

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr inż. Mateusza Włostowskiego
„Metodyka wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną
niepewności dla ciężkich awarii na podstawie probabilistycznych metod
propagacji niepewności parametrów wejściowych”**

Promotor rozprawy dr hab. inż. Rafał Laskowski, prof. uczelni.

1. Wprowadzenie

Recenzja została przygotowana w oparciu o decyzję Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 21 listopada 2023, pismo znak RND.IŚGiE.182.2023 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1669 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

2. Ogólna ocena rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

2.1 Zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Włostowskiego poświęcona jest problematyce bezpieczeństwa reaktora jądrowego i metodyce wykonywania analiz poświęconych tzw. ciężkim awariom.

Przewód doktorski był prowadzony w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Rozprawa została zawarta na 198 stronach tekstu. Pracę podzielono na dziewięć numerowanych rozdziałów w tym spis literatury obejmujący 105 pozycji, z czego zdecydowaną większość stanowią pozycje anglojęzyczne. Spora część cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat, co świadczy o dobrym rozpoznaniu przez Doktoranta dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy.

W wykazie doktorant umieścił sześć publikacji własnego autorstwa (współautorstwa), na które powołał się w pracy.

We **wstępie**, Autor umiejscawia tematykę pracy w kontekście problemów związanych z oceną bezpieczeństwa reaktora jądrowego jako procesem pozwalającym zweryfikować osiągnięcie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa, dzięki zastosowaniu odpowiednich środków proceduralnych i technicznych. Określa takie pojęcia jak analiza bezpieczeństwa, rodzaje analiz i sposoby ich wykonywania, w tym rodzaje obliczeń i stosowane w tym celu specjalistyczne kody. W niniejszym rozdziale przedstawiona została motywacja pracy, zdefiniowany został cel i zakres rozprawy oraz postawiona została teza pracy.

W rozdziale **drugim** opisano ogólne zagadnienia związane z analizami bezpieczeństwa dla ciężkich awarii reaktorów jądrowych, tj. zagadnienia związane ze znaczną degradacją rdzenia reaktora. Przedstawione są zasady wykonywania deterministycznych analiz takich awarii, w tym metody wykonywania deterministycznych analiz bezpieczeństwa. Opisane jest podejście tzw. zachowawcze oraz oparte na najlepszym szacowaniu. Wskazano obliczeniowy sposób szacowania oparty na analizie parametrycznej, gdzie wiele przypadków obliczeniowych opartych jest na zmianie parametrów wejściowych. Wymagane jest tutaj określenie, które parametry przyjmujemy za niepewne, określenie rozkładów prawdopodobieństwa oraz zakresu zmienności. Opisane są ogólnie procedury przyjęte w wybranych krajach. Rozdział zakończony jest rozważaniami na temat źródeł niepewności w deterministycznych analizach bezpieczeństwa.

Rozdział **trzeci** stanowi przegląd metod najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Autor dokonał wprowadzenia do zjawisk związanych z ciężką awarią i przedyskutował ograniczenia powszechnie stosowanych w tym celu kodów. Następnie opisane zostały probabilistyczne metody propagacji niepewności parametrów wejściowych, a wśród nich metody CSAU, GRS, ENUSA i GSUAM. Autor przedyskutował wymogi obliczeniowe poszczególnych metod oraz ich ograniczenia. W dalszej części rozdziału opisane są wspólne cechy deterministycznych i probabilistycznych metod propagacji niepewności parametrów wyjściowych, w tym metoda AEAT polegająca na uwzględnieniu deterministycznego charakteru większości analizowanych procesów. W końcowej części rozdziału Autor opisuje metody ekstrapolowania niepewności parametrów wyjściowych, w tym metodę CIAU polegającą na uwzględnieniu stanu reaktora jądrowego - dla reaktora PWR te parametry są związane z parametrami fizycznymi reaktora (m.in. ciśnienie, temperatura itp.) w wybranych miejscach. Na zakończenie zestawiono syntetyczne porównanie najważniejszych cech metod niepewności.

Rozwinięcie informacji zawartych w rozdziale trzecim zawiera rozdział **czwarty**, gdzie opisana jest metodyka szacowania wraz z oceną niepewności dla ciężkiej awarii. Opisane są podstawowe kroki, ze szczególnym uwzględnieniem kroków na których skupiła się recenzowana rozprawa. Autor dokonał tutaj uzasadnienia wyboru kodu obliczeniowego MELCOR, jako kodu służącego powszechnie do analizy ciężkich awarii. W dalszej części rozdziału Autor opisuje przygotowanie i kwalifikacje modelu matematycznego analizowanego reaktora jądrowego, gdzie wymagane jest zapewnienie, że wykorzystywany model matematyczny jest wiarygodnym numerycznym odwzorowaniem rzeczywistego obiektu jądrowego. Autor zastosował w rozprawie metodykę kwalifikacji stanu ustalonego. Jest to dość rozbudowana procedura polegająca na analizie m.in. oporów przepływu związanych z odbiorem ciepła z rdzenia reaktora. Autor uzasadnia tu również dokonany wybór jako metody najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności metody GRS. Autor podaje jej zalety m.in.

mniejsze poleganie na tzw. ocenie eksperckiej, niezależność obciążenia obliczeniowego od liczby parametrów wejściowych, zastosowanie twierdzenia Wilksa, wpływ wrażliwości parametrów wejściowych na uzyskane wyniki czy zapewnienie analizy ciągłych w czasie wartości parametrów wyjściowych, określenie dla danej chwili zakresu i rozkładu niepewności. W dalszej części rozdziału Autor opisuje szczegóły wybranej metody, takie jak liczba wybranych parametrów wejściowych, wymagane obliczenia, zakresy i rozkłady niepewności parametrów wejściowych i inne. Rozdział zakończony jest analizą ograniczeń metody GRS oraz podaniem zastosowanych sposobów rozwiązania wybranych z nich w kontekście rozprawy.

Rozdział **piąty** przedstawia opis zaproponowanej metodyki wykonywania analiz najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Autor tutaj skupił się na przedstawieniu realizacji kroków wymaganych do przeprowadzenia takiej analizy. Jako metodę weryfikacji zaproponowanej metodyki wybrał analizę eksperymentu Phebus, gdzie możliwa była modulacja mocy zestawu paliwowego i badanie pracy obiegu chłodzenia reaktora obejmującego zjawiska zachodzące w rdzeniu, obiegu pierwotnym, obudowie bezpieczeństwa wraz z reakcjami chemicznymi zachodzącymi w obudowie bezpieczeństwa. Przedstawiona jest dyskusja wyboru eksperymentu Phebus pod kątem walidacji wykonanych w rozprawie obliczeń, m.in. wybór parametrów wejściowych, w tym scenariusza, kodu obliczeniowego i parametrów wyjściowych. Bardzo rozbudowany jest podrozdział 5.3, gdzie Autor przeprowadza analizę dopuszczalnego zakresu zmienności i rozkładu gęstości prawdopodobieństwa parametrów wejściowych. Jest to bardzo istotny dla rozprawy rozdział, gdyż tutaj poddano wnikliwej ocenie szereg parametrów zastosowanych do realizacji obliczeń. Autor dokonuje określenia poziomu zrozumienia zjawisk bazującej na dostępnej literaturze, opisuje zdolność kodu obliczeniowego do modelowania danego zjawiska, dzieli parametry wejściowe na grupy w zależności od sposobu modelowania danego zjawiska w kodzie obliczeniowym. Jest to dość szczegółowa analiza z wieloma subiektywnie przyjętymi wartościami, jednakże niezbędna dla przeprowadzenia wymaganych obliczeń. Zdaniem recenzenta jest wystarczająco wnikliwa i należy przypuszczać, że przyjęte na jej bazie wartości (zakresy) zostały przyjęte prawidłowo. Rozdział kończy się identyfikacją parametrów wyjściowych podlegających analizie oraz innymi kwestiami związanymi z metodyką obliczeń.

Rozdział **szósty**, najistotniejszy z punktu widzenia rozprawy, przedstawia weryfikację zaproponowanej metodyki wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Autor tutaj przedstawił uzyskane wyniki obliczeń, które dotyczyły produkcji wodoru w rdzeniu reaktora, ciśnienia w obudowie bezpieczeństwa i całkowitej masy aerozoli zawieszonych w obudowie bezpieczeństwa. Dla każdego z ww. parametrów wyjściowych przedstawił przebieg czasowy danego parametru na wykresach przedstawiających dane eksperymentalne, obliczenia referencyjne oraz obliczenia niepewności, co pozwala m.in. na ocenę zakresu wyznaczonych przedziałów niepewności. Dodatkowo przedstawione są diagramy współczynników korelacji rang Spearmana pomiędzy poszczególnymi parametrami wejściowymi a maksymalną wartością rozpatrywanego parametru wyjściowego. Otrzymane wyniki są dokładnie omówione i przedyskutowane. Podsumowanie rozdziału zawiera ocenę zaproponowanej metodyki wykonywania analiz – Autor stwierdza jej przydatność w praktycznych zastosowaniach.

W podsumowaniu (rozdział **siódmy**), stanowiącym ostatni zasadniczy rozdział pracy Autor przedstawił zalety zaproponowanej metodyki obliczeń oraz wykazał, że teza postawiona na początku badań została w pełni potwierdzona - z czym należy się zgodzić. Opisuje wniesiony swój wkład do nauki w postaci zaprezentowanej w rozprawie metodyki oraz opisuje jej możliwości aplikacyjne w przemyśle jądrowym. Rozdział kończy rozważania na temat przyszłych badań, m.in. dalszą weryfikację zaproponowanej metodyki za pomocą obliczeń Monte Carlo.

Integralną częścią rozprawy są również załączniki (Aneks - rozdział **dziewiąty**) zawierający dokładny opis wszystkich użytych w rozprawie parametrów wejściowych. Obejmuje on stan wiedzy na temat wartości i zachowania się poszczególnych parametrów i zawiera istotne informacje z punktu widzenia dziedziny nauki i ułatwia poniekąd zrozumienie wartości merytorycznej rozprawy.

W podsumowaniu pragnę stwierdzić, że zaproponowany układ rozprawy jest prawidłowy, w tym podział na powyżej opisane części składowe, oddaje charakter pracy i ułatwia jej czytanie.

2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Problematyka poruszona w pracy, tj. w ogólności problemy bezpieczeństwa reaktorów jądrowych jest istotna (co najmniej) z punktu widzenia aktualnie bardzo ważnych zagadnień, w tym:

- prac zmierzających do opracowania coraz bardziej bezpiecznych, klasycznych reaktorów jądrowych,
- poprawę bezpieczeństwa istniejących reaktorów jądrowych (w tym szeroko rozpowszechnionych jednostek typu PWR),
- budową krajowej energetyki jądrowej, która ma zapewnić zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego oraz zwiększyć udział w krajowym miksie dyspozycyjnej czystej energii.

W związku z powyższym, istotne jest opracowanie metodologii przyczyniającej się do jak najlepszego szacowania wraz z analizą niepewności w kontekście zastosowania do analizy wystąpienia i przebiegu ciężkich awarii jądrowych. Bezpieczeństwo energetyki jądrowej jest w zasadzie najistotniejszym problemem związanym z rozwojem energetyki jądrowej i niewątpliwie opracowanie pełnego zakresu procedur bezpieczeństwa, w tym analiz i wymagań obowiązujących na etapie projektowania należy uznać za sprawę wręcz o kluczowym znaczeniu. Biorąc pod uwagę złożoność potencjalnej ciężkiej awarii jądrowej, m.in. ze względu na występowanie szerokiego zakresu zjawisk fizycznych i reakcji chemicznych w jej trakcie, w tym zjawisk nie w pełni scharakteryzowanych doświadczalnie i modelowo, należy uznać wszelkie prace przyczyniające się do realnego postępu w tym zakresie za niezmiernie wartościowe i niezmiernie pożądane.

Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznaję że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Włostowskiego został wybrany prawidłowo jako bardzo aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale przede wszystkim nakierowana była na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych o kluczowym znaczeniu z obszaru energetyki jądrowej w kontekście zwiększenia jej bezpieczeństwa.

3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez Doktoranta, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i wnioskach przedstawionych przez Doktoranta. Przedstawię również pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskażę główne walory rozprawy.

3.1 Zagadnienia naukowe i uytylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktorantka cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych rozwiązanych samodzielnie przez Doktorantka zaliczam:

- krytyczna analiza literatury nakierowana na wybór własnych kroków badawczych,
- przeprowadzenie wnikliwej analizy i dokonanie wyboru parametrów wejściowych i ich charakterystyki pod kątem własnych obliczeń,
- analizę poszczególnych parametrów pod kątem ich zastosowania w kodzie MELCOR,
- dokonanie obliczeń i ich walidacja wyników z użyciem dostępnych rezultatów pracy stanowiska badawczego,
- krytyczna analiza uzyskanych wyników wraz z oceną możliwości aplikacyjnych zastosowanej metodyki.

Za najistotniejsze elementy pracy w aspekcie praktycznym uważam:

- opracowanie modelu reaktora AP1000 w kodzie MELCOR pod kątem przyszłych analiz bezpieczeństwa,
- opracowanie poniekąd unikalnej metodyki analiz, która może stanowić alternatywę dla innych metod lub ich uzupełnienie i przy wykorzystaniu przez dozór jądrowy może zwiększyć spełnienie kryteriów akceptacji danej technologii jądrowej

Należy podkreślić, że zaletą zaproponowanej metodyki jest chęć ograniczenia subiektywnej oceny użytkownika kodu na uzyskane wyniki, czyli ograniczenie „czynnika ludzkiego”, co na pewno jest sporą zaletą zaproponowanej metody i właściwym krokiem w kierunku rozwoju tematyki analiz bezpieczeństwa jądrowego. Ponadto Autor wykazał, że możliwa jest redukcja czynnika subiektywnego na uzyskane wyniki i, że można w sposób bardziej systematyczny określać zakresy i rozkłady parametrów wejściowych do analiz bezpieczeństwa, uzyskując w ten sposób bardziej wiarygodną ocenę bezpieczeństwa chociażby w wykonaniu przez dozór jądrowy.

3.2 Uwagi krytyczne do pracy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta, w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe – pozytywnie. Należy tu zauważyć, że kwestie opisane w pracy są efektem posiadania znacznego zakresu wiedzy na ten temat, jak i sporej praktyki inżynierskiej, ale ze względu, że rozprawa przedłożona jest do publicznej obrony i dostępna jest szerszemu gruntu zainteresowanych wymagane jest bardziej ogólne omówienie pewnych kwestii czy przedstawienie informacji niekoniecznie tylko zrozumiałych dla osób posiadających praktykę obliczeniową za pomocą kodu MELCOR czy ściśle działających w wymienionej tematyce, stąd wiele uwag jest związanych z chęcią lepszego zrozumienia wielu kwestii poprzez ich bardziej przystępny opis.

Część uwag zamieszczonych poniżej uznaję za mniej istotne lub posiadające charakter porządkowy, niektóre z nich jednakże wymagają pewnej dyskusji naukowej podczas publicznej obrony pracy. Uwagi do pracy można podzielić na trzy kategorie:

Uwagi formalne związane ze strukturą pracy

Nie ma istotnych uwag związanych ze strukturą prac, układ pracy, umiejscowienie takich kwestii jak określenie celu pracy, postawienie tezy, podsumowanie, bibliografia, załączniki uznaję za prawidłowy.

Uwagi związane z redakcją pracy i sposobem prezentacji materiału

Brak zasadniczych uwag związanych z redakcją pracy i sposobem prezentacji materiału, jednakże pewne drobne kwestie mogące mieć odniesienie do prezentacji materiału zawarte są w tekście rozprawy.

Uwagi merytoryczne

- Główną uwagą merytoryczną związaną jest z wyborem i zastosowaniem narzędzia obliczeniowego MELCOR, jasne jest, że doktorant przeprowadza badania z wykorzystaniem narzędzi, do których ma dostęp wykazując ich przydatność, jednakże podczas lektury rozprawy nasunęło mi się pewne kwestie wymagające wyjaśnienia czy uściślenia, i tak:
 - kod MELCOR traktowany jest jako narzędzie, którego ograniczenia mają istotny wpływ na sposób analizy, czy zatem zbytne poleganie na tym narzędzi (np. str. 81), gdzie ograniczenia narzędzia narzucają ograniczenia na fizyczną zmienność danego parametru, tj. nie analizujemy czegoś możliwego w praktyce, bo kod na to nie pozwoli. Czy nie powinno być raczej odwrotnie?
 - nie do końca przekonująco został opisane kryteria na podstawie których dokonano wyboru do dalszych prac kodu obliczeniowego MELCOR, zwłaszcza, że wielokrotnie w pracy przytaczane są wady tego kodu takie jak braki w analizie pewnych zjawisk, niedokumentowane fragmenty kodu, problem ze stabilnością itp. Czy kwestią kluczową była jego dostępność czy też brak alternatywnych kodów czy inne zalety. Brak jest porównania z alternatywami, w tym ocena krytyczna modelowania zjawisk, zastosowanych przybliżeń, stabilności, czasu obliczeń itp. Jest to o tyle istotne, że jest to podstawowe narzędzie badawcze użyte w pracy.
 - nie jest jasne dlaczego kod MELCOR narzuca ograniczenia na możliwy zakres zmienności danego parametru. Jeżeli wprowadzane wartości parametrów są niefizyczne to niewątpliwie należy dokładniej sprecyzować zakres żądanych zmian danego parametru, jeżeli natomiast związane jest to z ograniczeniami algorytmów MELCOR-a, to zasadne byłoby przeanalizowanie tych algorytmów i ich rozszerzenie czy modyfikacja.
 - na stronie 87 podano informacje, że współczynnik C_f nie jest opisany w dokumentacji kodu MELCOR. Czy jest to częsty przypadek tego kodu i jak w takiej sytuacji należy postąpić aby uniknąć błędów wskutek niejasności kodu? Jest to dość niepokojąca sprawa.
 - na stronie 93 podano, że „Kod MELCOR w sposób zgrubny modeluje wiele zjawisk i to różnych grup rozpoczynając od zjawisk cieplno-przepływowych kończąc na modelowaniu zjawisk chemicznych”. W dalszej części tego akapitu podano jeszcze wiele wad kodu pod kątem modelowania szeregu zjawisk i wyspecyfikowany jest brak możliwości ingerencji przez użytkownika w modele tych zjawisk. W konsekwencji narzuca się ograniczenia na zakresy zmienności i rozkłady gęstości parametrów. Czy to jest podejście fizyczne? Czy nie lepiej

opracować nowy kod modelujący w sposób satysfakcjonujący występujące zjawiska i reakcje i stosować odpowiednie zakresy i rozkłady gęstości prawdopodobieństwa bez tych sztucznych ograniczeń?

- wnioski na stronie 116 wskazują, że nie jest znany model produkcji wodoru zawarty w kodzie obliczeniowym – czy nie jest wprawdzie wymagane przeanalizowanie tego modelu przed prowadzeniem analiz przy użyciu tak dużej liczby parametrów? Czyli ogólne pytanie – czy MELCOR to kod otwarty, tj. czy wprawdzie przeanalizowano/skorzystano z dokumentacji modeli odpowiednich zjawisk?

- Wielokrotnie pojawia się kwestia czasu obliczeń – ale nie wyjaśniono dlaczego czas obliczeń jest tutaj taki istotny, czy nie można poświęcić więcej czasu obliczeniowego np. na dokładne obliczenia MC zamiast stosowanych tu metod, gdzie szacuje się prawdopodobieństwo itp.? Dobrze byłoby podać realny czas rzeczywisty poszczególnych typów obliczeń czy wymagany dostęp do konkretnej klasy jednostek obliczeniowych itp. Wydaje się, że przy intensywnym obecnym rozwoju i dostępie do sprzętu obliczeniowego ten argument za rozwojem metod przybliżonych i opartych na szacowaniu wielu parametrów może się wydawać przesadzony,
- W pracy pokazane są wyniki poniekąd modelowe (walidacja dla stanowiska eksperymentalnego) – zatem pytanie związane jest z ich wartością dla analiz bezpieczeństwa „normalnej” elektrowni jądrowej – tj. jak dokonuje się ich przeskalowania (czy innej operacji) niezbędnego do przeniesienia ich na grunt energetycznego reaktora jądrowego?,
- Nie do końca zostało pokazane, a co może być interesujące, jak w praktyce takie wyniki analiz brane są pod uwagę przy projektowaniu elektrowni jądrowej. W jaki sposób przetwarza je i wykorzystuje wspomniany w pracy dozór jądrowy?
- W pracy pojawia się sformułowanie „*Metodykę kwalifikacji stanu ustalonego opisaną w publikacji [51] zastosowano w badaniach prowadzonych w ramach doktoratu [52].*” Wskazane byłoby opisanie dokładniejsze wraz z uzasadnieniem wyboru i dlaczego przytoczono tu publikacje [52].
- Jako metodę obliczeniową wybrano metodę GRS, wyróżniającą się pozytywnie m.in. zredukowanie uzależnienia od tzw. metody eksperckiej. Jednakże jak wskazano, metoda ta została stworzona i stosowana przez niemiecki dozór jądrowy. Czy w związku z odejściem Niemiec od energetyki jądrowej nie ma niebezpieczeństwa zaniechania rozwoju tej metody i jej dalszej walidacji, jak przypuszczam, na nieistniejących już niemieckich obiektach jądrowych?
- Nie do końca jasne jest sformułowanie typu „...liczba pojedynczych obliczeń kodu ...”, które dość często pojawia się w pracy – o co tu chodzi? Jak na podstawie takiej informacji ocenia się złożoność obliczeniową metody/kodu, wymagany czas obliczeń czy wymagane zasoby sprzętowe (dostęp do konkretnej architektury?) celem realizacji obliczeń za pomocą danej metody?

- Podano, że (str. 43) „... najbardziej perspektywiczną metodą analiz BEPU dla ciężkich awarii do zastosowania w Państwowej Agencji Atomistyki jest metoda GRS”. Nie jest to przekonujące dla recenzenta, gdyż brak jest informacji jakie są wymagania PAA odnośnie tego typu metod i jak odbywa się ich wykorzystaniem w PAA oraz jak to jest powiązane z pracą dozoru jądrowego
- Pojawia się sformułowanie (str. 44) „... że maksymalny wynik kodu nie zostanie przekroczony z prawdopodobieństwem ...” – przypuszczam, że jest to pewien typ żargonu lub jakiś „skrót myślowy”,
- Nie jest jasne jak zastosowanie jednorodnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa (str. 50), jak może rozwiązać problemy opisane w 4.2.4, zwłaszcza, że parametry wejściowe mogą być w różnym stopniu zależne od siebie i „rzeczywiste” rozkłady gęstości prawdopodobieństwa są niejasne,
- na stronie 56. Zaznaczono, że w analizowanym scenariuszu awaryjnym nie uwzględniono detonacji wodoru (zresztą niemodelowanej w MELCOR). Czy to nie jest zbyt uproszczenie w związku z tym, że chociażby propagacja promieniotwórczości (czy zniszczenie obudowy bezpieczeństwa) może diametralnie zmienić przebieg ciężkiej awarii jądrowej?
- Nie bardzo jasna jest wstawka na stronie 60 związana z tzw. uczeniem maszynowym w kontekście opisanych w 5.3.3 przyjętych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa (przyjęto jednorodne!). Interesującego byłoby zapoznanie się z informacją jak uczenie maszynowe (wyniki w ten sposób otrzymane) przyczyniły się do podjęcia takiej decyzji,
- Nie bardzo jasne jest opisane na stronie 62 przypisanie współczynnika -1 (zdolność modelowania zjawiska) jeżeli wraz ze zmianą wersji kodu została zmieniona wartość współczynnika przejmowania ciepła dla cyrkonu, dwutlenku cyrkonu i dwutlenku uranu. Jeżeli wartość została uaktualniona w nowej wersji kodu, to zapewne na bazie lepszego zrozumienia zjawiska, nowych pomiarów itp. – więc raczej wskazuje na podwyższenie poziomu rozumienia zjawiska!
- błędny jest powtarzający się zapis jednostki współczynnika przejmowania ciepła jako W/m^2K
- nie bardzo jasne jest sformułowanie ze strony 64 „Powszechność stosowania temperatury jako parametru powoduje, że jego zakres zmienności w różnych korelacjach jest znacznie mniejszy niż dla innych parametrów”. O co tu chodzi?
- Nie za bardzo przekonujące jest tłumaczenie zawarte na stronie 74 odnośnie zakresu zmian wartości parametrów: „... z punktu widzenia stabilności kodu nie jest uzasadnione zmienianie wartości parametrów, w tak szerokim zakresie jak powyżej ...”. Jest to dość enigmatyczne i wskazuje na istotne ograniczenia kodu MELCOR i budzi wątpliwości czy sztuczne ograniczanie wartości parametrów nie powoduje otrzymywania mniej wartościowych wyników. Czy nie lepiej wpięrow przeprowadzić analizy stabilności kodu zanim zdecyduje się na jego użycie?
- Na stronie 77 opisany został doboru współczynników parametrów P-88 i P-89 (i inne), i tak: „Dla parametru P-89 zakres zmienności powstał przez podział wartości domyślnej kodu przez

3.6 oraz przez pomnożenie jej przez 2.78. Dla drugiego parametru wartość domyślną podzielono przez 6 i pomnożono przez 1.67". To już jest zupełnie niejasne i nie wiadomo dlaczego tak zrobiono i jakie jest uzasadnienie tak przyjętych wartości liczbowych.

- Uzasadnienia wartości zakresu wielu parametrów poparte są solidną porcją odnośników literaturowych, ale nie jest pokazane, że przypadki rozważane w danych pozycjach literaturowych są reprezentatywne dla przypadku rozpatrywanego w rozprawie, np. przypadek ze strony 84, gdzie podany jest zakres gęstości aerozoli, czy w każdym przypadku będzie prawidłowy, czy również dla energetycznych reaktorów PWR?
- Na stronie 94 stwierdzono, że dla analizy ciężkich awarii określa się zapasy bezpieczeństwa obiektu, nie jest to jednak dokładnie sprecyzowane, zwłaszcza, że jak stwierdzono dalej jednym z celów przedstawionej w rozprawie metodyki jest spełnienie tego wymagania. Czy można by to nieco rozwinąć?
- Nie bardzo jasne są rozważania dla kodu TRACE zawarte na stronie 95-97, w tym, rysunek 5.2. czy to chodzi o stwierdzenie, że nie jest racjonalne stosowanie normalnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa w analizach bezpieczeństwa? Faktycznie rysunek 5.2 może sugerować coś takiego, ale też nie uzasadnia stosowania rozkładu jednorodnego. Nie bardzo jasne jest też nieco filozoficzne stwierdzenie, że skoro każdy model w jakimś stopniu „zniekształca rzeczywistość”, to wymagane jest stosowanie zniekształconych danych aby poprawnie opisać rzeczywistość. A czy nie może być tak, że stosując zniekształcone dane jeszcze bardziej zniekształcimy opis rzeczywistości?
- Na stronie 103 podana jest informacja, że do losowania wartości parametrów stosowana jest technika LHS, „...która zapewnia, że wszystkie obszary dopuszczalnego zakresu rozkładu gęstości prawdopodobieństwa parametru są reprezentowane w zbiorze wylosowanych wartości”. Nie do końca rozumiem dlaczego Autor zwraca tutaj na to uwagę (i w dalszym ciągu pracy też), gdyż wydaje mi się, że standardowe (i biblioteczne) generatory liczb pseudolosowych wbudowane w wiele języków programowania posiadają takie właściwości.
- Na stronie 105 pojawia się uzasadnienie zastosowania do walidacji eksperymentu Phebus FPT-1, uznając go za „wartościowy do przeprowadzenia weryfikacji zaproponowanej metodyki ...”. Czy można by to nieco bardziej rozwinąć i podać jakieś konkretne argumenty za?
- Na stronie 107 podano, że z analizy wyeliminowano pewne parametry (P-53 i P-54) dlatego, że powodowały niestabilności numeryczne, czy można prosić o szerszy komentarz na ten temat, gdyż taka sytuacja w ogólności jest dość niepokojąca,
- Strona 108 – czy prawidłowo określony moment intensywnego utleniania cyrkonu to duże osiągnięcie walidacyjne, przecież to wynika z pojawiania się temperatury progowej reakcji?
- Rysunek 6.1 (i inne) – pokazane są obliczenia niepewności. Wskazane byłoby zaindeksowanie wybranych (np. skrajnych) krzywych wartościami parametrów dla których zostały one otrzymane. W tej chwili zbiór krzywych niepewności raczej jest mało informatywny z punktu widzenia analizy wartości parametrów wejściowych. Ponadto, nie do końca jest jasne dla

jakich wartości parametrów zostały wykorzystane – co to znaczy „uzyskane ... z wykorzystaniem wartości najlepszego szacowania poszczególnych analizowanych parametrów wejściowych”. Czy można jakoś przytoczyć te wartości?

- Mam wrażenie, że wnioski przedstawione w związku z rysunkiem 6.32 (i innych) są raczej trywialne i dla niektórych przypadków oczywiste. Czy nie jest możliwe np. przeanalizowanie odpowiedniego modułu/funkcji kodu odpowiedzialnej za produkcję wodoru i na tej podstawie stwierdzenie co może mieć wpływ na produkcję wodoru, a co nie? Mam chwilami wrażenie, że jest to badanie nieznanego kodu/algorytmu danego na zasadzie czarnej skrzynki - czyli sprawdzania jak wyjścia reagują na wejścia.
- Strona 112 – „Parametr P-50 powinien być bardziej skorelowany z maksymalną produkcją wodoru, niż parametr P-172, czego nie zaobserwowano”. Skąd to wiadomo? Czy w ogólności przyjęta do analizy bardzo duża liczba parametrów i ich zastosowany rozrzut nie powoduje, że znikają silne korelacje, gdyż realizację określonych zależności można uzyskać przez całkowicie różne zbiory parametrów wejściowych? Mam tu na myśli efekt poniekąd podobny związany z prowadzeniem dopasowania zależności eksperymentalnych. Przy dużej liczbie parametrów (np. kilkanaście) łatwo można dostać wiele płaskich minimów lokalnych itp. Czy nie należy przeprowadzić dokładniejszej analizy statystycznej otrzymanych wyników, a przynajmniej zacząć opisać w rozprawie analizy od minimalnego zbioru parametrów wejściowych, uzyskać korelacje, zawęzić parametry a potem dodawać kolejne parametry itp. Ponadto widoczna jest nie do końca dobra zgodność wyników obliczeń referencyjnych z danymi eksperymentalnymi, co może oznaczać, że kod nie został zwalidowany dla tego przypadku. Czy nie byłoby możliwe np. dopasowane odpowiednimi metodami kodu dla wybranej grupy najbardziej istotnych parametrów do wyników eksperymentalnych, a później na tej bazie prowadzić analizę niepewności?
- Odnośnie rysunku 6.4. Zaznaczono, że „Spadek temperatury do zera wskazuje na utratę integralności koszulki paliwowej”. Skąd taki wniosek, w przypadku tego typu analizy raczej należałoby się powołać na wartości odpowiedniego parametru opisującego w sposób liczbowy integralność koszulki paliwowej.
- Na stronie 123 pojawia się termin „zachowanie radionuklidów” oraz, że wiąże się to z jedną z największych niepewności. Co to znaczy zachowanie radionuklidów i w jaki sposób jest opisywane?
- Odnośnie podrozdziału 6.3 będącego podsumowaniem rozważań w rozdziale 6. Stwierdzono, że „Uzyskano akceptowalne i zgodne z dostępną literaturą zakresy niepewności ...”. Nie za bardzo jest to precyzyjne sformułowanie, tj. jakie zastosowano kryterium akceptacji i też dobrze byłoby zrobić porównania z wynikami literaturowymi np. jako osobny podrozdział, gdzie zaznaczone byłyby te wartości – np. dedykowane wykresy porównawcze otrzymanych krzywych i krzywych literaturowych.
- Na stronie 134 zauważono, że „W literaturze zauważalny jest podobny efekt braku istotnego skorelowania parametrów wejściowych z wyjściowymi ... „. Czy to nie można przypisać wprowadzeniu dużej liczby parametrów wejściowych?

- Końcówka rozdziału 6.3 jest dość niejasna, Autor tłumaczy np. nie uzyskanie zbieżności obliczeń m.in. specyfiką narzędzia obliczeniowego czy też podaje sposoby osiągnięcia zbieżności za pomocą pewnych dość niejasnych kombinacji. Czy to jest jedyny sposób takowych analiz?
 - Na stronie 139 stwierdzono, że zaproponowana metodyka zostanie wykorzystana w praktyce – wskazane byłoby opisanie w jaki sposób, tj. jak za jej pomocą będą weryfikowane oceny danego reaktora czy wyniki ze Wstępnego Raportu Bezpieczeństwa, ponadto wspomniany jest przypadek, gdy inwestor dysponuje własnymi danymi eksperymentalnymi. Czy jest to powszechny przypadek i skąd inwestor może posiadać takie dane?
 - Bardzo często w rozprawie powoływana jest praca [31], czy to nie jest zbytne oparcie rozprawy na jednej publikacji?
 - Uwagi do informacji zawartych w Aneksie:
 - pojawiają się oznaczenia np. „DCH_OPW OPROW” .. inne, które nie zostały wyjaśnione,
 - co to jest moc początkowa rdzenia (w chwili wystąpienia awarii)?
 - co to jest parametr P3 – podane, że jest to krzywa ciepła powyłączeniowego, a przyjmuje się jakąś wartość – jaki związek ma krzywa z wartością parametru P3?
 - nie jest zbyt jasny parametr P4, wskazany byłby jakiś schemat
 - wskazano na ograniczenia MELCOR odnośnie modelowania przepływów dwufazowych – czy nie lepiej byłoby opracować moduł lepiej to modelujący
 - na stronie 152 podano, że efektywność absorpcji ciepła powyłączeniowego przez dwutlenek uranu jest parametrem niefizycznym, przydałoby się dokładniejsze wyjaśnienie o co tu chodzi
 - parametr P28: „Uznano, że jest to parametr wykorzystywany w równaniu parametrycznym ...” – jak to „uznano”? Coś więcej na ten temat?
- Parametr P31 – jaki opór cieplny zakłada „pierwszy model”?
- opisane wcześniej obniżanie poziomu zrozumienia zjawiska tylko dlatego, że w nowej wersji kodu są inne wartości domyślne!
 - parametr P33, co to za temperatura 23.4K?
 - Czy MELCOR był walidowany za względu na opisane poszczególne modele czy nie?
 - czy jeżeli zastosujemy narzędzie i powiemy, że np. ma dość ograniczone możliwości modelowania przepływów dwufazowych itp. – to czy to „spodoba się” dozorowi jądrowemu

W podsumowaniu do uwag - generalne wrażenie jest takie, że siłą rzeczy istniejący niedostatek zgromadzonej do tej pory wiedzy jest kompensowany wprowadzaniem bardzo wielu różnych parametrów i stosowaniem dość dużego rozrzutu ich wartości podczas tego

typu analiz. Zdaniem recenzenta może to prowadzić do wielu problemów z zachowaniem kodu czy kłopotów z analizą wyników, w tym opisanych korelacji. Poniższa praca jest też cenna, gdyż w pośredni sposób wykazuje istotne ograniczenia takiego podejścia i sugeruje pośrednio np. konieczność opracowania lepszych narzędzi do modelowania opisanych zjawisk ciężkich awarii.

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają w sposób znaczący wartości naukowej pracy. Raczej należy je traktować jako listę niejasności, które nasunęły się recenzentowi podczas lektury rozprawy.

Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory

Doktorant zrealizował dość szeroki zakres prac zarówno badawczych jak i pod kątem praktycznym. Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta, a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie tworzenia nowych procedur w dziedzinie bezpieczeństwa obiektów jądrowych, w tym na potrzeby dozoru jądrowego. Wyniki są cenne zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszego rozwoju. W tym kontekście wiele uwag krytycznych tyczy się poprawy jakości takiej prezentacji.

4. Wnioski końcowe

Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autora w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w wielu ośrodkach naukowych i przemysłowych prace związane ze zwiększeniem bezpieczeństwa energetyki jądrowej, a w szczególności rozwojem procedur symulujących wystąpienie ciężkiej awarii jądrowej. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które zdaniem recenzenta mogą zostać wdrożone w praktyce. Zdaniem recenzenta złożone zjawiska wpływające na potencjalną ciężką awarię jądrową i złożony przebieg procesów powoduje celowe wszelkie próby podjęte do ich opisu – czy to badania wydzielonych procesów itp. czy próby ich statystycznego opisu. Istotne jest chociażby pokazanie co może mieć największy wpływ na przebieg awarii i jakie szczegółowe informacje są najbardziej konieczne. Ma to znaczenie w kontekście ograniczonego stanu wiedzy (w tym momencie) na przebieg takowych awarii.

Zastosowana metoda badawcza jest poprawna, wykorzystano dostępne narzędzia badawcze oraz metody analiz statystycznych, chociaż pewne kwestie, jak zaznaczono w rozprawie mają charakter dyskusyjny i wymagają wyjaśnień. Przedstawiono szereg wyników przeprowadzonych analiz wraz z ich dokładnym wyjaśnieniem w sposób nadający się do recenzji.

Reasumując, pomimo pewnych niedociągnięć, uwag natury formalnej i merytorycznej, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Włostowskiego do publicznej obrony.

Kwestię ewentualnego wyróżnienia rozprawy pozostawiam do dalszej oceny na podstawie przebiegu publicznej obrony.

