

OBLICZENIA OBSZARU OGRANICZONEGO UŻYTKOWANIA WOKÓŁ PIERWSZEJ POLSKIEJ ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Calculation of the restricted-use area around the first Polish nuclear power plant

Wojciech Bielewski, Krzysztof Wojciech Fornalski

Streszczenie: Poniższy raport stanowi podsumowanie trzymiesięcznych praktyk odbytych w PGE EJ 1 Sp. z o.o. na przełomie 2014 i 2015 r., których celem było uproszczone oszacowanie promienia obszaru ograniczonego użytkowania wokół planowanej polskiej elektrowni jądrowej do celów poglądowych i edukacyjnych. Kalkulacje wymagały uwzględnienia danych meteorologicznych, parametrów emisji, a także danych o rocznej aktywności substancji promieniotwórczych uwalnianych w przypadku zaistnienia różnych sytuacji eksploatacyjnych. Podczas obliczeń rozpraszania substancji w powietrzu posłużono się modelem chmury Gaussa (uproszczeniem modelu Lagrange'a) oraz modelem dyfuzji atmosferycznej Sagendorfa. Przyjęte limity dawek oraz sposób ich szacowania zostały ustalone w zgodzie z zasadami opisanymi w art. 36f ustawy Prawo atomowe. Brak decyzji dotyczącej konkretnej technologii reaktora mającego powstać w Polsce wymusił uwzględnienie w obliczeniach różnych typów elektrowni. Obliczenia pokazały, iż brak dostępności precyzyjnych danych dotyczących parametrów emisji substancji w przypadku różnych typów awarii dla różnych reaktorów, uniemożliwia określenie dokładnego promienia obszaru ograniczonego użytkowania (głównie w warunkach awaryjnych bez stopienia rdzenia). Udowodniono jednak, jak duży wpływ na wielkość tego obszaru mają wspomniane parametry, a także określono, jaki jest w przybliżeniu charakter zmian rozkładu dawek promieniowania w przypadku zmiany każdego z nich. W warunkach normalnej eksploatacji oraz przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych, uwolnienia dla technologii EPR, AP1000 oraz ESBWR nie spowodowały przekroczenia progu rocznej dawki skutecznej, zdefiniowanego w Prawie atomowym jako limitujący, wymagający utworzenia obszaru ograniczonego użytkowania. Największe dawki w tych warunkach generowane są natomiast w przypadku reaktorów typu ESBWR. W warunkach awaryjnych bez stopienia rdzenia, dla pewnego zestawu założonych parametrów emisji, roczne dawki skuteczne przekraczały próg 10 mSv, wymuszając tym samym określenie obszaru ograniczonego użytkowania. Natomiast przy innym pakiecie parametrów dawki spadały poniżej tego progu. Zgodnie z obliczeniami, niezależnie od przyjętych wartości, najwyższe dawki spośród technologii ESBWR, EPR i AP1000 generowała pierwsza z nich w wyniku awarii ze zniszczeniem 1000 prętów paliwowych.

Abstract: The following report is a summary of the three-month internship in PGE EJ1 at the turn of 2014 and 2015. Its purpose was to calculate, in a simplified manner, the radius of the restricted-use area around the first planned Polish nuclear power plant, for the educational and illustrative purposes. The calculations required meteorological data, emission parameters and annual activities of radioactive substances released in the event of occurrence of different operational situations to be included as an input. The dispersion of substances in the air was modeled using Gaussian cloud model (Lagrange model simplification) and Sagendorf atmospheric diffusion model. The effective doses limits and methods of calculating them were determined based on art. 36f of the Polish Atomic Law. Lack of decision regarding a particular reactor technology to be introduced in Poland forced us to include various types of nuclear power plant in the simulations. The results of the calculations showed that the lack of availability of precise data on emission parameters in case of various types of emergencies for different reactors makes it impossible to determine the exact radius of the restricted-use area. Nonetheless, it has been proven that the size of this area is heavily influenced by the aforementioned parameters. Moreover, the approximate character of changes in the distribution of radiation doses in the event of a change in each of them has been determined. Under normal operating conditions and during predictable operating emergencies, releases for EPR, AP1000 and ESBWR technologies did not exceed the threshold of annual effective dose, defined in the Atomic Law as a limited one, requiring the creation of a restricted-use area. The highest doses in these conditions are generated in case of ESBWR type reactors. Under emergency conditions during which the reactor core remains safe, for a certain set of assumed emission parameters, the annual effective doses exceeded the threshold of 10 mSv, thus forcing the determination of the restricted-use area. Whereas, with a different set of parameters, the doses fell below this limit. According to calculation results, regardless of the values adopted, the highest doses among ESBWR, EPR and AP1000 technologies generated the first of them in the case of 1000 fuel rods failure.

Słowa kluczowe: obszar ograniczonego użytkowania, formuła Sagendorfa, parametry emisji, dawka skuteczna, elektrownia jądrowa, ESBWR

Keywords: restricted-use area, Sagendorf formula, emission parameters, effective dose, nuclear power plant, ESBWR

WSTĘP – PODSTAWY PRAWNE

1.1. OBSZAR OGRANICZONEGO UŻYTKOWANIA – IDEA

Idea, jak również sposób obliczenia promienia obszaru ograniczonego użytkowania (skrót OOU) nie są do końca ustalone, ustawa Prawo ochrony środowiska [1] nie zawiera bowiem jasnego sformułowania tego zagadnienia. W jedynej publikacji związanej z tym tematem umieszczono definicje opracowane przez różnych autorów [2]. Jedna z nich określa, iż stworzenie OOU ma usunąć szkodliwe dla zdrowia i środowiska skutki przekroczenia standardów, jak również umożliwić dalszą działalność zakładu, dla którego został utworzony. Powoduje to pojawienie się pewnego reżimu prawnego polegającego na tym, że na terenie OOU nie muszą być dotrzymane standardy jakości. Dany zakład może więc dalej funkcjonować, pomimo niespełniania wszystkich wymogów. Z jednej strony widać tu więc ideę ochrony środowiska (pośrednio ochronę życia i zdrowia ludzkiego), z drugiej zaś ideę ochrony praw majątkowych (pośrednio ochronę wolności działalności gospodarczej). Jak można przeczytać w Prawie ochrony środowiska, problem z dotrzymaniem standardów jakości środowiska związany był z hałasem, nieprzyjemnymi zapachami i silnymi polami elektromagnetycznymi. Wynika to z charakterystyki lotnisk, autostrad, torów kolejowych, wysypisk śmieci, oczyszczalni ścieków i kompostowni. Sąsiedztwo instalacji radiowych, linii wysokiego napięcia i stacji transformatorowych może wiązać się z różnego rodzaju niebezpieczeństwami. We wszystkich wymienionych przypadkach podstawą tworzenia OOU jest przekraczanie dozwolonych wartości w warunkach normalnej eksploatacji, które wiąże się z niebezpieczeństwem dla zdrowia. Pod uwagę nie bierze się natomiast sytuacji tzw. awaryjnych (wybuchów transformatorów, katastrof lotniczych, niekontrolowanych wycieków itd.). W przypadku obiektów jądrowych sytuacja wygląda inaczej. Podczas obliczeń promienia OOU wokół tego typu budynków bierze się bowiem pod uwagę także warunki awaryjne, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest jednak bardzo małe [3].

1.2. OOU WOKÓŁ OBIEKTU JĄDROWEGO – USTAWA PRAWO ATOMOWE

Pomimo że mieszkanie w sąsiedztwie elektrowni jądrowej nie jest uciążliwe czy niezdrowe (eksploatacja nie powoduje przekroczenia standardów jakości środowiska), ustawa Prawo atomowe [4] w art. 36f nakazuje wyznaczenie OOU wokół obiektu jądrowego według następujących zasad:

1. Wokół obiektu jądrowego tworzy się obszar ograniczonego użytkowania, na zasadach określonych w ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2008 r. Nr 25, poz. 150, z późn. zm.56).

2. Obszar ograniczonego użytkowania wokół obiektu jądrowego obejmuje teren, na zewnątrz którego:

- 1) w stanach eksploatacyjnych obiektu jądrowego obejmujących normalną eksploatację oraz przewidywane zdarzenia eksploatacyjne roczna dawka skuteczna (efektywna) od wszystkich dróg narażenia nie przekroczy 0,3 milisiwerta (mSv);
- 2) w razie awarii bez stopienia rdzenia roczna dawka skuteczna (efektywna) od wszystkich dróg narażenia nie przekroczy 10 milisiwertów (mSv).

Analizując zacytowane powyżej limity dawek można stwierdzić, że ustalone przepisy są rygorystyczne. Należy pamiętać, iż całkowita roczna dawka skuteczna otrzymywana w Polsce ze źródeł naturalnych jest ok. 9 razy większa niż ta dodatkowa, ustalona przepisami dla stanów eksploatacyjnych, natomiast przy płocie współczesnych elektrowni jądrowych otrzymuje się dawkę dodatkową wielokrotnie mniejszą [5]. Z kolei dawka graniczna dla osób z ogółu ludności w Polsce wynosi 1 mSv/rok (ze źródeł sztucznych pozamedycznych) [5]. Określanie OOU wokół elektrowni jądrowej byłoby bezpodstawne, jeśli brałoby się pod uwagę tylko warunki normalnej eksploatacji. W obliczeniach należy wziąć pod uwagę również tzw. przewidywane zdarzenia eksploatacyjne, które mogą spowodować wzrost poziomu promieniowania. Prawo atomowe określa je jako „procesy eksploatacyjne odbiegające od normalnej eksploatacji, których wystąpienie jest przewidywane co najmniej jeden raz podczas okresu eksploatacji obiektu jądrowego, ale które - dzięki zastosowaniu odpowiednich rozwiązań projektowych - nie spowodują znaczącego uszkodzenia systemów lub elementów konstrukcji, lub wyposażenia ważnych dla bezpieczeństwa obiektu jądrowego, a także nie doprowadzą do powstania warunków awaryjnych”. Ustawa wprowadza również warunki awaryjne jako podstawę do obliczeń promienia OOU. Użyte określenie „awaria bez stopienia rdzenia” wymaga odpowiedniej interpretacji, co jak się okazuje nie jest łatwym zadaniem. Ogólnie oznacza ono wszystkie „awarie projektowe”, tzn. „warunki awaryjne obiektu jądrowego uwzględnione w projekcie obiektu jądrowego, w których uszkodzenie paliwa oraz uwolnienia substancji promieniotwórczych są utrzymywane w ustalonych granicach” oraz „sekwencje złożone” stanowiące część „rozszerzonych warunków projektowych”, ale niebędących „ciężkimi awariami” (tj. awariami, które prowadzą do znaczącej degradacji rdzenia reaktora, a nawet jego stopienia). Sekwencje złożone to sekwencje zdarzeń, które wykraczają poza te przyjęte w założeniach projektowych i mogące potencjalnie prowadzić do znaczących uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska, lecz nieprowadzące do stopienia rdzenia reaktora. Są one efektem uszkodzeń urządzeń lub błędów operatora [3].

Rozporządzenie projektowe wymienia sekwencje złożone, które należy wziąć pod uwagę w trakcie analiz [6]:

- przewidywane stany przejściowe bez awaryjnego wyłączenia reaktora mogące prowadzić do uwolnień substancji promieniotwórczych poza pierwotną obudowę bezpieczeństwa,
- awarie związane z ominięciem obudowy bezpieczeństwa,
- całkowity zanik zasilania elektrycznego prądem przemiennym,
- całkowita utrata funkcji systemu wody zasilającej,
- rozerwanie rurociągu obiegu chłodzenia reaktora, z jednoczesną utratą jednego ciągu systemu awaryjnego chłodzenia reaktora,
- całkowita utrata funkcji systemu pośredniego chłodzenia urządzeń jądrowych,
- niekontrolowane rozcieńczenie kwasu borowego w reaktorze wodno-ciśnieniowym,
- rozerwanie wielu rurek wymiany ciepła w wytwornicy pary reaktora wodno-ciśnieniowego,
- utrata możliwości odprowadzania ciepła do ostatecznego ujścia (odbiornika) ciepła.

Co więcej, Rozporządzenie projektowe [6] w §9 pkt. 2 rozszerza warunki z Prawa atomowego dodatkowym, obejmującym wszystkie rozszerzone warunki projektowe (tzn. też ciężkie awarie, których efektem jest duża degradacja paliwa, w tym stopień rdzenia reaktora, ale bez uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora). W rozporządzeniu tym można przeczytać, że „projekt obiektu jądrowego zapewnia ograniczenie uwolnień substancji promieniotwórczych poza obudowę bezpieczeństwa reaktora w razie zaistnienia warunków awaryjnych, tak żeby w przypadku wystąpienia rozszerzonych warunków projektowych nie było konieczne podejmowanie wczesnych ani długoterminowych działań interwencyjnych poza granicami OOU obiektu jądrowego.” Problem interpretacyjny został jednak rozwiązany przez prawników (z uwagi na hierarchię aktów prawnych), gdyż OOU określa się bezwzględnie zgodnie z art. 36f Prawa atomowego i dla tak określonych granic spełnione muszą zostać wymagania dotyczące projektu obiektu jądrowego określone w art. 9 Rozporządzenia projektowego. Dla potrzeb analiz można więc przyjąć jako warunki limitujące tylko te, które przedstawiono w Prawie atomowym.

1.3. SPOSÓB SZACOWANIA DAWEK

W art. 36f ust. 3 ustawy Prawo atomowe przedstawione zostały dane i informacje, które powinno się bezwzględnie wziąć pod uwagę w trakcie analiz rozkładu rocznych dawek skutecznych wokół obiektu jądrowego (schemat tych informacji został umieszczony na (rys. 1). Zgodnie z prawem powin-

no się wziąć pod uwagę parametry obiektu (w tym jego konstrukcję, stosowane środki bezpieczeństwa, przewidywane aktywności uwolnionych substancji promieniotwórczych i rodzaj obecnych w nim materiałów jądrowych), jego lokalizację (w tym w szerokim rozumieniu warunki środowiska), procedury jego eksploatacji w warunkach normalnych, rozkład dawek promieniowania w różnych odległościach od obiektu w stanach eksploatacyjnych i awaryjnych, a także „inne czynniki” mogące mieć wpływ na ocenę zagrożenia radiacyjnego.



Rys. 1. Schemat czynników, które według ustawy Prawo atomowe [4] należy uwzględnić w kalkulacjach rocznych dawek skutecznych

Fig. 1. Diagram of factors to be included in the calculation of annual effective doses according to the Polish Atomic Law

W trakcie wykonywania analizy rozkładu dawek skutecznych wokół obiektu jądrowego, konieczne jest odgórne przyjęcie konkretnych wartości wolnych parametrów, czyli takich, które nie znajdują się wśród dostępnych danych. We wszystkich przypadkach, niezależnie do czego odnosi się dany parametr, praktyka ochrony radiologicznej nakazuje stosowanie tzw. zasady pesymizacji. Odnosi się ona do uwzględniania w obliczeniach możliwie najbardziej niekorzystnych warunków, tak, by wynik odzwierciedlał sytuację graniczną. W wielu przypadkach określenie sytuacji najbardziej pesymistycznej jest jednak nietrywialne i wymaga głębszej analizy oraz specjalistycznej wiedzy. W przypadku parametrów meteorologicznych, dobra znajomość mechanizmów zachodzących w atmosferze w różnych warunkach pozwala na określenie trendu i zastosowanie pesymizacji. Natomiast w przypadku parametrów emisji takich jak np. temperatura gazów wylotowych, czy też wysokość punktu emisji, ich wpływ na rozkład dawek skutecznych wokół obiektu jądrowego jest nieustalony, zmienny wraz ze zmieniającymi się pozostałymi parametrami. Zastosowanie pesymizacji w ich przypadku obarczone jest dużą niepewnością, a brak danych dotyczących

ich konkretnych wartości w różnych stanach awaryjnych elektrowni uniemożliwia określenie promienia OOU w sposób jednoznaczny. Pokazuje to, jak ważne w tego typu kalkulacjach jest posiadanie pełnego kompletu danych dotyczących wszystkich zalecanych przez Prawo atomowe czynników, tj. oprócz danych meteorologicznych, również tych związanych z charakterystyką danej awarii.

OBLICZENIA DAWEK SKUTECZNYCH

1.4. METODYKA OBLICZEŃ I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Podstawą wszystkich kalkulacji odnoszących się do obiektów rzeczywistych jest przyjęcie odpowiedniego modelu matematycznego, który będzie najlepiej opisywał zachodzące procesy, wykorzystując znane i mierzalne parametry. W pracy tej jako model zastosowano formułę Sagendorfa, będącą przyjętym standardem w przypadku obliczeń dawek skutecznych wokół elektrowni jądrowych [7]. Jest to wzór sumacyjny, uwzględniający zarówno parametry meteorologiczne, jak i parametry emisji.

$$\frac{\chi}{A}(x) = \frac{2,032}{x} \sum_i \frac{p_i}{v_i \cdot \sigma_z(x)} \cdot \exp\left(\frac{-h_e^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x)}\right) \quad (1)$$

gdzie:

χ - stężenie substancji promieniotwórczych w chmurze [Bq/m^3]
 A - stałe natężenie, z jakim gazowe produkty rozszczepienia wydzielają się z EJ [Bq/s]

$\frac{\chi}{A}(x)$ - współczynnik rozrzedzenia atmosferycznego w funkcji odległości x od miejsca emisji [s/m^3]

h_e - efektywna wysokość punktu emisji [m]

v_i - średnia roczna prędkość wiatru wiejącego w danym kierunku na wysokości h_e [m/s]

p_i - udział wiatru o prędkości v_i w całkowitym rocznym rozkładzie [%]

$\sigma_z(x)$ - współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej w odległości x od punktu emisji [m]

Bazą dla formuły Sagendorfa jest najbardziej rozpowszechniony model rozpraszania z trajektorią prostoliniową o rozkładzie Gaussa, w którym przyjmuje się, że prędkość wiatru oraz tzw. kategoria stabilności atmosferycznej w punkcie emisji są charakterystyczne dla warunków atmosferycznych wzdłuż całej drogi chmury zawierającej substancje promieniotwórcze. Głównym założeniem do stosowania modelu Sagendorfa jest równomierne, długotrwałe wydzielanie się gazowych substancji promieniotwórczych z elektrowni jądrowej (ze stałym natężeniem). Zastosowana powyższa postać formuły obowiązuje przy założeniu, że w otoczeniu elektrowni nie znajdują się żadne budynki, a po emisji z komina wentylacyjnego nie występuje zjawisko zadymiania (ang. *fumigation*). Obydwa założenia eliminują konieczność wykonania m.in. obliczeń związanych

z wpływem turbulencji zachodzących w cieniu budynków, ale również zalecanych przez RG 1.145 [8] kalkulacji współczynnika rozrzedzenia atmosferycznego „przy uwolnieniach przez nieszczelności obudowy” - obejmują one bowiem „wszystkie uwolnienia zachodzące na wysokości mniejszej niż 2,5 razy wysokość sąsiednich budynków”. Założenie związane z brakiem budynków nie odbiega znacząco od planów związanych z lokalizacją elektrowni i jest akceptowalne w uproszczonych obliczeniach OOU. Zjawisko zadymiania powinno być uwzględnione, gdy lokalizacja położona jest 3200 m lub dalej od dużych zbiorników wodnych [8]. W przypadku pierwszej rozpatrywanej lokalizacji – Lubiętowa – elektrownia byłaby położona bezpośrednio przy brzegu morza. W przypadku lokalizacji Żarnowiec, elektrownia znajdowałaby się wprawdzie w odległości nieco większej niż 3200 m od linii brzegowej Morza Bałtyckiego, jednakże byłaby w bezpośrednim sąsiedztwie Jeziora Żarnowieckiego, które do uproszczonych obliczeń można uznać za „duży zbiornik wodny”. W obu przypadkach zjawisko zadymiania może więc zostać pominięte.

W przeprowadzonych uproszczonych obliczeniach założono również brak mechanizmów powodujących usuwanie substancji radioaktywnych ze smugi. Procesami takimi mogą być: rozpad promieniotwórczy powodujący spadek aktywności radioizotopów w czasie, osadzanie mokre (zjawisko wymywania pary i aerozoli z chmury radioaktywnej przez kropelki wody lub płatki śniegu podczas złej pogody, co prowadzi do opadu substancji promieniotwórczych na napotkane powierzchnie), osadzanie wskutek działania mgły, sedymentacja aerozoli lub osadzanie suche grawitacyjne (proces ciągły), zderzanie się aerozoli oraz adsorpcja par i gazów na powierzchni przeszkód na drodze wiatru, tworzenie i wzrost rozmiarów aerozoli (koalescencja) lub ponownie ulatnianie osadzonych uprzednio na powierzchniach materiałów. Pierwszy z procesów może zostać pominięty w uproszczonych oszacowaniach [9]. W dokładniejszych analizach należałoby natomiast uwzględnić fakt zmniejszania mocy dawki spowodowany rozpadem, szczególnie w odniesieniu do nuklidów o krótkim czasie połowicznego zaniku. Zaraz po awarii, izotopy te mają bardzo wysoką aktywność, która szybko spada w związku z dużą wartością stałej rozpadu. Wykonane uproszczenie powoduje, że podczas ekspansji chmury radioaktywnej w obliczeniach uwzględniana jest stale ta sama, maksymalna wartość początkowa aktywności. W rzeczywistości jednak, na większych odległościach wkład nuklidów krótkożyciowych staje się coraz mniej znaczący, z uwagi na ich szybki ubytek. Uwzględnienie pozostałych zjawisk wymagałoby dysponowania bardzo precyzyjną i bogatą bazą danych meteorologicznych. W związku z brakiem takowej założono (działając stale zgodnie z zasadą pesymizacji), iż zjawiska te nie zachodzą.

W szczegółowych analizach rozkładu dawek skutecznych wokół elektrowni jądrowych bierze się pod uwagę kilka źródeł narażenia:

- bezpośrednie promieniowanie z chmury zawierającej substancje promieniotwórcze,
- wchłanianie drogą oddechową (inhalacja),
- promieniowanie z osadów na powierzchni ziemi,
- wchłanianie drogą pokarmową (pośrednictwo biosfery).

Z uwagi na dostępność danych, a także uproszczony charakter analiz, w pracy tej uwzględniono pierwsze dwa źródła narażenia, które wnoszą największy wkład do dawki skutecznej.

Zgodnie z zaleceniami RG 1.145 [8], dane meteorologiczne potrzebne do określenia współczynnika rozrzedzenia atmosferycznego powinny przedstawiać średnie godzinowe, zebrane w ciągu całego roku. Umożliwia to, po obliczeniu wyników, stworzenie łącznego skumulowanego rozkładu prawdopodobieństwa dla poszczególnych sektorów oraz całej lokalizacji, a następnie wybranie wartości współczynników rozrzedzenia atmosferycznego o największej wadze statystycznej. Dostępne i użyte dane były jednak dużo uboższe, przedstawiały jedynie łączną roczną statystykę, co uniemożliwiło przeprowadzenie powyższej procedury. Po obliczeniu współczynników rozrzedzenia atmosferycznego w różnych odległościach od punktu emisji, możliwe jest wyznaczenie dawek skutecznych stosując odpowiednie, przedstawione poniżej formuły.

Dawka skuteczna od bezpośredniego promieniowania z chmury radioaktywnej w odległości x od miejsca emisji dla mieszaniny izotopów o łącznej aktywności A :

$$E(x) = \frac{\chi}{A}(x) \cdot \sum_i A_i \cdot K_{cci} \quad (2)$$

Dawka skuteczna (tj. na całe ciało) w wyniku inhalacji jodem wynosi:

$$E(x) = \frac{\chi}{A}(x) \cdot s \cdot \sum_j A_j^{jod} \cdot K_{oddj} \quad (3)$$

gdzie:

- A_i - aktywność i -tego radionuklidu (roczne uwolnienie) [Bq]
- A_j^{jod} - aktywność j -tego radioizotopu jodu (roczne uwolnienie) [Bq]
- s - szybkość inhalacji po awarii (średnio po 24h - $0,232 \cdot 10^{-3}$) [m^3/s]
- K_{cci} - współczynniki konwersji jednostek dla i -tego radionuklidu [$mSv \cdot m^3 / (Bq \cdot s)$]
- K_{oddj} - współczynniki konwersji jednostek dla j -tego radioizotopu jodu [$mSv \cdot m^3 / (Bq \cdot s)$]

Podczas oddychania główne niebezpieczeństwo związane ze skażeniami od elektrowni jądrowej pochodzi od wchłoniętych izotopów jodu. Całkowita dawka skuteczna w danej odległości x od punktu emisji

jest sumą dawki od bezpośredniego promieniowania z chmury radioaktywnej oraz dawki wewnętrznej pochodzącej od inhalacji jodem. Standardy ochrony radiologicznej uwzględniają konieczność przeliczenia dawki równoważnej na tarczycę na dawkę skuteczną (całe ciało) odpowiednim współczynnikiem wagowym tkanki.

Użycie formuły Sagendorfa do obliczenia współczynników rozrzedzenia atmosferycznego wymaga wyznaczenia dwóch parametrów związanych z modelem rozpraszania z rozkładem Gaussa - efektywnej wysokości punktu emisji h_e oraz współczynnika pionowej dyfuzji atmosferycznej σ_z . Zalecana metodyka została umieszczona w odpowiednim Rozporządzeniu Ministra Środowiska [10]:

$$h_e = h + \Delta h \quad (4)$$

gdzie:

h - geometryczna wysokość punktu emisji (liczona od poziomu gruntu) [m]

Δh - wyniesienie gazów odlotowych [m]

Obliczenie wyniesienia gazów odlotowych jest nietrywialne i wymaga uwzględnienia emisji ciepła Q , wyrażającego się następującym wzorem [10]:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{273,15}{T} \cdot 1,3 \cdot v_g \cdot (T - T_0) \quad (5)$$

gdzie:

Q - emisja ciepła [kW]

d - średnica wewnętrzna wylotu emitora [m]

v_g - prędkość gazów odlotowych na wylocie emitora [m/s]

T - temperatura gazów odlotowych na wylocie emitora [K]

T_0 - średnia roczna temperatura powietrza [K]

Parametry występujące w powyższych wzorach są wspomnianymi już parametrami emisji, których wpływ na rozkład dawek nie jest trywialny. Wynika to z faktu, iż w zależności od obliczonej wartości emisji ciepła Q oraz prędkości wiatru, wyniesienie gazów odlotowych oblicza się następnie według różnych formuł [10]. Oznacza to, iż różne kombinacje parametrów emisji mogą prowadzić do takiego samego wyniku i wpływ wybranego parametru na rozkład dawek będzie inny, w zależności od aktualnej wartości pozostałych parametrów i warunków atmosferycznych (mogą bowiem tak wpłynąć na wartość Q , że wyniesienie gazów będzie obliczane inną formułą). Powoduje to znaczne trudności w przeprowadzeniu pesymizacji, a jedynym ograniczeniem wartości tych parametrów jest tak naprawdę odniesienie do rzeczywistości (średnica wewnętrzna wylotu emitora, prędkość gazów odlotowych i temperatura gazów nie mogą mieć wartości dowolnej, możemy jedynie określić realistyczny przedział ich wartości). Spółób obliczenia wyniesienia gazów odlotowych znajduje się w tym samym rozporządzeniu [10].

Wyniesienie gazów odlotowych Δh oblicza się na podstawie następujących formuł:

1) formuły Hollanda, gdy $0 \leq Q \leq 16000 \text{ kW}$, przy czym wyróżnia się następujące przypadki tej formuły:

a) gdy $v_g \leq 0,5u_h$

$$\Delta h = \Delta h_H = 0 \quad (6)$$

b) gdy $v_g \geq u_h$

$$\Delta h = \Delta h_H = \frac{1,5 \cdot v_g \cdot d + 0,00974 \cdot Q}{u_h} \quad (7)$$

c) gdy $0,5u_h < v_g < u_h$

$$\Delta h = \Delta h_H = \frac{1,5 \cdot v_g \cdot d + 0,00974 \cdot Q}{u_h} \cdot \frac{v_g - 0,5u_h}{0,5u_h} \quad (8)$$

2) formuły CONCAWE, gdy $Q \geq 24000 \text{ kW}$:

$$\Delta h = \Delta h_C = \frac{1,126 \cdot Q^{0,58}}{u_h^{0,7}} \quad (9)$$

3) kombinacji formuły Hollanda i CONCAWE, gdy $16000 < Q < 24000 \text{ kW}$:

$$\Delta h = \Delta h_H \cdot \frac{24000 - Q}{8000} + \Delta h_C \cdot \frac{Q - 16000}{8000} \quad (10)$$

W zastosowanych wzorach symbole oznaczają:

Δh_H - wyniesienie gazów odlotowych obliczone według formuły Hollanda

Δh_C - wyniesienie gazów odlotowych obliczone według formuły CONCAWE

u_h - prędkość wiatru na wysokości wylotu emitora

Prędkość wiatru na wysokości wylotu emitora:

a) gdy $h \leq 300 \text{ m}$

$$u_h = u_a \cdot \left(\frac{h}{14}\right)^m \quad (11)$$

b) gdy $h > 300 \text{ m}$

$$u_h = u_a \cdot \left(\frac{300}{14}\right)^m \quad (12)$$

W powyższych wzorach parametr u_a jest prędkością wiatru na wysokości anemometru. Jest to wielkość, która znajduje się w dostępnych danych wejściowych i wymaga przeliczenia zgodnie z powyższymi zależnościami na prędkość wiatru na wysokości emitora (do obliczenia wyniesienia gazów odlotowych), a także przeliczenia na średnią prędkość gazów odlotowych v , na wysokości efektywnej h_e , czyli na wielkość, która znajduje się w równaniu Sagendorfa na współczynnik rozrzedzenia atmosferycznego. Zgodnie z rozporządzeniem [10]:

a) gdy $h = h_e$

$$v = u_h = u_a \cdot \left(\frac{h}{14}\right)^m \quad (13)$$

b) gdy $h_e \leq 300 \text{ m}$ i $h \neq h_e$

$$v = \frac{u_a}{(h_e - h) \cdot (1 + m) \cdot 14^m} \cdot [h_e^{1+m} - h^{1+m}] \quad (14)$$

c) gdy $h < 300 \text{ m}$ i $h_e > 300 \text{ m}$

$$v = \frac{u_a}{(h_e - h) \cdot 14^m} \cdot \left[\frac{300^{1+m} - h^{1+m}}{1 + m} + (h_e - 300) \cdot 300^m \right] \quad (15)$$

d) gdy $h \geq 300 \text{ m}$

$$v = u_h = u_a \cdot \left(\frac{300}{14}\right)^m \quad (16)$$

W rozporządzeniu znajduje się również formuła na obliczenie współczynnika pionowej dyfuzji atmosferycznej:

$$\sigma_z(x) = x^b \cdot 0,38 \cdot m^{1,3} \cdot [8,7 - \ln\left(\frac{h_e}{z_0}\right)] \quad (17)$$

gdzie:

m, b - współczynniki zależne od stanu równowagi atmosfery

z_0 - współczynnik aerodynamicznej szorstkości terenu

Jak widać obliczenia wymagają znajomości dodatkowych współczynników, które nie zostały jeszcze wyjaśnione. Współczynnik aerodynamicznej szorstkości terenu z_0 uwzględnia sposób oddziaływania danego typu podłoża z przesuwaną nad nim się warstwą powietrza. Powstające tarcie wywołuje ruchy turbulენტne – powietrze kontaktujące się z podłożem porusza się najwolniej, natomiast górne warstwy przesuwiają się szybciej. W wyniku tego zjawiska powstają zawirowania (niestabilność Kevina-Helmholtza) [11], stanowiące pole turbulენტne. Gdy skala tego zjawiska jest duża, gęstość zanieczyszczeń zmniejsza się szybciej. Im mniejszy będzie współczynnik szorstkości, tym mniejsze będzie tarcie między podłożem, a warstwą powietrza i tym mniejsze będzie rozpraszanie smugi zanieczyszczeń. Odpowiada to więc najbardziej pesymistycznym warunkom. Przykładowe wartości współczynnika z_0 prezentuje Tabela 1.

Zgodnie z faktycznym stanem (charakterystyka obszarów nadmorskich), założono pokrycie terenu typu lasy ($z_0 = 2,0$). Drugim typem parametrów uwzględnianych w obliczeniach współczynnika σ_z są współczynniki m i b zależne od tzw. stanów równowagi atmosfery. Aby zrozumieć zagadnienie równowagi atmosfery należy znać podstawową relację między powietrzem ciepłym, a zimnym. Ciepłe powietrze ma mniejszą gęstość, przez co w otoczeniu powietrza zimnego unosi

się. I odwrotnie – gęstsze, zimne powietrze będzie opadać w otoczeniu powietrza ciepłego. Wraz ze zwiększaniem wysokości, powietrze ulega zwykle ochłodzeniu, a szybkość z jaką dana objętość powietrza ogrzanego od podłoża ulegnie ochłodzeniu zależy od jego wilgotności. Powietrze suche, czyli nienasycone, ochładza się o ok. 1°C na 100 m wzniesienia – określa się to mianem sucho adiabatycznego gradientu termicznego. Powietrze wilgotne natomiast (nasycone), ochładza się wolniej – o 0,5°C na 100 m wzniesienia. Ten gradient termiczny został nazwany wilgotno adiabatycznym.

Tabela 1. Wartości współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu [10]
Table 1. Values of the aerodynamic coefficient of terrain roughness [10]

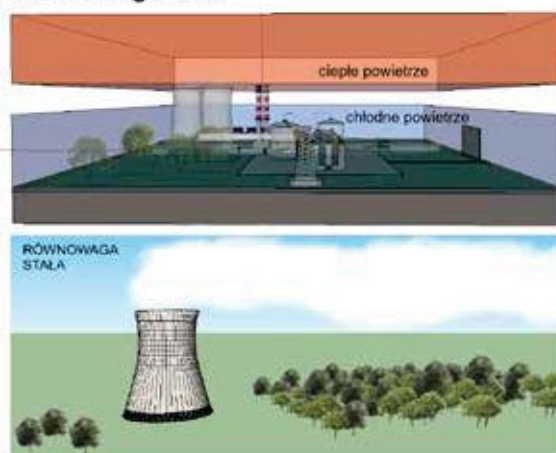
Typ pokrycia terenu	Współczynnik z_0
woda	0,0008
łąki/pastwiska	0,02
poła uprawne	0,035
sady/zarośla/zagajniki	0,4
las	2,0
zwarta zabudowa wiejska	0,5
miasto do 10 tys. mieszkańców	1,0
miasto od 10 do 100 tys. mieszkańców	
- zabudowa niska	0,5
- zabudowa średnia	2,0
miasto od 100 do 500 tys. mieszkańców	
- zabudowa niska	0,5
- zabudowa średnia	2,0
- zabudowa wysoka	3,0
miasto powyżej 500 tys. mieszkańców	
- zabudowa niska	0,5
- zabudowa średnia	2,0
- zabudowa wysoka	3,0

W celu określenia konkretnego stanu równowagi atmosfery trzeba znać aktualny pionowy gradient termiczny, który określa jak szybko ochładza się warstwa powietrza w istniejących warunkach. Wyróżnia się trzy główne typy stanów równowagi [11]:

- stan równowagi stałej (atmosfera stabilna) – występuje, gdy aktualny gradient termiczny jest mniejszy od wilgotno adiabatycznego. W takich warunkach każda warstwa powietrza stanie się zimniejsza od otoczenia i zacznie opadać.
- stan równowagi chwiejnej (atmosfera niestabilna) – występuje, gdy aktualny gradient termiczny jest większy od sucho adiabatycznego. W takich warunkach każda warstwa powietrza stanie się cieplejsza od otoczenia i zacznie się unosić.
- stan równowagi względnej (obojętnej) – występuje, gdy aktualny gradient termiczny znajduje się między sucho adiabatycznym, a wilgotno adiabatycznym. Jest to najczęściej występujący stan atmosfery.

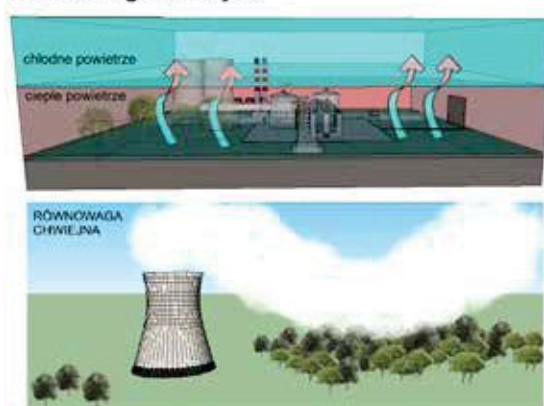
Ponieważ wśród dostępnych danych nie znajdowały się roczne, godzinowe statystyki stanów równowagi atmosferycznej, należało przeprowadzić kolejną pesymizację. Rys. 2 i rys. 3 prezentują wizualizację dwóch skrajnych warunków atmosferycznych.

Równowaga stała



Rys. 2. Wizualizacja warunków równowagi stałej
Fig. 2. Visualization of stable atmospheric stability class

Równowaga chwiejna



Rys. 3. Wizualizacja warunków równowagi chwiejnej
Fig. 3. Visualization of unstable atmospheric stability class

W warunkach równowagi chwiejnej (niestabilnej) występuje pionowe mieszanie warstw powietrza, które powoduje zmniejszanie gęstości zanieczyszczeń (rozpraszanie smugi) i co za tym idzie zmniejszanie dawek skutecznych na większych odległościach (skrócenie promienia OOU). Zjawisko to nie zachodzi w warunkach stabilnych – skondensowana, nierozproszona smuga wynosi wysokie aktywności na dalekie odległości. Odpowiada więc ona najbardziej pesymistycznym warunkom, które zostały przyjęte do dalszych obliczeń. Metodyka prezentowana w Rozporządzeniu Ministra Środowiska uwzględnia bardziej precyzyjną charakterystykę, wyróżniając 36 różnych sytuacji meteorologicznych wynikających z 6 stanów równowagi, którym odpowiadają zakresy prędkości wiatru na wysokości 14 m (zob. Tabela 2). Odnosząc się do poniższego podziału, przyjęto jednolite warunki równowagi stałej (nr 6), niezależnie od prędkości wiatru (pesymizacja).

Tabela 2. Sytuacje meteorologiczne wyróżnione w Rozporządzeniu Ministra Środowiska [10]**Table 2.** Meteorological situations distinguished in the Regulation of the Minister of the Environment [10]

stan równowagi atmosfery	1	2	3	4	5	6
rodzaj równowagi	silnie chwiejna	chwiejna	lekko chwiejna	obojętna	lekko stała	stała
zakres prędkości wiatru [m/s]	1-3	1-5	1-8	1-11	1-5	1-4

Każdej z kategorii przypisane zostały parametry, które uwzględnia się w analizach rozprzestrzeniania substancji w powietrzu (w tym parametry m i b w równaniu 17) - zob. Tabela 3.

Tabela 3. Stałe zależne od stanów równowagi atmosfery [10]**Table 3.** Constants dependent on atmospheric stability class [10]

Stała	Stan równowagi atmosfery					
	1	2	3	4	5	6
m	0,080	0,143	0,196	0,270	0,363	0,440
a	0,888	0,865	0,845	0,818	0,784	0,756
b	1,284	1,108	0,978	0,822	0,660	0,551
g	1,692	1,781	1,864	1,995	2,188	2,372
C_1	0,213	0,218	0,224	0,234	0,251	0,271
C_2	0,815	0,771	0,727	0,657	0,553	0,457

Potwierdzenie przyjętego założenia odnośnie stanu równowagi atmosfery odnaleźć można w rozprawie doktorskiej K.J. Michalczyka [11], w której zapisano, iż:

„Im bardziej niestabilna jest atmosfera, tym większe występują w niej ruchy turbulentne. Jeśli inne czynniki pozostają na niezmiennym poziomie, to smuga zanieczyszczeń jest krótsza w przypadku atmosfery niestabilnej, ponieważ zanieczyszczenie gwałtowniej miesza się z powietrzem. Z tego względu klasa stabilności F (lub 6) odzwierciedla najbardziej niekorzystne warunki dla rozprzestrzeniania zanieczyszczeń.”

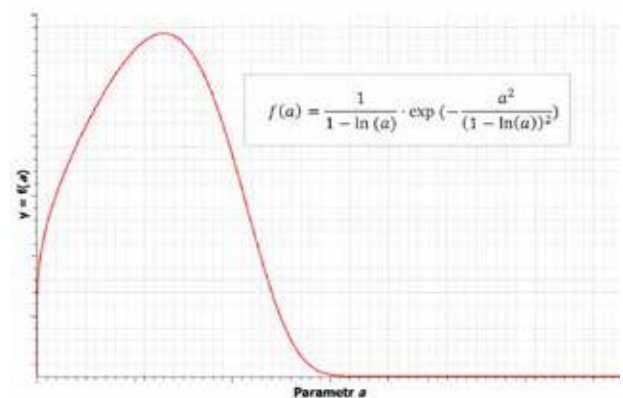
W tym miejscu warto zastanowić się, w jaki sposób każdy z parametrów powinien (zgodnie z teorią) wpływać na długość smugi wychodzącej z komina. Tabela 4 prezentuje podsumowanie rozważań nad tą kwestią.

Tabela 4. Wpływ wybranych parametrów na długość smugi w zastosowanym modelu [11]**Table 4.** Influence of selected parameters on the streak length in the used model [11]

Rosnący parametr	Efekt wzrostu	Wpływ na długość smugi
WARUNKI METEOROLOGICZNE I TERENOWE		
Prędkość wiatru	Szybsze mieszanie z powietrzem	Skrócenie smugi
Stan równowagi atmosfery	Wolniejsze mieszanie z powietrzem	Wydłużenie smugi
Współczynnik szorstkości terenu	Szybsze mieszanie z powietrzem	Skrócenie smugi
PARAMETRY EMISJI		
Prędkość gazów odlotowych	Większy obłok	Wydłużenie smugi
Temperatura gazów odlotowych	Szybsza emisja/Większy obłok	Wydłużenie smugi
Średnica emitora	Większy obłok	Wydłużenie smugi

Należy pamiętać, iż na sam promień OOU (zakładając jego kolisty kształt) wpływ ma nie tylko długość smugi wychodzącej z komina, ale również zjawisko rozpraszania zanieczyszczeń. Większa temperatura zanieczyszczeń (a właściwie różnica między nią, a tempe-

raturą otoczenia) wiąże się wprawdzie z dłuższą smugą, jednak na drodze poniżej punktu emisji nastąpi szybkie rozprężanie gazów, a tym samym obniżenie gęstości powietrza. Wpływ tego parametru na wielkość OOU nie jest więc jednoznaczny. Charakter wpływu niektórych współczynników na otrzymany wynik wiąże się oczywiście z zastosowanym modelem. Jak już wcześniej stwierdzono, zawiłość formuł obliczeniowych utrudnia proste określenie, jaki stały wpływ będą miały dane parametry na otrzymany wynik końcowy. Najbardziej niejednoznaczny wpływ na rozkład dawek wokół elektrowni jądrowej ma geometryczna wysokość emitora. W większości przypadków można założyć emisję z komina wentylacyjnego, którego wysokość zawarta jest zwykle w specyfikacjach technicznych danych technologii. W przypadku niektórych awarii emisja może jednak nastąpić z punktu położonego niżej. Według RG 1.111 [9], w odległości kilkunastu kilometrów od elektrowni jądrowej średnie roczne stężenia substancji promieniotwórczych są niezależne od sposobu emisji, natomiast w bliższych odległościach zależą one znacznie od tych warunków. Emisje z wysokich kominów powodują natomiast maksymalne stężenie substancji radioaktywnych na poziomie gruntu w odległości od 1 do 3 km od punktu emisji, zaś emisje z niższych punktów (blisko gruntu) powodują zwykle malejące koncentracje radionuklidów w miarę oddalania się od elektrowni jądrowej. Nietrywialnym jest stwierdzenie, jak wysokość emitora wpływa na wysokość dawek skutecznych otrzymywanych w ciągu roku w różnych odległościach od punktu emisji. Analizując formułę Sagendorfa, a także sposób obliczania poszczególnych parametrów wykorzystywanych w tym równaniu, można ustalić zależność współczynnika rozrzedzenia atmosferycznego (proporcjonalnego do dawek skutecznych) od efektywnej wysokości punktu emisji, a tym samym geometrycznej wysokości punktu emisji. Pozwala to na określenie charakteru wpływu tego parametru na dawki i ustalenie, czy istnieje stały, zauważalny trend. Otrzymaną zależność prezentuje rys. 4.



Rys. 4. Wykres ogólnej zależności $f(a)$, analogicznej do tej, jaka występuje między współczynnikiem rozrzedzenia atmosferycznego, a efektywną wysokością emitora (odpowiada mu parametr a). W równaniu Sagendorfa formuła ta jest modyfikowana przez stałe, jednak dla wizualizacji matematycznego charakteru zmian uogólnienie to jest wystarczające

Fig. 4. Plot of the general dependence $f(a)$ analogous to that which occurs between the atmospheric dispersion coefficient and the effective emitter height (corresponds to parameter a). In the Sagendorf formula, this equation is modified by constants, but for the visualization of the mathematical character of changes, this generalization is sufficient

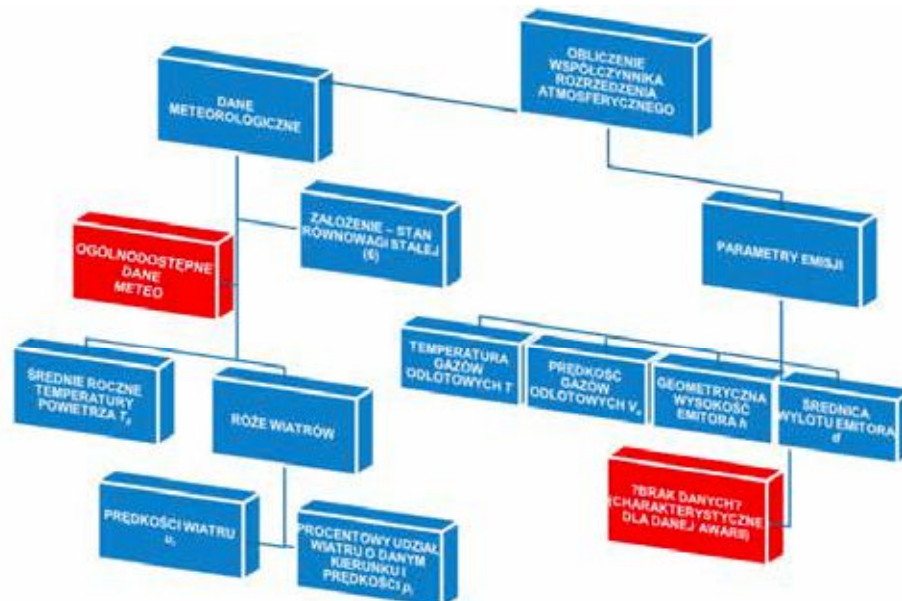
Jak prezentuje rys. 4, istnieje pewna wysokość punktu emisji, przy której można się spodziewać maksymalnej dawki skutecznej. Zależność ta posiada jedno maksimum, więc zarówno wyższe, jak i niższe wysokości emisji będą generowały mniejszą dawkę. Wpływ na promień OOU może być natomiast trochę bardziej skomplikowany. Punkt emisji położony wyżej będzie wprawdzie odpowiadać mniejszej dawce skutecznej, spowoduje natomiast wyniesienie gazów

odlotowych na większe odległości od elektrowni jądrowej, co w niektórych warunkach może rozszerzyć granice OOU. Końcowy wynik jest więc kombinacją wielu skomplikowanych zależności, które powodują, iż określenie trendu jest niezwykle utrudnione.

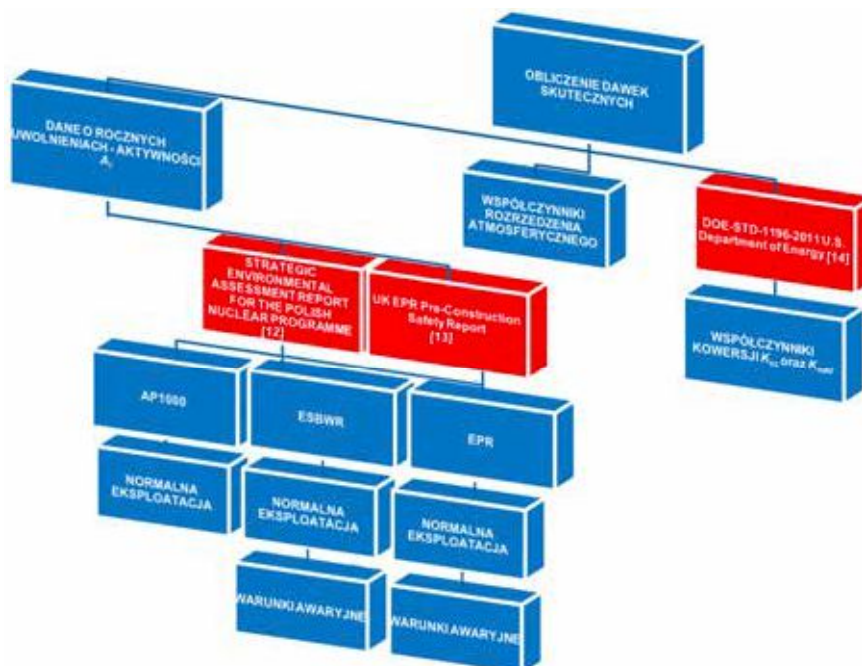
W celu wykonania analiz zgodnie z przedstawioną metodyką, stworzono program w języku C++ wykorzystujący dostępne dane wejściowe.

1.5. DANE WEJŚCIOWE

Podsumowanie wszystkich użytych danych wejściowych wraz z ich źródłami oraz zależnościami prezentują rys. 5a i rys. 5b. Kolorem czerwonym zostały zaznaczone źródła, z których pochodzą poszczególne dane.



a) Schemat danych wykorzystanych do obliczeń współczynników rozrzedzenia atmosferycznego zgodnie z formułą Sagendorfa
a) Data scheme used to calculate atmospheric dispersion coefficient using the Sagendorf formula



b) Schemat danych wykorzystanych do obliczeń rocznych dawek skutecznych
b) Data scheme used to calculate annual effective doses

Rys. 5. Schemat użytych danych wejściowych
Fig. 5. Scheme of the used input data

- Dane wejściowe podzielono na cztery grupy:
- dane meteorologiczne – stany równowagi atmosfery, średnie roczne temperatury powietrza, prędkości wiatru oraz ich procentowy udział w bilansie rocznym,
 - parametry emisji – temperatura gazów odlotowych, prędkość gazów odlotowych, geometryczna wysokość emitora oraz średnica wylotu emitora,
 - roczne aktywności radioizotopów uwalniane z elektrowni w czasie normalnej eksploatacji (i przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych) oraz stanów awaryjnych,
 - współczynniki konwersji dawek skutecznych od napromieniowania bezpośredniego oraz poprzez inhalację.

Pierwsza grupa parametrów została zaczerpnięta z ogólnodostępnych danych meteorologicznych dla lokalizacji Lubiatowo, poza stanem równowagi atmosfery, który przyjęto jako 6 (równowaga stała) niezależnie od innych warunków pogodowych. Średnia roczna temperatura powietrza została uśredniona z trzech lat (2011, 2012 i 2013) i wyniosła 8,47°C. Dane przedstawiały natomiast średnie miesięczne. Dla lokalizacji Żarnowiec przyjęto takie same warunki atmosferyczne, co – biorąc pod uwagę jedynie ok. 14 km dystansu między miejscowościami – jest zasadne. Prędkości wiatru oraz ich procentowy roczny udział dla 16 sektorów kierunkowych (każdy po 22,5°C) zostały odczytane dla lat 2011, 2012 i 2013 dla stacji pomiarowej Gdańsk-Rębiechowo. Wyniki otrzymane z trzech lat zostały uśrednione.

W przypadku parametrów emisji nie dysponowano danymi charakterystycznymi dla różnych stanów eksploatacyjnych i awaryjnych elektrowni. Parametry te były zmiennymi, których wpływ na OOU badano. Brak tych danych uniemożliwił określenie konkretnej wartości promienia OOU dla polskiej elektrowni jądrowej.

Roczne aktywności radioizotopów uwalniane z elektrowni są określone dla danej technologii oraz warunków (eksploatacyjnych lub awaryjnych). Jako źródło danych posłużyły środowiskowy raport strategiczny stworzony przez prof. Andrzeja Strupczewskiego i Władysława Kielbasę [12] oraz raport bezpieczeństwa reaktora EPR [13]. W analizach uwzględniono trzy potencjalne, rozpatrywane na potrzeby polskiego programu jądrowego, technologie: AP1000 (Westinghouse/Toshiba), EPR (AREVA NP) oraz ESBWR (GE-Hitachi). Wykorzystano wartości dotyczące uwolnień w warunkach eksploatacyjnych oraz awaryjnych dla reaktorów EPR o mocy 1650 MWe, AP1000 o mocy 1100 MWe oraz ESBWR o mocy 1535 MWe. W przypadku technologii AP1000, z uwagi na brak udostępnionych danych, nie przeprowadzono symulacji w warunkach awaryjnych.

Łączna moc wszystkich bloków reaktorowych planowanej pierwszej polskiej elektrowni jądrowej ma wynieść ok. 3000 MWe. Oznacza to, że musiałyby po-

wstać dwa bloki dla przyjętej technologii EPR, dwa bloki dla technologii ESBWR albo trzy bloki dla technologii AP1000. W pracy tej założono, że awaria następuje tylko w jednym z bloków, a emisja ma charakter punktowy.

Współczynniki konwersji dawek są charakterystyczne dla danego izotopu i zostały zaczerpnięte z raportu przygotowanego dla Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych [14].

Dla reaktora typu ESBWR rozpatrzono cztery najpoważniejsze warunki awaryjne bez stopienia rdzenia:

- awaria 1000 prętów paliwowych i uwolnienie substancji promieniotwórczych z obiegu pierwotnego, która obejmuje następującą sekwencję:
 - uszkodzenie regulatora ciśnienia – zamknięcie zaworów kontrolnych oraz zaworów na bypasie turbiny,
 - zrzut obciążenia generatora połączony z awarią bypassu turbiny,
 - wyłączenie turbiny z całkowitą utratą obejścia turbiny (bypassu).
- awaria rozerwania/pęknięcia kolektora pary na zewnątrz obudowy bezpieczeństwa – nie powoduje ona degradacji paliwa. Jedyne aktywności znajdują się w chłodziwie oraz obiegu pary jeszcze przed awarią. Uwolnienia do atmosfery nie są przefiltrowane i następują bezpośrednio z budynku turbiny. Obliczenia zakładają, iż uwalniana jest całkowita aktywność zawarta w parze.
- awaria przy manipulacji wypalonym paliwem jądrowym.
- awaria systemu odpadów promieniotwórczych.

Dla reaktora typu EPR rozpatrzono trzy awarie bez stopienia rdzenia:

- awaria z dużym rozerwaniem obiegu pierwotnego - Large Break LOCA.
 - awaria rozerwania jednej rurki wytwornicy pary SGTR.
 - awaria przy manipulacji wypalonym paliwem jądrowym.
- Należy ponadto podkreślić, iż w przypadku przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy należałoby przestudiować dokładne założenia dotyczące charakterystyk uwolnień dla awarii bez stopienia rdzenia uwzględnionych w rozszerzonych warunkach projektowych. Istnieją tu bowiem pewne rozbieżności związane z różnymi definicjami i podejściami lokalnych regulatorów (w szczególności amerykańskiego, gdzie obowiązuje inne niż w Europie podejście do pojęcia *design extension conditions*).

WYNIKI

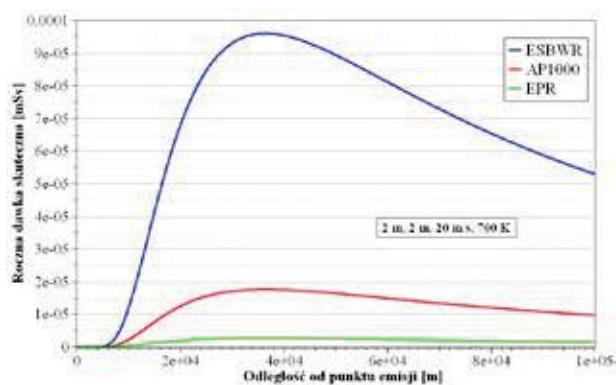
STANY EKSPLOATACYJNE

Wykonanie pierwszych obliczeń wymagało odgórnego przyjęcia wartości czterech parametrów, zaliczanych do „parametrów emisji”. Początkowo ustalono następujące ekstremalne wartości:

$h = 2 \text{ m}$ – wysokość geometryczna emitora,
 $d = 2 \text{ m}$ – średnica wylotu emitora,
 $v_g = 20 \text{ m/s}$ – prędkość gazów odlotowych,
 $T = 700 \text{ K}$ – temperatura gazów odlotowych.

W dalszych rozważaniach oraz na przedstawianych wykresach (rys. od 6 - 12), aktualnie ustalone warunki emisji opisywane są zestawem powyższych parametrów zgodnie z kolejnością: (h, d, v_g, T) .

Na wykresie z rys. 6 maksimum dawki występuje na odległości ok. 3,5 km od punktu emisji. Może dziwić fakt, iż pomimo tego, że emisja następuje na wysokości jedynie 2 metrów, maksimum dawki jest znacznie oddalone. Wpływ na to zjawisko mogą mieć pozostałe parametry oraz charakter zastosowanego modelu. Maksymalna roczna dawka skuteczna możliwa do otrzymania w takich warunkach wyniosła niecałe $0,1 \mu\text{Sv/rok}$, a więc wielokrotnie mniej, niż próg określony w Prawie atomowym.

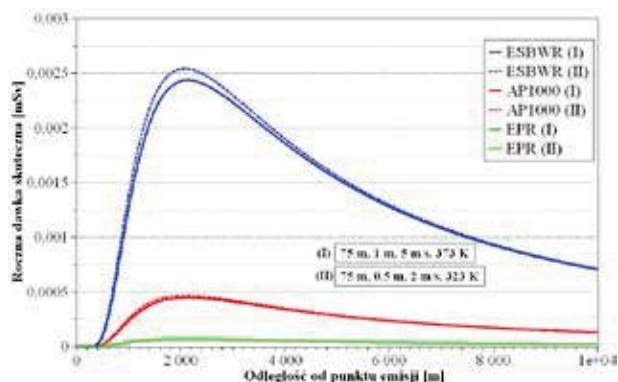


Rys. 6. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla stanów eksploatacyjnych trzech typów reaktorów dla zestawu parametrów (2,2,20,700)

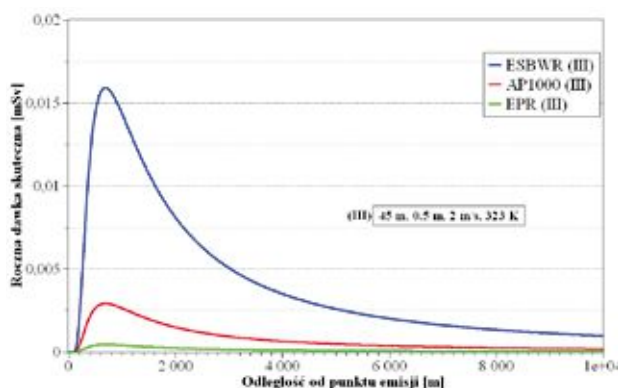
Fig. 6. Annual effective dose at different distances from the emission point under normal operating conditions and during predictable operating emergencies of three types of reactors for a set of parameters (2,2,20,700)

Rys. 7 prezentuje dwa wykresy, otrzymane przy kolejnych zmianach wybranych parametrów w celu zaobserwowania ich wpływu na rozkład dawek. Pokazuje on ciekawą zależność zmian rozkładu dawek od zmieniających się parametrów emisji. W przypadku wykresu (rys. 7a), przy ustalonej geometrycznej wysokości emitora zmniejszono jego średnicę, prędkość gazów wylotowych oraz temperaturę tych gazów (zestawy parametrów I i II). Jak widać, nieznacznie uległy zmianie maksymalna wysokość dawki (wzrost) oraz odpowiadająca jej odległość od punktu emisji (spadek). Jest to zgodne z poprzednimi rozważaniami. Można bowiem zakładać, że zmniejszenie prędkości gazów, średnicy wylotu oraz temperatury będzie zmniejszało dawki skuteczne na dużych odległościach (mniejszy obłok zanieczyszczeń i krótsza smuga), z drugiej strony spadek ostatniego z parametrów może również wpływać na zwiększanie dawki maksymalnej (mniejsze rozprężanie i rozpraszanie smugi). W przypadku wykresu widocznego na rys. 7b, jedynym zmienionym parametrem (względem zestawu parametrów II) jest geo-

metryczna wysokość emitora. Zmniejszenie jego wartości spowodowało zarówno wzrost maksymalnej dawki skutecznej, jak i przesunięcie maksimum w kierunku mniejszych odległości, co dowodzi złożoności problemu. Zauważyć można, iż tego typu zmiana w niektórych warunkach mogłaby wpłynąć na zmniejszenie OOU, w innych natomiast mogłaby spowodować przekroczenie progu dawki $0,3 \text{ mSv/rok}$ [4] i wymusić ustalenie OOU. Jak stwierdzono otrzymany wynik, jest uwarunkowany dwoma parametrami opisującymi rozpraszanie chmury radioaktywnej: długością smugi zanieczyszczeń oraz jej rozproszeniem (gęstością). W niektórych przypadkach można otrzymać długą, ale rozproszoną smugę, w innych natomiast krótką i skondensowaną. Tego typu zjawiska widoczne są na przedstawionych wykresach. Kolejną wartą zauważenia zależnością jest skala, z jaką zmienia się maksymalna dawka skuteczna wraz ze zmieniającą się wysokością emitora. W porównaniu do innych parametrów ma ona zdecydowanie największy wpływ na kształt krzywych rozkładu dawki.



(a)



(b)

Rys. 7. Wykresy rocznej dawki skutecznej na różnych odległościach od punktu emisji dla stanów eksploatacyjnych trzech typów reaktorów dla trzech różnych zestawów parametrów: I (75, 1, 5, 373), II (75, 0,5, 2, 323) oraz III (45, 0,5, 2, 323). Wysokość 75 m odpowiada wysokości budynku elektrowni, czyli w przybliżeniu emisji przez komin wentylacyjny

Fig. 7. Plots of the annual effective dose at different distances from the emission point under normal operating conditions and during predictable operating emergencies of three types of reactors for three different sets of parameters: I (75, 1, 5, 373), II (75, 0.5, 2, 323) and III (45, 0.5, 2, 323). The height of 75 m corresponds to the height of the power plant building, i.e. approximately the emission through the ventilation chimney

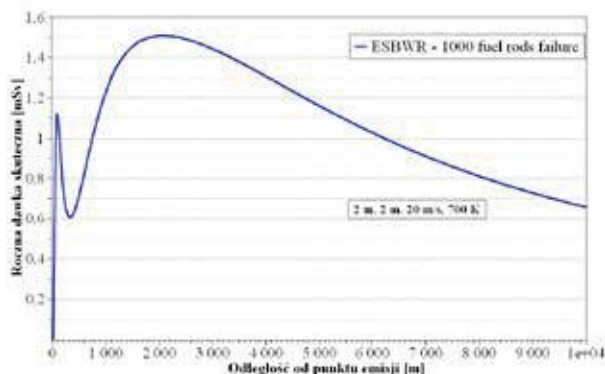
We wszystkich rozpatrywanych przypadkach w stanach eksploatacyjnych, roczne dawki skuteczne były wielokrotnie mniejsze niż próg 0,3 mSv/rok określony w Prawie atomowym. Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki, nie istniałyby więc w ogóle konieczność wyznaczania OOU wokół elektrowni jądrowej. Uwolnienia w trakcie normalnej eksploatacji oraz przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych nie miałyby więc wpływu na OOU. Nie ma jednak pewności, że nie istnieje pewna kombinacja parametrów emisji, przy których dawka przekroczyłaby próg 0,3 mSv/rok, jednak problem ten leży poza zakresem omówionego modelu uproszczonego.

WARUNKI AWARYJNE BEZ STOPIENIA RDZENIA

Podobnie jak w przypadku stanów eksploatacyjnych, pierwsze obliczenia wymagały ustalenia parametrów emisji:

- $h = 2 \text{ m}$ – wysokość geometryczna emitora,
- $d = 2 \text{ m}$ – średnica wylotu emitora,
- $v_g = 20 \text{ m/s}$ – prędkość gazów odlotowych,
- $T = 700 \text{ K}$ – temperatura gazów odlotowych.

Wyniki symulacji z użyciem powyższego zestawu zmiennych prezentuje rys. 8.



Rys. 8. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla najpoważniejszej rozpatrywanej awarii bez stopienia rdzenia reaktora ESBWR dla zestawu parametrów (2,2,20,700). Ponieważ obliczone roczne dawki skuteczne odpowiadające pozostałym awariom reaktora ESBWR oraz wszystkim awariom EPR są rzędy wielkości mniejsze, prezentujące ich rozkład krzywe były niewidoczne na powyższym rysunku. Umieszczono je natomiast na rys. 11, dla innego zestawu parametrów

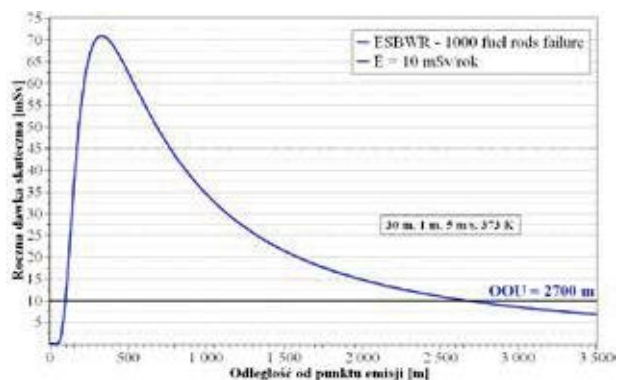
Fig. 8. The annual effective dose at different distances from the emission point for the most severe emergency during which the reactor core remains safe of ESBWR technology, for the parameter set (2,2,20,700). Since the calculated annual effective doses corresponding to the remaining ESBWR reactor emergencies and all EPR emergencies are orders of magnitude smaller, the curves presenting their distribution were invisible in the figure above. Instead, they were placed in Figure 11 for a different set of parameters

Jak widać, w ustalonych warunkach maksymalna roczna dawka skuteczna wynosi ok. 1,5 mSv/rok,

a więc wielokrotnie mniej niż próg określony w Prawie atomowym dla awarii bez stopienia rdzenia (10 mSv/rok) [4]. W takich warunkach określanie OOU nie byłoby konieczne. Ze wszystkich analizowanych awarii najpoważniejszą okazała się awaria reaktora ESBWR — zniszczenie 1000 prętów paliwowych z uwolnieniami z obiegu pierwotnego. Należy też pamiętać, iż dla każdej z awarii wysokość emisji może być inna i otrzymane różnice między wyznaczonymi w każdym przypadku dawkami w rzeczywistości mogą wyglądać inaczej. Co ciekawe, w tak ustalonych warunkach emisji, krzywa rozkładu dawek ma dwa maksima lokalne (rys. 8). Jest to możliwe zarówno z matematycznego punktu widzenia, jak i z punktu widzenia podstaw użytego modelu. Funkcja zależności rozrzedzenia atmosferycznego od odległości x to suma członów eksponencjalnych, dzielonych przez x (podniesiony do pewnej potęgi mniejszej od 1). Każdy człon sumacyjny jest modyfikowany przez inne stałe, wynikające z aktualnych wartości parametrów emisji oraz zmieniających się w trakcie sumowania parametrów meteorologicznych. Pochodna po takiej funkcji może mieć oczywiście kilka miejsc zerowych, co oznacza kilka możliwych ekstremów lokalnych. Z punktu widzenia użytego modelu, taka sytuacja również jest możliwa. Z założeń modelu chmury Gaussa wynika, że dla małych wysokości punktu emisji wychodząca smuga zanieczyszczeń może odbijać się od gruntu w pewnym punkcie, który staje się źródłem nowej smugi wtórnej (punkt ten odpowiada pierwszemu maksimum lokalnemu). Następnie powstała smuga wtórna łączy się ze smugą pierwotną, tworząc chmurę poruszającą się podobnie do tej, jaka tworzona jest w przypadku emisji z wyżej położonych punktów. Podobnie jak w innych przypadkach, istnieje więc również drugie maksimum odpowiadające nowej, połączony smudze zanieczyszczeń.

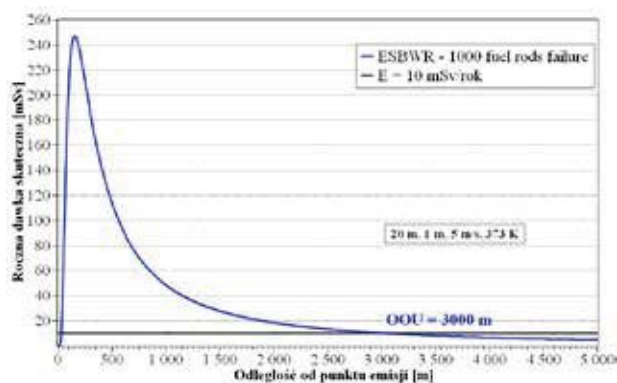
Na rys. 9 widnieje wykres wykonany dla bardziej realistycznych parametrów emisji. Jak widać taka ich kombinacja powoduje przekroczenie progu 10 mSv/rok. Promień OOU wyniósłby dla reaktora ESBWR ok. 2700 m.

Rys. 10 przedstawia natomiast rozkład dawek w przypadku niższego o 10 m emitora, przy niezmiennych pozostałych parametrach. Pokazuje on, iż niewielkie obniżenie wysokości geometrycznej emitora powoduje zwiększenie promienia OOU. Maksimum jest przesunięte w stronę mniejszych odległości od elektrowni, natomiast maksymalna roczna dawka skuteczna wzrosła. Promień OOU dla reaktora ESBWR wyniósłby wówczas ok. 3 km.



Rys. 9. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla najpoważniejszej rozpatrywanej awarii bez stopienia rdzenia (ESBWR) dla zestawu parametrów (30, 1, 5, 373). Na wykresie naniesiono prostą odpowiadającą progowi 10 mSv/rok, określone w Prawie atomowym

Fig. 9. Annual effective dose at different distances from the emission point for the most severe emergency during which the reactor core remains safe among considered, for a set of parameters (30, 1, 5, 373). A line corresponding to the threshold of 10 mSv/year, as defined in the Atomic Law, was plotted on the graph



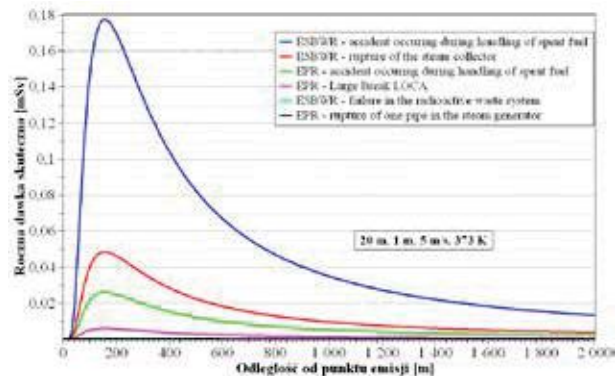
Rys. 10. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla najpoważniejszej rozpatrywanej awarii bez stopienia rdzenia (ESBWR) dla zestawu parametrów (20, 1, 5, 373)

Fig. 10. Annual effective dose at different distances from the emission point for the most severe emergency during which the reactor core remains safe among considered, for a set of parameters (30, 1, 5, 373). A line corresponding to the threshold of 10 mSv/year, as defined in the Atomic Law, was plotted on the graph

Jak widać na rys. 11, z pozostałych zdarzeń największe dawki generuje awaria przy manipulacji wypalonym paliwem jądrowym w reaktorze ESBWR, która stanowi także najpoważniejszą z analizowanych awarię bez stopienia rdzenia w reaktorze EPR. Porównując ten wykres z rys. 10 (identyczne parametry emisji) można stwierdzić, że w przypadku tych stanów awaryjnych roczne dawki są ponad trzy rzędy wielkości mniejsze niż w przypadku pęknięcia 1000 koszulek paliwowych w reaktorze ESBWR. Ponieważ zmiana parametrów emisji nie ma aż tak dużego wpływu na dawki, skłania to ku wnioskowi, iż reaktory typu EPR emitują relatywnie mniej substancji promieniotwórczych w przypadku awarii bez stopienia rdzenia (nie biorąc pod uwagę sytuacji awaryjnych ze stopieniem rdzenia). W ich przypadku nawet najpoważniejsza

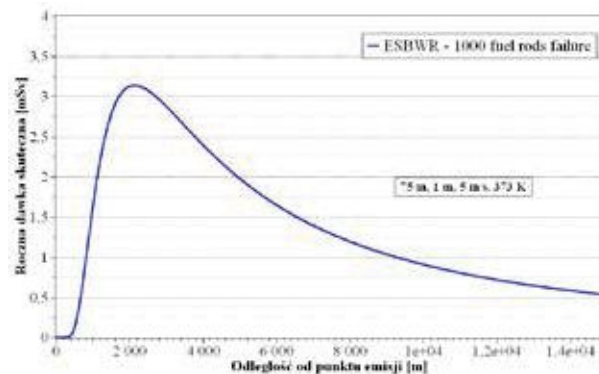
awaria bez stopienia rdzenia (rozpatrywana w ramach niniejszej uproszczonej analizy) w tych warunkach nie wymagałaby bowiem ustalania OOU.

Na rys. 12 pokazano, jak wyglądałby rozkład dawek skutecznych w tych samych warunkach, przy wysokości emitora wynoszącej 75 m, czyli równej wysokości budynku elektrowni. Odpowiada to sytuacji, w której wszystkie zanieczyszczenia wydobywają się przez komin wentylacyjny. Zwiększenie wysokości punktu emisji w ustalonych warunkach, zgodnie z intuicją, spowodowało przesunięcie krzywych rozkładu dawek w stronę większych odległości od punktu emisji, jednocześnie zmniejszając maksymalną dawkę skuteczną do ok. 3,2 mSv/rok dla najpoważniejszej rozpatrywanej awarii dla ESBWR. W takich warunkach OOU nie musiałby być tworzony, gdyż w żadnym punkcie wokół elektrowni roczna dawka skuteczna nie przekroczyłaby 10 mSv/rok. Wszystkie powyższe rozważania potwierdzają przypuszczenia, iż zdecydowanie największy wpływ na istnienie i wielkość OOU ma geometryczna wysokość emitora.



Rys. 11. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla trzech awarii bez stopienia rdzenia reaktora ESBWR oraz trzech awarii bez stopienia rdzenia reaktora EPR dla zestawu parametrów (20, 1, 5, 373)

Fig. 11. Annual effective dose at different distances from the emission point for three emergencies during which the reactor core remains safe of the ESBWR reactor and three emergencies of the EPR reactor for the parameter set (20, 1, 5, 373)



Rys. 12. Roczna dawka skuteczna na różnych odległościach od punktu emisji dla najpoważniejszej rozpatrywanej awarii bez stopienia rdzenia dla zestawu parametrów (75, 1, 5, 373)

Fig. 12. Annual effective dose at different distances from the emission point for the most severe emergencies during which the reactor core remains safe among considered, for a set of parameters (75, 1, 37, 37)

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza nie doprowadziła do wyznaczenia konkretnej wartości promienia OOU, pokazała natomiast ogromną czułość zastosowanego modelu na wartości parametrów w nim występujących. Liczność formuł obliczeniowych stosowanych w różnych warunkach oraz liczba zależności między parametrami powodują, że aktualna wartość wybranych parametrów wpływa na charakter zależności końcowego wyniku od pozostałych parametrów. Jak pokazały wyniki obliczeń, wpływ średnicy emitora, prędkości gazów odlotowych i temperatury tych gazów na końcowy wynik jest mały w porównaniu do wpływu geometrycznej wysokości emitora. Inaczej mówiąc, rozkład dawek promieniowania na obszarze wokół elektrowni jądrowej zależy głównie i najsilniej od wysokości punktu emisji substancji promieniotwórczych. Jak udowodniono, istnieje pewna wartość tej wysokości, przy której roczne dawki skuteczne promieniowania są maksymalne, a zarówno mniejsze, jak i większe wysokości powodują ich spadek. Analizując wpływ parametrów na promień OOU, należy jednak wziąć pod uwagę nie tylko wysokości dawek skutecznych, ale także ich rozkład na różnych odległościach od elektrowni. Długość smugi zanieczyszczeń połączona z mechanizmem jej rozpraszania wpływa na wynik końcowy. Zgodnie z teorią, wysokie punkty emisji powodują wyniesienie substancji promieniotwórczych na duże odległości, powstała smuga doznaje natomiast znacznego rozproszenia. Maksimum dawki jest wówczas przesunięte w stronę dużych odległości od punktu emisji, wartość dawki maksymalnej jest natomiast mała (można to zauważyć, porównując rys. 10 i 12). Przy zmniejszeniu wysokości emitora, dla pewnej wartości (widocznej na rys. 4 jako wartość argumentu a w punkcie wierzchołkowym), maksimum rocznej dawki skutecznej ulegnie przesunięciu w stronę mniejszej odległości od elektrowni, natomiast sama dawka osiągnie wartość maksymalną. Maksymalny promień OOU może odpowiadać natomiast pewnej wartości pośredniej – gdy w miarę obniżania wysokości emitora osiągnie się taką wartość, dla której roczna dawka skuteczna przekroczy próg 10 mSv/rok. Cała opisana procedura będzie oczywiście w pewnym stopniu uzależniona od aktualnej wartości pozostałych parametrów emisji.

Z rozpatrywanych technologii, w stanach eksploatacyjnych, największe dawki generuje ESBWR. Jak pokazano, roczna dawka skuteczna nie przekracza jednak progu 0,3 mSv/rok i OOU nie musiałby być w takich warunkach tworzony. W warunkach awaryjnych wynik końcowy silnie zależy od parametrów emisji. Można rzetelnie stwierdzić, iż — w jednolitych warunkach — najpoważniejsza z rozpatrywanych awaria bez stopienia rdzenia dla technologii ESBWR generuje ok. trzy rzędy wielkości większe roczne dawki skuteczne niż najpoważniejsza z rozpatrywanych awaria bez stopienia rdzenia dla technologii EPR. Ogólnie dla ESBWR promień OOU waha się od kilkuset metrów do kilku kilometrów, w zależności od przyjętych parametrów emisji. Bez konkretnych i szczegółowych danych nie można jednak rzetelnie stwierdzić, jaki powinien być promień OOU dla pierwszej polskiej elektrowni

jądrowej i należy podkreślić, że w związku z tym powyższa praca nie może stanowić podstawy do jego oficjalnego ustalenia.

Wojciech Bielewski,
Zakład Fizyki Jądrowej,
Wydział Fizyki,
Uniwersytet Warszawski,

Krzysztof Wojciech Fornalski,
Polskie Towarzystwo Nukleoniczne,
Warszawa

PODZIĘKOWANIA

Pragniemy wyrazić wdzięczność dla dr. inż. Sławomira Potempskiego (NCBJ) za cenne rady oraz pomoc, której udzielił nam podczas prac nad artykułem.

Dziękujemy również Panu dr. inż. Piotrowi Czerskiemu za wszelką okazaną pomoc i konsultacje dotyczące obszaru ograniczonego użytkowania.

LITERATURA:

- [1] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2008 r. Nr 25, poz. 150, z późn. zm.56)
- [2] B. Rakoczy, *Obszar ograniczonego użytkowania w prawie polskim*, wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych bo/Wielkopolski, Warszawa 2011
- [3] P. Czerski, „*Obszar ograniczonego użytkowania*” wokół elektrowni jądrowej, EKOATOM nr 10 wrzesień 2013
- [4] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2007 r. Nr 42, poz. 276)
- [5] L. Dobrzyński i in., *Spotkanie z promieniotwórczością*, IPJ w Świerku, maj 2005
- [6] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31.08.2012 r. (Dz.U.2012 poz.1048) w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego, (Rozporządzenie projektowe), § 30
- [7] J. F. Sagendorf, *A Program for Evaluating Atmospheric Dispersion From a Nuclear Power Station*, NOAA Tech Memo ERL-ARL-42, 1974
- [8] Regulatory Guide 1.145, *Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants*, NUREG/CR-2260
- [9] Regulatory Guide 1.111, *Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors*
- [10] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu
- [11] K. J. Michalczyk, *Transport gazowych zanieczyszczeń w powietrzu – symulacje numeryczne w skali lokalnej*, rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska
- [12] A. Strupczewski, W. Kiełbasa, *Strategic Environmental Assessment Report For The Polish Nuclear Programme*, Rozdział 3: *Analysis and Evaluation of the Impact of Radioactive Emissions from Nuclear Power Plants*
- [13] UK EPR Pre-Construction Safety Report, Chapter 14: Design Basis Analysis Sub-Chapter (14.6)
- [14] DOE Transportation Risk Assessment Working Group Technical Subcommittee, *A Resource Handbook on DOE Transportation Risk Assessment*, DOE/EM/NTP/HB-01, July 2002