

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Adama Sylwestra Jaroszka

**Analiza lokalnej dyspersji zanieczyszczeń promieniotwórczych
w rejonie lokalizacji elektrowni jądrowej w Żarnowcu**

w postępowaniu prowadzonym przez
Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Politechniki Warszawskiej

1. Cel i zakres rozprawy

Tematyka rozprawy jest dosyć dokładnie zdefiniowana przez jej tytuł. Jednak w odróżnieniu od typowo stosowanych do modelowania dyspersji równań adwekcji-dyfuzji z zadaniem polem prędkości wiatru i z numerycznym ich rozwiązywaniem metodami gaussowskimi czy lagranżowskimi, w rozprawie rozważono modele mechaniki płynów bazujące na równaniach Naviera-Stokesa z dyskretyzacjami opartymi na takich metodach, jak metoda elementów skończonych lub metoda objętości skończonych, która jest użyta w rozprawie. Doktorant zwraca uwagę na mniejsze siatki przestrzenne stosowane w rozwiązywaniu takich modeli oraz łatwość uwzględniania w nich przeszkód na powierzchni gruntu, jak na przykład nawet pojedynczych budynków. Podane w rozprawie średnie czasy obliczeń potwierdzają to stwierdzenie. Numeryczne metody rozwiązywania modeli mechaniki płynów są bardzo zaawansowane nie tylko w zastosowaniach hydrologicznych, ale też w przepływach gazów. Doktorant oparł rozwiązywanie równań na ogólnie dostępnym pakiecie OpenFOAM.

Zagadnienie modelowania rozptyłu zanieczyszczeń promieniotwórczych wytwarzanych przez planowaną elektrownię w Żarnowcu ma duże znaczenie praktyczne. Decyzja o lokalizacji elektrowni i związanych z tym możliwych zagrożeniach powinna być poprzedzona symulacjami. Rozprawa stanowi przyczynek do takich badań. Zastosowanie modeli mechaniki płynów do rozprzestrzeniania się izotopów promieniotwórczych nie jest dotąd rozpoznane, więc rozprawa ma też niewątpliwie charakter naukowy.

Doktorant stawia w rozprawie dwie tezy:

- lokalna topografia doliny Jeziora Żarnowieckiego może w sposób istotny wpływać na procesy rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych,

- narzędzia numerycznej mechaniki płynów na przykładzie OpenFOAM mogą stanowić alternatywę w rozwiązywaniu zagadnień związanych z modelowaniem uwolnień awaryjnych izotopów promieniotwórczych z elektrowni jądrowych.

Prócz tego Doktorant formułuje 12 celów szczegółowych odpowiadających kolejnym fazom opisanych w rozprawie prac.

Główną oryginalnością rozprawy jest właśnie użycie nowej metodyki modelowania dyspersji izotopów promieniotwórczych, co nie było dotąd przebadane. Jej zastosowanie wymagało opanowania posługiwania się nowym narzędziem – pakietem OpenFOAM, zebrania potrzebnych danych, zamodelowania problemu i przeprowadzenia obliczeń. Prócz tego Doktorant przeprowadził porównania wyników z wynikami uzyskanymi za pomocą modeli dyspersyjnych opartych na metodach lagranżowskich, wchodzących w skład systemu JRODOS opracowanym w Instytucie Technicznym w Karlsruhe w Niemczech i będącym jednym z systemów wspomagania decyzji stosowanym przez Państwową Agencję Atomistyki w Polsce.

Tematyka rozprawy bardzo dobrze mieści się w badaniach z zakresu poprzedniej dyscypliny inżynieria środowiska, a tym samym wchodzi w zakres dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Zresztą pośrednio, ze względu na obiekt emitujący zanieczyszczenia, tematyka rozprawy jest także bliska energetyce.

2. Zawartość rozprawy

Doktorant bardzo solidnie podszedł do opracowania tematu opisując na początku produkcję energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych i stosowane w tym celu technologie oparte na reakcji rozszczepiania ciężkich jąder atomu, włączając w to opis reaktora AP1000, który zgodnie z programem polskiej energetyki jądrowej ma być pierwszym reaktorem uruchomionym w Polsce. Następnie przedstawia systemy zabezpieczeń w reaktorach, izotopy promieniotwórcze występujące w reaktorach oraz charakteryzuje uwolnienia produktów reakcji jądrowych zarówno w czasie normalnej pracy, jak i w czasie znanych typów awarii.

Po tym wprowadzeniu Doktorant przechodzi do prezentacji właściwej części rozprawy, rozpoczynając od prezentacji pakietu OpenFOAM oraz systemu JRodos, którego trzy modele dyspersji służą w rozprawie do porównań uzyskanych wyników. Te porównania wykonano na danych z eksperymentu przeprowadzonego przez Koreański Instytut Badań nad Energią Atomową na terenie koreańskiej elektrowni Yeonggwang o zbliżonej topografii do okolic Jeziora Żarnowieckiego. Przeprowadzone symulacje wykazały, że średnio predykcje za pomocą OpenFoam dokładniej odpowiadają pomiarom wykonanym w Korei. Niemniej jednak, błędy względne są w większości znaczne, na poziomie 80-100%.

W ostatniej części opisu, Doktorant przedstawia symulacje wykonane dla założonej lokalizacji elektrowni jądrowej nad Jeziorem Żarnowieckim za pomocą pakietu OpenFOAM. W tym celu przeprowadził analizę topografii terenu i warunków klimatycznych w rejonie. W symulacjach przyjął charakterystykę opisanego reaktora AP1000 oraz uwolnienia na podstawie danych producenta reaktora dla normalnej eksploatacji oraz na podstawie zalecenia International Atomic Energy Agency dla wielkich awarii, a także skonsultował je z pracownikami urzędu dozoru jądrowego. Po przyjęciu kilku wariantów meteorologicznych oraz zamodelowaniu kilku wariantów uwolnień Doktorant przeprowadził sześć eksperymentów symulacyjnych dla normalnej eksploatacji, awarii projektowych i wielkich awarii pozaprojektowych. Wyniki przedstawił na wykresach i w postaci tabelarycznej i ocenił zgodnie z przyjętymi kryteriami, a następnie przedyskutował.

Oceniając zawartość rozprawy należy zauważyć, że przedstawiono w niej zarówno osiągnięcia o charakterze naukowo-badawczym jak i praktycznym. Do pierwszych należy zaliczyć rozpoznanie możliwości zastosowania modeli mechaniki płynów do modelowania dyspersji izotopów promieniotwórczych oraz porównanie wyników zastosowania tej metodyki z najczęściej stosowanymi metodami wyznaczania dyspersji takich zanieczyszczeń. Przeprowadzone badania wskazują, że w takich zastosowaniach jak rozpatrywane w rozprawie, o niedużej skali przestrzennej i w których istotną rolę stanowi topografia powierzchni, modele mechaniki płynów mogą być atrakcyjną alternatywą dla powszechnie stosowanych metod. Osiągnięcia praktyczne to seria symulacji rozprzestrzeniania się izotopów promieniotwórczych oraz ocena skutków takich incydentów. Uzyskane w trakcie badań symulacyjnych wyniki dają pewną ocenę zagrożenia promieniotwórczego w najbliższej okolicy elektrowni oraz działań, jakie należałoby podjąć w przypadku założonych typów awarii. Słabszą stroną przeprowadzonych badań jest niezbyt duża liczba przebadanych scenariuszy, szczególnie dotyczących kierunków wiatrów, oraz brak lepszego oszacowania niepewności wyników. To jednak wymagałoby przeprowadzenia bardzo dużej liczby obliczeń. Byłoby to zapewne możliwe do wykonania, ale wtedy trzeba by było wykonać obliczenia na superkomputerach.

3. Uwagi szczegółowe

Praca zawiera sporą liczbę drobniejszych wad, których przykłady przedstawiam poniżej. Zapis a^b oznacza stronę a , b -ty wiersz od góry. Analogicznie, a_b oznacza stronę a , b -ty wiersz od dołu.

15, wzór (1) – Równoważność między energią a masą jest wyrażona wzorem $E = mc^2$. We wzorze miało chodzić pewnie o ubytek masy, ale z objaśnienia to nie wynika.

16, wzór (2) – Po prawej stronie zamiast ${}_0^1U$ powinno być ${}_0^1n$.

16, wzór (6) – W liczniku powinna być wartość ze wzoru (4), czyli $3,825 \cdot 10^{-11}$.

22, rys. 3 – Na rysunku brak elementów 5 i 10 wymienionych w podpisie.

32, wzór (10) i jego opis – Opis tego wzoru jest niezrozumiały. Według zapisu powyżej, ma to być aktywność w złożu opóźniającym. Ale C_i to aktywność gazu w obiegu chłodzącym, a t to czas transportu z obiegu chłodzącego do przechowalnika. A więc wzór podaje chyba aktywność na wejściu do złoża opóźniającego. Aby obliczyć aktywność w złożu trzeba by było chyba scałkować odpowiedni wzór aktywności chwilowej po czasie jego przebywania w złożu.

45₁-46² – Jak metodyka pomiarów może wpłynąć na emisje uwolnień? Może najwyżej wpłynąć na oszacowanie tej emisji.

53⁴⁻⁷ – Przy takich ocenach trzeba brać pod uwagę nie tylko prawdopodobieństwo zdarzenia, ale także skutki.

59, wzór (11) – We wzorze brakuje opisu oznaczeń. Jest to, co prawda, równanie Naviera-Stokesa, więc w zasadzie można się domyślić znaczeń. Zapewne litera U oznacza wektor prędkości płynu (ale Doktorant używa dalej także oznaczenia u ; czy oba oznaczają to samo, czy są między nimi różnice?) ρ oznacza gęstość płynu, μ lepkość dynamiczną płynu, a p ciśnienie. Nie podaje się, co oznacza zapis UU . Najbliżej kojarzące się znaczenie w takim zapisie to iloczyn skalarny wektorów zapisywany często bez żadnego znaku. Ale wtedy trzeba by było obliczać dywergencję ze skalara, co nie jest określone. Prawdopodobnie więc jest to iloczyn tensorowy (który często oznacza się znakiem \otimes). Jeżeli już nie używa się tego znaku (może w rozpatrywanym zastosowaniu jest to przyjęte?), to

dobrze by było objaśnić rodzaj tego mnożenia w opisie, aby nie wprowadzać czytelnika w niepewność. W następnym składniku powinien być laplasjan, który oznacza się znakiem Δ lub ∇^2 , a nie Δ^2 . Ten człon zazwyczaj występuje też w równaniu ze znakiem dodatnim, a przy jego interpretacji mówi się o siłach lepkości. Wreszcie człon po prawej stronie jest określony jako „człon źródłowy”. Jeżeli p jest ciśnieniem, to co oznacza „źródłowy” i co to jest b ? Braki opisu oznaczeń znajdują się też w następnym wzorach.

62, wzór (14) – Co to jest v ?

62, wzór (17) – Jeżeli u jest wektorem, to H także musi być wektorem, a nie macierzą.

62, wzór (19) – To równanie powinno być zapisane następująco: $u = A^{-1}H - A^{-1}\nabla p$. Mnożenie macierzy nie jest w ogólności przemienne i pisanie macierzy w mianowniku ułamka powoduje, że nie wiadomo, jaka jest kolejność mnożenia macierzy. Tutaj akurat mnożenie jest przemienne, bo A jest macierzą diagonalną, jednak reguły zapisu powinno się przestrzegać. Ta sama uwaga dotyczy dalszych wzorów.

62, wzór (20) – Tutaj właśnie jest niewłaściwa kolejność mnożenia. W ostatnim członie, po prawej stronie, mnożenie przez wektor S_f powinno być z prawej strony.

62, wzór (21) – Co się stało z oznaczeniami f we wskaźniku dolnym?

63, wzór (22) – Funkcja $|U|$ nie jest różniczkowalna w punkcie $U = 0$, więc powinno się zrobić założenie, że $U \neq 0$.

64 – Tu pojawia się funkcja $\phi(x)$, która nie występuje w poprzednich wzorach. Trzeba by było napisać, jaki związek ma ona z poprzednio przeprowadzonym wyprowadzeniem.

79, tab. 28 – W dalszych tablicach są także dane dla punktu A10, a tu ich nie ma.

88₂ – Z róży wiatrów na rys. 40 dla Łeby wynika, że rozkład wiatrów od zachodniego do południowego jest prawie równomierny, między 10% a 12%. Ze względu na południowy charakter rynny jeziora wydawałoby się, że kierunek południowy może być ważniejszy dla tego położenia elektrowni, także dlatego, że na północ leżą większe miejscowości. Oczywiście najlepiej byłoby przebadać cały zakres kierunków, ale to wymaga znacznego zwiększenia liczby obliczeń.

99, wzór (47) – Tutaj użyto dużej litery D do oznaczenia pochodnej. Ale poprzednio używano w podobnych równaniach znak pochodnej cząstkowej ∂ . Czy użycie litery D ma inne znaczenie? A jeśli tak, to jakie? Podobnie jest we wzorze (48).

104, tab. 36 – W pierwszej kolumnie, drugim wierszu powinno być „Reaktory > 1000 MW (tb)”.

105³ – Tutaj RBE jest zdefiniowane jako „względna skuteczność biologiczna”, ale poniżej, w tabl. 37, jest ono nazwane „współczynnikiem konwersji”. Czy to jest to samo?

110₈ – Prawdopodobieństwo jest wielkością bezwymiarową i nie może wynosić 10^{-8} lat.

125⁴ – Odjęcie odpowiednich wartości daje 1120 m, a nie 1200 m.

130¹¹⁻¹² – Skutków „najcięższych hipotetycznych awarii” dla miejscowości Żarnowiec i Gniewno chyba nie przebadano, bo byłyby to warunki z południowym wiatrem i wielkimi awariami pozaprojektowymi, a takich scenariuszy akurat nie rozważono.

W rozprawie jest też wiele literówek, co trochę dziwi, bo łatwo by je było wychwycić używając odpowiednich narzędzi edytora.

4. Podsumowanie

W rozprawie przebadano zastosowanie metody mechaniki płynów do modelowania dyspersji izotopów promieniotwórczych emitowanych w czasie normalnej eksploatacji i w czasie awarii projektowych i pozaprojektowych przez projektowaną elektrownię jądrową nad Jeziorem Żarnowieckim. Jest to nowe zastosowanie metodyki mechaniki płynów, a do tego zagadnienie to ma ważne znaczenie praktyczne. Doktorant przebadał postawione tezy i wyciągnął wnioski dające rozeznanie, jakiej skali problemy mogą wystąpić po uruchomieniu elektrowni. Uważam, że rozprawa spełnia kryteria naukowe stawiane pracom doktorskim zarówno ustawowe jak i zwyczajowe. Przeprowadzone badania mają też istotną wartość praktyczną. Wnioskuje więc do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Energetyka i Górnictwo Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr. inż. Adama Sylwestra Jaroszka do publicznej obrony rozprawy.

