

**Prof. dr inż. Henryk Anglart, Prof. em.**  
**Physics Department**  
**School of Engineering Sciences**  
**KTH Royal Institute of Technology**  
**Sztokholm, Szwecja**

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr Michała Górkiewicza pt. "*Development of localized coupled neutronic and CFD calculation for HTR application*".

### **1. Ocena tematyki podjętych badań**

Zapewnienie dostępu do tanich i czystych źródeł energii jest jednym z bardziej istotnych i trudnym w praktycznej realizacji wyzwań dwudziestego pierwszego wieku. Jest to wyzwanie istotne, gdyż nie jest możliwy dalszy rozwój współczesnej cywilizacji bez powszechnego dostępu do źródeł energii. Realizacja takiego zadania jest jednak bardzo trudna ze względu na wyczerpujące się zasoby naturalne nośników energii oraz, szczególnie w ostatnich latach, z uwagi na postępującą degradację środowiska naturalnego człowieka.

By podolać temu wyzwaniu, na całym świecie podejmowane są intensywne prace w zakresie rozwoju nowych technologii energetycznych, a w szczególności, nowych typów reaktorów jądrowych. Jednym z nich jest wysokotemperaturowy reaktor chłodzony gazem HTGR (ang. *High-Temperature Gas-Cooled Reactor*), będący przedmiotem badań przeprowadzonych w rozprawie. Reaktor ten posiada szereg istotnych cech powodujących, że może on być bardzo przydatny w warunkach występujących w Polsce. Wysoki stopień bezpieczeństwa reaktora i wykluczenie możliwości wystąpienia awarii stopienia rdzenia umożliwia lokalizację reaktora w pobliżu aglomeracji miejskich i zapewnienia im zarówno energii elektrycznej jak i ciepła grzewczego. Ponadto, wysoka temperatura uzyskiwana w reaktorze czyni go przydatnym do wielu procesów przemysłowych oraz do produkcji wodoru. Rozwój bezpiecznego i wydajnego reaktora HTGR wymaga zaawansowanych analiz neutronowych i cieplno-przepływowych. Recenzowana praca jest elementem takiego rozwoju i dlatego należy uznać, że tematyka podjętych badań jest zasadna.

### **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa zawiera 80 stron i składa się ze Spisu treści, Spisu rysunków (30 pozycji), Spisu tablic (7 pozycji), Spisu symboli, Streszczenia w języku angielskim, Streszczenia w języku polskim, siedmiu rozdziałów oraz Wykazu literatury (50 pozycji).

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy, omawia główne cechy reaktora HTGR oraz przedstawia główny cel pracy polegający na wyznaczeniu rozkładu temperatury w rdzeniu reaktora przy zastosowaniu zintegrowanych obliczeń neutronowych oraz cieplno-przepływowych.

Rozdział 2 zawiera krótki opis historii rozwoju reaktora HTGR oraz omawia jego podstawowe cechy neutronowe i cieplno-przepływowe. W szczególności Autor omawia budowę paliwa TRISO (ang. *TRistructural ISOTropic*).

Rozdział 3 przedstawia schemat zintegrowanych obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych na przykładzie projektu PUMA.

Rozdział 4 zawiera wyniki zintegrowanych analiz neutronowych i cieplno-przepływowych dla

reaktora modelowego Go\_HTR uzyskanych przy użyciu programów obliczeniowych MCB i POKE.

Rozdział 5 poświęcony jest budowie modelu sprzężonej wymiany ciepła dla pręta paliwowego reaktora HTGR.

Rozdział 6 zawiera wyniki zintegrowanych obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych uzyskanych za pomocą programów komputerowych Serpent i OpenFOAM.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie pracy oraz wskazówki dotyczące kierunków dalszych badań.

### 3. Osiągnięcia

Autor przedstawił rozwiązanie postawionego problemu naukowego przy wykorzystaniu zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Otrzymane wyniki i ich dyskusja wskazują na kompetencje Autora w dziedzinie obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych dla reaktora HTGR. Do oryginalnych osiągnięć autora należy zaliczyć:

- Realizacja zintegrowanych obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych przy zastosowaniu programów Serpent i OpenFOAM.
- Propozycja wprowadzenia wielowarstwowych prętów kontrolnych do reaktora w celu spłaszczenia rozkładu gęstości mocy w rdzeniu.
- Próba określenia rozkładu temperatury w przecie paliwowym.

Należy podkreślić, że część wyników uzyskanych w niniejszej rozprawie została już opublikowana w czasopiśmie *MDPI energies* (<https://doi.org/10.3390/en14217377>).

### 4. Ogólna ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zintegrowanych obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych w reaktorze wysokotemperaturowym chłodzonym gazem HTGR. Istota takich obliczeń polega na tym, iż równanie opisujące transport neutronów w rdzeniu reaktora jest rozwiązywane jednocześnie z równaniem opisującym rozkład temperatury. Jest tak dlatego, gdyż rdzeń reaktora zawiera szereg materiałów o fizycznych właściwościach zmiennych z temperaturą. Dodatkowo, w reaktorze wysokotemperaturowym z paliwem TRISO, materiał paliwowy ma skomplikowaną strukturę kompozytową, co dodatkowo komplikuje obliczenia.

Integracja obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych w reaktorze może być dokonana na różnych poziomach aproksymacji, począwszy od najprostszych, opartych na metodach uśrednionych, zero- lub jedno-wymiarowych, a kończąc na metodzie Monte Carlo zastosowanej do obliczeń neutronowych połączonej z trójwymiarową symulacją przepływu chłodziwa i wymiany ciepła za pomocą CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Wybór odpowiedniej metody obliczeniowej zależy od obranego celu obliczeń oraz, w dużej mierze, od dostępnych mocy obliczeniowych. Jedną z ważniejszych kompetencji jaka jest pożądana w dziedzinie obliczeń reaktorowych to umiejętność dobrania odpowiedniego poziomu aproksymacji (i związanego z nim zestawu narzędzi obliczeniowych) do realizacji postawionego zadania.

Jednym z celów rozprawy jest analiza rozkładu mocy w rdzeniu reaktora wysokotemperaturowego Go\_HTR rozwijanego przez zespół Akademii Górniczo-Hutniczej. Ponieważ modelowany jest cały rdzeń reaktora, do obliczeń cieplno-przepływowych używany jest program systemowy POKE. Program ten umożliwia obliczanie przepływu chłodziwa i rozkładu temperatury w całym rdzeniu używając uproszczonych zero- i jedno-wymiarowych modeli. Obliczenia neutronowe przeprowadzane są za pomocą programu MCB opartego na metodzie Monte Carlo. Podejście to umożliwia numeryczne badanie wpływu głębokości wypalenia paliwa oraz położenia prętów

kontrolnych na przestrzenny rozkład mocy. Aby zmniejszyć niekorzystne zjawisko oscylacji ksenonowych, Autor wprowadza wielowarstwowe pręty kontrolne składające się z szeregu koncentrycznych cylindrów, które sukcesywnie mogą być usuwane z rdzenia. Przeprowadzone obliczenia pokazują, że przy zastosowaniu wielowarstwowych prętów kontrolnych możliwe jest uzyskanie bardziej spłaszczonego rozkładu mocy w rdzeniu niż przy użyciu prętów tradycyjnych. Jest to niewątpliwie ciekawa koncepcja warta głębszych analiz, chociaż przy jej realizacji można się spodziewać wielu komplikacji natury praktycznej.

Rozdział 5 poświęcony jest zagadnieniu sprzężonej wymiany ciepła (ang. *conjugate heat transfer*) w pręcie paliwowym HTGR. Ponieważ do obliczeń cieplno-przepływowych Autor używa programu CFD, obiektem obliczeń nie jest cały rdzeń lecz fragment jednego pręta paliwowego wraz z przynależnym kanałem chłodzącym i blokiem grafitowym. Niezbędne też okazały się być dodatkowe uproszczenia polegające na zaniedbaniu przepływów poprzecznych i by-pasowych chłodziwa oraz na pominięciu wpływu temperatury na własności fizyczne materiałów wchodzących w skład paliwa, moderatora i chłodziwa. Należy nadmienić, że rozważanie sprzężonej wymiany ciepła jest wtedy uzasadnione, gdy zachowanie się termicznej warstwy przyściennej w płynie ulega przestrzennym lub czasowym zaburzeniom, dającym się uchwycić za pomocą stosowanej metody numerycznej. W przeciwnym wypadku poprawne wyniki można uzyskać stosując znacznie prostsze obliczenia, oparte na równaniu Newtona dla konwekcyjnej wymiany ciepła.

Paliwo TRISO jest kompaktem składającym się z kulistych kapsułek paliwowych umieszczonych w matrycy grafitowej. Każda kapsułka zawiera w centralnej części tzw. rdzeń paliwowy, czyli materiał rozszczepieniowy w postaci kuli o średnicy około 0.5 mm, otoczonej czterema warstwami ochronnymi wykonanymi z różnych materiałów. Tak więc paliwo TRISO jest materiałem podwójnie-kompozytowym, gdyż kapsułki paliwowe posiadają wewnętrzną strukturę. Dodatkowo grafit, w którym kapsułki są rozmieszczone, jest materiałem anizotropowym pod względem przewodzenia ciepła. A zatem, zagadnienie przewodzenia ciepła w kompakcie TRISO nie jest trywialne i pozostaje nadal obiektem badań, zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych.

W podejściu zaprezentowanym przez Autora w Rozdziale 5 niezbędne jest wyznaczenie efektywnych własności materiałowych paliwa TRISO, gdyż rozdzielczość użytej siatki obliczeniowej jest zbyt mała aby móc uwzględnić wewnętrzną strukturę kapsułek paliwowych. Na stronie 53, Autor słusznie zauważa, iż "... *accurate representation of each material in the mesh would not only be a tremendous task but would also require enormous computational effort ...*" i proponuje następujące rozwiązanie "*Thermal conductivity and specific heat of the homogenized fuel material were calculated as the weighted average (...) where respective mass fraction were used as weights.*" Taka metoda wyznaczania efektywnej przewodności cieplnej jest jednak niepoprawna. Należało tu zastosować którąś z istniejących metod postępowania, na przykład metodę opartą na zredukowanym równaniu Maxwella (*reduced Maxwell's equation*), poprawną dla kompaktów o małym współczynniku upakowania, lub metodę Bruggemana, zalecaną dla kompaktów o wysokim współczynniku upakowania. Teoria przewodnictwa w paliwie TRISO ma bogatą literaturę i zalecane jest zapoznanie się Autora z takimi pozycjami jak np. *Experimental measurement and numerical modeling of the effective thermal conductivity of TRISO fuel compacts, C. Folsom et al., Journal of Nuclear Materials 458(2015)198-205.*

W Rozdziale 6 Autor przedstawia wyniki obliczeń promieniowego i osiowego rozkładu gęstości mocy i temperatury w pręcie paliwowym reaktora Go\_HTR uzyskane za pomocą zintegrowanych obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych. Do obliczeń neutronowych użyty został program Serpent 2, natomiast do obliczeń cieplno-przepływowych posłużył program OpenFOAM. Istotnym założeniem przyjętym w modelu jest uśrednianie gęstości mocy w 5 promieniowych i 20 osiowych

strefach w celu zmniejszenia niepewności wyznaczania rozkładu gęstości mocy. Niepewność ta wynosiła 95% gdy gęstość mocy była przypisywana indywidualnie do każdej celki obliczeniowej w programie OpenFOAM, jednak ulegała znacznemu obniżeniu przy zastosowaniu uśredniania po objętości paliwa w wyżej wymienionych strefach. Wynika to z zależności na niepewność średniej, która maleje odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z liczby próbek. Zatem wymagana jest pewna optymalizacja obliczeń i dobór odpowiedniej liczby stref z uśrednioną gęstością mocy aby uzyskać najmniejszą niepewność przy wymaganej dokładności określenia przestrzennego rozkładu mocy. Autor zauważa tę potrzebę i proponuje jako przyszły kierunek badań.

Uzyskane osiowe rozkłady temperatur na Rys. 29 i 30 wymagają wyjaśnień, których Autor nie podał. Należałoby się spodziewać, że temperatury w paliwie i koszulce, podobnie jak na Rys. 19, będą wzrastać wraz z odległością od wlotu do kanału chłodzącego. Tymczasem temperatury te wzrastają na krótkim odcinku w pobliżu wlotu do kanału chłodzącego, po czym stabilizują się na pewnym poziomie. Rozkład ten sugeruje, że tylko początkowy odcinek pręta paliwowego zawiera źródła ciepła, natomiast pozostała część nie jest grzana.

Podsumowując, rozprawa reprezentuje wysoki poziom i zawiera szereg elementów innowacyjnych. Szczególnie cenne wydaje się być zastosowanie zaawansowanych narzędzi, takich jak Serpent i OpenFOAM, do zintegrowanych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych. Niewątpliwie tego typu podejście ma ogromny potencjał w zastosowaniu do analiz i symulacji reaktorów HTGR. Aby ten potencjał wykorzystać, wymagany jest jednak znaczny nakład pracy teoretycznej oraz ogromny wysiłek obliczeniowy. Dlatego istotnym elementem kompetencji jaka jest pożądana w dziedzinie obliczeń reaktorowych, jak już o tym wspomniano, jest umiejętność dobrania odpowiedniego poziomu aproksymacji - i związanego z nim zestawu narzędzi obliczeniowych - do realizacji postawionego zadania. Autor niewątpliwie taką kompetencje znacznie rozwinął w trakcie realizacji obliczeń zawartych w rozprawie.

## 5. Uwagi szczegółowe i edytorskie

W tytule i treści rozprawy występuje akronim HTR który nie jest zamieszczony w Spisie akronimów.

Strona 11: w Spisie tablic, brak tablicy o numerze 1.

Strona 17, wiersz 7 od góry: jest "... can risk ..."; powinno być raczej "... can cause ...".

Strona 25, wiersz 12 od góry: jest "... 500-1000 m"; powinno być "... 500-1000  $\mu\text{m}$ ".

Strona 26, wiersz 14 od dołu: tu, oraz w wielu innych miejscach, niestaranny zapis związków chemicznych; jest "CO2", powinno być "CO<sub>2</sub>".

Strona 26, wiersz 10 od dołu: jest "... Peachbottom..."; powinno być "... Peach Bottom...".

Strona 30, podpis pod rysunkiem: tu, oraz w wielu innych miejscach, niejednolity zapis izotopów; jest U235, powinno być <sup>235</sup>U.

Strona 32, Rys. 4: zła jakość rysunku z nieczytelnym tekstem.

Strona 34, wiersz 1 od góry: jest "... was told earlier..."; powinno być "... was mentioned earlier...".

Strona 34, wiersz 11 od dołu: jest "... 100cm..."; powinno być "... 100 cm..."; również w wielu innych miejscach; spacja jest wymagana między wartością liczbową wielkości fizycznej a jej jednostką.

Strona 34, wiersz 3 od dołu: jest "...burned tan in..."; powinno być "...burned than in...".

Strona 38, wiersz 4 od góry: jest "...into just sections..."; powinno być "...into just two sections..."(?)

Strona 38, Tabela 2, wiersz 5 od góry: jest "Active ore height"; powinno być "Active core height".

Strony 39 i 40, równania (1) i (2): brak objaśnień użytych w równaniach oznaczeń.

Strona 44, wiersz 11 od dołu: jest "Figure ??"

Strona 46, w opisie Rys. 12 jest: "Figure 3. ...".

Strona 49 , wiersze 6-7 od dołu: jest "... the Navier-Stokes equations, which describe the conservation of mass, momentum, and energy."; równania Naviera-Stokesa dotyczą wyłącznie zachowania pędu w płynie.

Strony 52-4: brak podanych źródeł z których zaczerpnięto równania (3)-(12). Nieczytelny zapis w równaniach (5) i (11).

Strona 56, równanie (16): w mianowniku argumentu drugiego członu logarytmicznego powinien być promień zewnętrzny paliwa ( $\ln(r_{\text{gap}}/r_{\text{fuel}})$ ).

Strona 56, wiersz 10 od dołu: jest "...valudation..."; powinno być "...validation...".

Strona 56, wiersz 9 od dołu: jest "...power density in the fuel equal to 3 kW"; powinno być "...power density in the fuel equal to 3 kW/m<sup>3</sup>".

Strona 59, podpis pod Rys. 20: jest "Axial pressure profile"; powinno być "Radial temperature profile".

Strona 65, wiersz 10 od dołu: jest "...firing zone"; powinno być "...burnup zone".

Strona 66, wiersz 2 i 17 od dołu: niekonsekwentny zapis nazwy programu. Powinno wszędzie być OpenFOAM.

## 6. Uwagi krytyczne wymagające dalszych wyjaśnień

1. Na stronie 49 Autor stwierdza, że "*One advantage using CFD is that it is possible to obtain detailed local information on the simulated system.*" Nieco dalej, na stronie 56 Autor zauważa, iż "*... the limitation of the OpenFOAM is that it is for now impossible to set the dependence of thermal conductivity of the thermal resistance layer on temperature.*". Czy zatem OpenFOAM jest odpowiednim narzędziem do obliczeń które przeprowadził Autor?
2. Autor sugeruje, że na Rys. 18 przedstawiona jest walidacja obliczeń uzyskanych za pomocą programu OpenFOAM. Walidacja wyników obliczeń polega na ich porównaniu z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Tymczasem rysunek przedstawia porównanie wyników obliczeń otrzymanych analitycznie z wynikami uzyskanymi za pomocą programu OpenFOAM. Jest to więc weryfikacja a nie walidacja wyników obliczeń.
3. Jak już wspomniano wyżej, rozkład temperatur przedstawiony na rysunkach 29 i 30 sugeruje, że kanał paliwowy nie jest grzany na całej długości. Niezbędna jest tutaj interpretacja otrzymanych wyników.

## 7. Wnioski końcowe

Praca doktorska mgr Michała Górkiewicza potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie naukowej fizyka i prezentuje jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co jest podstawowym wymogiem uzyskania stopnia doktora zgodnie z zapisem Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce", Art. 187.

Biorąc powyższe pod uwagę, oraz ze względu na oryginalność i stopień złożoności podjętych badań, w tym poziom kompetencji potrzebnych do ich przeprowadzenia, wnioskuję do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych o dopuszczenie mgr Michała Górkiewicza do dalszego etapu postępowania doktorskiego.

