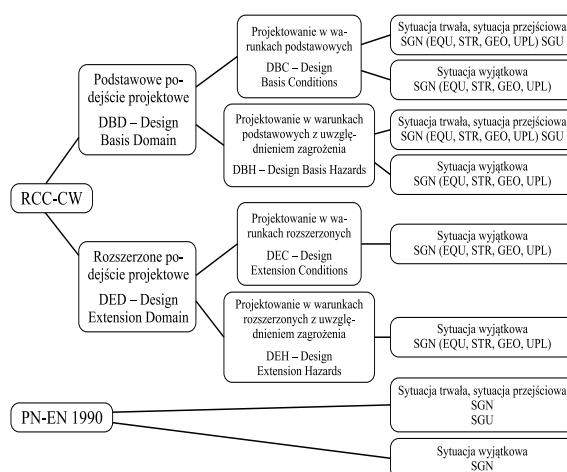
Keywords: actions, designing, nuclear power plant.

Projektowanie elektrowni jądrowej jest bardzo skomplikowaną i wieloetapową inwestycją, rozłożoną w czasie na wiele lat. Można wyróżnić najważniejsze jej etapy, do których należą projekty: koncepcyjny, budowlany i wykonawczy, a następnie budowę elektrowni, montaż aparatury i jej rozruch. W Polsce, po kilkudziesięciu latach od zaniechania budowy elektrowni w Żarnowcu, na nowo podjęto decyzję o budowie elektrowni jądrowej. W tym procesie niezbędny jest udział środowiska naukowego z różnych dziedzin i obszarów nauki. W związku z tym, że będzie to pierwsza tego typu inwestycja w Polsce, wiedzę należy czerpać z doświadczeń państw sąsiednich, które już wybudowały elektrownie jądrowe. Wydaje się, że najbardziej spójne z warunkami polskimi są francuskie wytyczne AFCEN do projektowania obudowy reaktora elektrowni jądrowej RCC-CW [1], które są nową edycją opisywanych wcześniej wytycznych ETC-C [2]. Wytyczne RCC-CW są zgodne z grupą Eurokodów konstrukcyjnych (we wstępie występuje nawet powołanie się na Eurokody), które również w Polsce mają zastosowanie do przyjmowania oddziaływań i obciążeń na etapie projektowania.

Każdy kraj może jednak wprowadzać zmiany do niektórych reguł norm z grupy Eurokodów za pośrednictwem załączników krajowych, co może prowadzić do pewnej niezgodności pomiędzy RCC-CW a Eurokodami. We wcześniejszych publikacjach dotyczących tej tematyki wskazywano już na niespójności wytycznych AFCEN i stanu normalizacji w Polsce m.in. w aspektach geotechnicznych [2] i materiałowych, np. zbrojenia do betonu [2] oraz samego betonu [3]. W związku z tym na kształt tych dokumentów trzeba wpływać w trakcie ich powstawania i przed zatwierdzeniem.

Charakterystyka podejść i sytuacji projektowych oraz oddziaływań

Strukturę podejść i sytuacji projektowych oraz oddziaływań opisanych w wytycznych RCC-CW przedstawiono na rysunku 1. W przeciwieństwie do PN-EN 1990 [4], w wytycznych RCC-CW wyróżnia się dwa nadrzędne podejścia projektowe ułożone ponad sytuacjami obliczeniowymi i stanami granicznymi. Jest to Podstawowe Podejście Projektowe – **DBD** (*Design Basis Domain*)



Rys. 1. Struktura podejść projektowych i sytuacji obliczeniowych wg RCC-CW [1] i PN-EN 1990 [4]

Fig. 1. The structure of design domains and design situations by RCC-CW [1] i PN-EN 1990 [4]

i Rozszerzone Podejście Projektowe – **DED** (*Design Extension Domain*).

Podstawowe podejście projektowe DBD dotyczy projektowania budynków elektrowni podczas zwykłej pracy reaktora. Oddziaływania, którym poddany jest budynek reaktora, klasyfikuje się jako: stałe; zmienne; wyjątkowe (przypadkowe, spowodowane np. w wyniku błędów pracowników elektrowni) i wyjątkowe określone jako „hazardy” (zamierzone działania, np. terrorystyczne). DBD składa się z dwóch podejść podrzędnych: projektowanie w warunkach podstawowych – **DBC** (*Design Basis Conditions*) i projekto-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Autor do korespondencji:
t.piotrowski@il.pw.edu.pl

wanie w warunkach podstawowych z uwzględnieniem zagrożenia – **DBH** (*Desin Basis Hazards*). Oba podejścia bazują na metodzie stanów granicznych oraz metodzie współczynników częściowych (tak jak Eurokody), ale powinny być adaptowane oddzielnie do każdego przypadku projektowego.

Rozszerzone Podejście Projektowe DED uwzględnia tego samego rodzaju obciążenia, ale jest związane z pojawieniem się wysokich poziomów ciśnienia wewnątrz obudowy budynku reaktora w momencie jego zniszczenia. Podejście to stosuje się w celu zapewnienia odpowiedniej szczelności pod wpływem zwiększonego ciśnienia, nawet jeśli materiał będzie ulegał zniszczeniu. Wówczas rozważa się, że budynek reaktora poddany jest działaniu obciążenia stałego, zmiennego, ale również wyjątkowego (które np. doprowadziło do zniszczenia reaktora). W tym podejściu wyróżnia się również dwa podejścia podrzędne: projektowanie w warunkach rozszerzonych – **DEC** (*Design Extension Conditions*) i projektowanie w warunkach rozszerzonych z uwzględnieniem zagrożenia – **DEH** (*Design Extension Hazards*). Podejście to może być spełnione na trzy sposoby:

- gdy poziom obciążenia wynikły z tego podejścia będzie mniejszy od nośności konstrukcji z odpowiednio akceptowalną wartością współczynnika niezawodności lub
- poczyni się zaawansowane obliczenia numeryczne z uwzględnieniem analiz nieliniowych lub
- zastosuje się klasyczne podejście z wykorzystaniem współczynników redukcyjnych.

W każdym podrzędnym podejściu projektowym w DBD wyróżnia się sytuacje obliczeniowe: trwałą, przejściową i wyjątkową, a w każdej sytuacji projektowej Stany Graniczne Nośności (EQU, GEO, STR, UPL) i Stany Graniczne Użyteczności (kombinacja: charakterystyczna, częsta, prawie-stała). W DED natomiast sprawdza się tylko Stan Graniczny Nośności w sytuacji wyjątkowej.

W tabeli 1 wymieniono wszystkie oddziaływania i obciążenia, które należy rozpatrzyć zgodnie z RCC-CW, a także określono, w której części PN-EN (Eurokodów) obowiązującej do stosowa-

Tabela 1. Oddziaływania zalecane do rozpatrzenia w RCC-CW [1] wraz z określeniem ich umiejscowienia w normach PN-EN

Table 1. Actions recommended for consideration in RCC-CW [1] with an indication of their location in PN-EN codes

Rodzaj oddziaływania	Norma PN-EN
Oddziaływania stałe:	
– ciężar własny elementów konstrukcji	PN-EN 1991-1-1
– ciężar własny trwałe zamocowanych urządzeń	PN-EN 1991-1-1
– ciśnienie hydrostatyczne cieczy (w basenach lub innych zbiornikach)	PN-EN 1991-4 (zgodnie z tą normą ciśnienie cieczy należałoby zaliczyć do oddziaływań zmiennych)
– stałe parcie poziome gruntu	PN-EN 1997-1
– oddziaływanie wywołane zmianą poziomu zwierciadła wody gruntowej (oznaczone jako $G_{k,wl}$)	PN-EN 1997-1
– stałe oddziaływania termiczne (oznaczone jako $G_{k,T}$)	PN-EN 1991-1-5
– stałe przemieszczenie podłoża gruntowego	PN-EN 1997-1
– oddziaływanie od sprężenia (oznaczone jako P)	PN-EN 1992-1-1
Oddziaływania zmienne:	
– oddziaływania podczas wykonywania konstrukcji (oznaczone jako $Q_{k,c}$)	PN-EN 1991-1-6
– oddziaływania podczas pracy żurawii, dźwignic, wciągników, suwnic (oznaczone jako $Q_{k,l}$)	PN-EN 1991-3
– oddziaływania spowodowane zmianą temperatury wody (w sytuacji trwałej oznaczone jako $Q_{k,TN}$ oraz przejściowej jako $Q_{k,TE}$)	brak
– ciśnienie wywołane zmianą poziomu cieczy (pozytywne i negatywne)	PN-EN 1991-4
– oddziaływanie wywołane zmianą poziomu zwierciadła wody gruntowej (oznaczone jako $Q_{k,wl}$)	PN-EN 1997-1
– oddziaływanie wiatru (oznaczone jako $Q_{k,w}$)	PN-EN 1991-1-4
– oddziaływanie śniegu (oznaczone jako $Q_{k,s}$)	PN-EN 1991-1-3
– oddziaływanie wywołane podstawową kombinacją sejsmiczną (oznaczone jako $Q_{k,E}$)	PN-EN 1998
– oddziaływanie zmienne wywołane testami żurawii, suwnic itp. (oznaczone jako $Q_{k,test}$)	PN-EN 1991-3
– oddziaływanie zmienne związane z próbami ciśnienia w budynku reaktora ($Q_{k,test}$)	brak
Oddziaływania wyjątkowe w DBD:	
– zmiana temperatury wody w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{db,T}$)	brak
– oddziaływanie „Loss Of Primary Coolant Accident” w budynku reaktora – utrata głównego chłodziwa (oznaczone jako $A_{db,p}$)	brak
– oddziaływanie „Steam Pipe Break” w budynku reaktora – rozszczelnienie rury – (oznaczone jako $A_{db,SS,p}$)	brak
Oddziaływania wyjątkowe „hazards” w DBD:	
– upadek ciężaru (oznaczone jako $A_{db,m}$)	PN-EN 1991-1-7
– oddziaływanie „Rupture of High-Energy Pipework” – rozerwanie systemu rur (oznaczone jako $A_{db,HE}$)	brak
– zewnętrzny wybuch (oznaczone jako $A_{db,exp}$)	brak
– oddziaływanie od uderzenia samolotu z uwzględnieniem wzbudzenia dynamicznego konstrukcji i reakcji urządzeń i wody w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{db,apc}$)	PN-EN 1991-1-7
– oddziaływanie wywołane podstawową kombinacją sejsmiczną z uwzględnieniem wzbudzenia dynamicznego konstrukcji i reakcji urządzeń i wody w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{db,E}$)	PN-EN 1998
– wewnętrzne lub zewnętrzne podtopienie (oznaczone jako $A_{db,wl}$)	brak
– wystąpienie pocisku rakietowego (oznaczone jako $A_{db,m}$)	brak
– wyjątkowe oddziaływania klimatyczne: wyjątkowy śnieg (oznaczone jako $A_{db,s}$), wyjątkowy wiatr (oznaczone jako $A_{db,w}$), wyjątkowa temperatura (oznaczone jako $A_{db,T,ext}$), trąba powietrzna (oznaczone jako $A_{db,to}$)	PN-EN 1991-1-3, PN-EN 1991-1-4, PN-EN 1991-1-5
– pożar (oznaczone jako $A_{db,f}$)	PN-EN 1991-1-2
Rozszerzone oddziaływania wyjątkowe w DED:	
– oddziaływanie „Loss Of Primary Coolant Accident” w budynku reaktora – utrata głównego chłodziwa (oznaczone jako $A_{de,p}$)	brak
– oddziaływanie „Steam Pipe Break” w budynku reaktora – rozszczelnienie rury (oznaczone jako $A_{de,SS,p}$)	brak
– groźne wypadki (oznaczone jako $A_{de,A}$)	brak
Rozszerzone oddziaływania wyjątkowe „hazards” w DED:	
– upadek ciężaru wewnątrz budynku reaktora (oznaczone jako $A_{de,m}$)	PN-EN 1991-1-7
– zewnętrzny wybuch (oznaczone jako $A_{de,exp}$)	brak
– oddziaływanie od uderzenia samolotu z uwzględnieniem wzbudzenia dynamicznego konstrukcji i reakcji urządzeń i wody w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{de,apc}$)	PN-EN 1991-1-7
– oddziaływanie sejsmiczne z uwzględnieniem wzbudzenia dynamicznego konstrukcji i reakcji urządzeń i wody w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{de,E}$)	PN-EN 1998
– wewnętrzne lub zewnętrzne podtopienie (oznaczone jako $A_{de,wl}$)	brak
– oddziaływanie zmiany temperatury w basenach, zbiornikach (oznaczone jako $A_{de,T}$)	brak
– wyjątkowy śnieg (oznaczone jako $A_{de,s}$)	PN-EN 1991-1-3
– wyjątkowy wiatr (oznaczone jako $A_{de,w}$)	PN-EN 1991-1-4
– wyjątkowa temperatura powietrza (oznaczone jako $A_{de,T,ext}$)	PN-EN 1991-1-5
– trąba powietrzna (oznaczone jako $A_{de,to}$)	brak

nia w Polsce znajduje się powołanie na to oddziaływanie (obciążenie).

Norma RCC-CW [1] podaje również metody określania niektórych oddziaływań w załącznikach: DA – dotyczy projektowania na oddziaływania sejsmiczne; DB – dotyczy projektowania z uwzględnieniem skurczu i pęcznienia betonu; DC – dotyczy projektowania na uderzenie pocisku rakietowego lub masy skupionej; DD – dotyczy projektowania na uderzenie samolotu; DF – dotyczy wyznaczania wartości zastępczego współczynnika dynamicznego; DK – dotyczy określenia wartości oddziaływań podczas trąby powietrznej; DL – określa zasady określania wpływu temperatury; DM – określa zaawansowane metody projektowania z uwzględnieniem oddziaływań sejsmicznych.

Współczynniki częściowe obciążeń są zgodne z normą PN-EN 1990 [4] ($\gamma_{G,sup} = 1,35/1,1$ w STR/EQU, $\gamma_{G,inf} = 1,0/0,9$ w STR/EQU, $\gamma_Q = 1,5$, współczynniki ψ wg tabeli A.1 jak w przypadku powierzchni kategorii G oraz śniegu, wiatru, temperatury). Do oddziaływań związanych ze zmianą ciśnienia hydrostatycznego cieczy wykorzystuje się współczynnik częściowy obciążeń $\gamma_Q = 1,2$ określony w normie PN-EN 1991-4 [5], a do wyznaczenia wartości kombinacyjnej oddziaływań – kombinację podstawową w Stanie Granicznym Nośności (wzór 6.10 w PN-EN 1990 [4]) oraz kombinację charakterystyczną, częstą i prawie-stałą w Stanie Granicznym Użytkowości.

Przykład kombinacji obciążeń

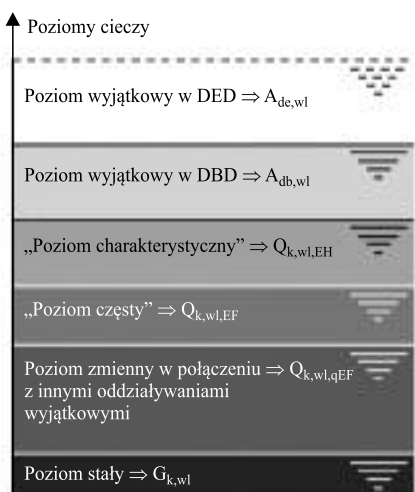
W tabeli 2 przedstawiono przykładowe kombinacje obciążeń w DBD w sytuacji trwałej i wyjątkowej (powódź). W sytuacji trwałej, w każdej kombinacji, uwzględniamy jedno obciążenie

Tabela 2. Przykładowe kombinacje oddziaływań w DBD w sytuacji trwałej i wyjątkowej (powódź) [1]

Table 2. The examples of combinations of actions in DBD in transient and accidental situation (flooding)[1]

Oddziaływanie	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	P	$Q_{k,L}$	$Q_{k,T}$	$Q_{k,w}$	$Q_{k,s}$	$Q_{k,w,LEF}$ poziom „częsty”	$Q_{k,w,LEH}$ poziom „charakterystyczny”	$A_{db,wl}$
Sytuacja trwała	1	1,35	1,0	1,0	1,5	0,9	0,9	0,75	1,2	–
	2	1,35	1,0	1,0	1,05	1,5	0,9	0,75	1,2	–
	3	1,35	1,0	1,0	1,05	0,9	1,5	0,75	1,2	–
	4	1,35	1,0	1,0	1,05	0,9	0,9	1,5	1,2	–
	5	1,35	1,0	1,0	1,05	0,9	0,9	0,75	–	1,2
Sytuacja wyjątkowa	6	1,0	1,0	1,0	0,3	0,5	–	–	–	1,0

główne zmienne ze współczynnikiem γ_Q , a pozostałe ze współczynnikiem $\gamma_Q \times \psi_0$. Współczynnik częściowy dotyczący parcia hydrostatycznego cieczy wynosi 1,2 zgodnie z PN-EN 1991-4 [3], ale gdy parcie cieczy jest oddziaływaniem głównym, uwzględnia się „poziom charakterystyczny”, natomiast w pozostałych przypadkach „poziom częsty”. W sytuacji wyjątkowej uwzględnia się „poziom wyjątkowy” cieczy. Różnice pomiędzy każdym z „poziomów” przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat poziomów cieczy, na podstawie [1]

Fig. 2. The schema of fluid levels according to RCC-CW [1]

Podsumowanie

Projektowanie elektrowni jądrowej będzie wiązało się z uwzględnieniem wielu różnych oddziaływań. Część z nich jest typowa i łatwa do ustalenia, ale wiele z wymienionych obciążeń nie ma swoich odniesień w normach PN-EN i kwestia ustalenia ich wartości będzie sprawą dyskusyjną i zależną od możliwych do wyłożenia środków finansowych na budowę elektrowni.

Artykuł powstał dzięki współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej w ramach konsorcjum Pol-Nuclear BCC, którego działalność jest współfinansowana z pracy statutowej realizowanej na WIL PW w 2014 i 2015 r.

Literatura

- [1] RCC-CW, 2015, Evolutionary Power Reactor – Technical code for civil works.
- [2] Piotrowski T., Maślakowski M., Kuszyk R., Budowa elektrowni jądrowej w Polsce w świetle wymagań ETC-C i innych standardów technicznych na świecie, Materiały Budowlane 5 (501) 2014, 88 – 90.
- [3] Piotrowski T., Wymagania dotyczące betonu w elektrowni jądrowej typu EPR wg ETC-C a normalizacja w Polsce, Materiały Budowlane, 5 (489) 2013, 35 – 38.
- [4] PN-EN 1990, 2008, Eurokod 0. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [5] PN-EN 1991-4, 2008, Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.

Przyjęto do druku: 30.07.2015 r.

Serdecznie dziękujemy
Panu dr. inż. Tomaszowi Piotrowskiemu
z Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej
za koordynację bloku „Budowa elektrowni jądrowych”

Redakcja