

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz, prof. zw. PG  
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny  
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej  
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej  
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12  
tel. +58 347 2254  
email: [Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl](mailto:Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl)

Gdańsk, 21 listopada 2020 r.

**R E C E N Z J A**  
**pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Dembkowskiej pt.**  
**"Analiza zagadnień ciepłno-przepływowych w kablach nadprzewodnikowych**  
**projektowanych dla reaktora DEMO"**

wykonana na podstawie zlecenia Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego z 21 października 2020 r., zgodnie z uchwałą Senatu z dnia 12 października 2020 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Monika Lewandowska, prof. ZUT.

**1. Przedmiot rozprawy**

Opiniowana praca pod tytułem „*Analiza zagadnień ciepłno-przepływowych w kablach nadprzewodnikowych projektowanych dla reaktora DEMO*” dotyczy analizy ciepłno – przepływowej projektów kabli nadprzewodnikowych proponowanych dla cewek reaktora EU-DEMO. Doktorantka przeprowadziła zarówno badania eksperymentalne weryfikacji dokładności niektórych korelacji używanych w prowadzonych analizach, jak również pokusiła się o przedstawienie metodyki przeprowadzania analiz ciepłno-przepływowych kabli nadprzewodnikowych, podstawowych założeń dotyczących modeli kabli nadprzewodnikowych niskotemperaturowych (LTS) oraz wysokotemperaturowych (HTS), a także warunków ich pracy w uzwojeniu TF oraz CS1 reaktora EU-DEMO. Do opisu matematycznego wykorzystwała obliczenia w procedurach kodu THEA. Do przedstawionej analizy wykorzystano własne badania eksperymentalne jak również obszerną wiedzę literaturową z zakresu matematyki, fizyki, mechaniki płynów oraz przepływów z konwekcją.

Praca składa się z dwóch części. W pierwszej Kandydatka wprowadza czytelnika w dotychczasowy stan wiedzy w zakresie reakcji syntezy jądrowej, przedstawia rozwój reaktorów fuzji jądrowej na przestrzeni ostatnich kilku dziesięciu lat oraz prezentuje koncepcję prototypowej elektrowni termojądrowej EU-DEMO. W drugiej części przedstawiono tezę, zakres i cel pracy oraz badania numeryczne i eksperymentalne, wyniki tych badań oraz podsumowanie i wnioski. Praca liczy łącznie 150 stron, z czego na część pierwszą, wprowadzającą do tematyki pracy, przypada 27 stron. Praca zawiera 8 rozdziałów, spis literatury oraz spis ilustracji. Literatura wykazana jest w łącznej liczbie 137 pozycji, z czego 10 prac jest współautorstwa Doktorantki.





We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki pracy. Autorka przedstawia reakcję syntezy jądrowej, omawia rozwój reaktorów fuzji jądrowej na przestrzeni ostatnich kilku dekad oraz prezentuje koncepcję prototypowej elektrowni termojądrowej EU-DEMO. Wykazuje w ten sposób, że jej badania przedstawione w pracy wpisują się w przełomowe badania prowadzone w międzynarodowym zespole, celem wykorzystania energii syntezy jądrowej.

W **rozdziale drugim** omawia zjawisko nadprzewodnictwa, a także na kablach LTS i HTS proponowanych do uzwojeń reaktorów fuzyjnych. W rozdziale tym zawarto również przegląd literatury dotyczący analiz cieplno-przepływowych projektów kabli nadprzewodnikowych dla reaktora EU-DEMO, omówiono cel przeprowadzania tego typu obliczeń dla uzwojeń elektromagnesów, a także wykazano braki w dostępności korelacji niezbędnych do opisu współczynników oporu hydraulicznego wybranych konstrukcji kabli nadprzewodnikowych oraz współczynników przejmowania ciepła w kablach CICC.

W **rozdziale trzecim** Doktorantka przedstawia cel i zakres pracy. Formułuje tezę badawczą.

**Rozdział czwarty** przedstawia koncepcje analizowanych w pracy kabli nadprzewodnikowych. Omówione są dwie koncepcje kabli. Jedną z nich to cewka nawijana krążkowo EPFL-SPC oraz cewka TF wytwarzająca pole o symetrii toroidalnej. Opisano podstawowe konstrukcje tych elementów oraz wymiary.

**Rozdział piąty** przedstawia rozważania związane modelem cieplno-przepływowym dla reaktora EU-DEMO. Przedstawiona jest metodyka przeprowadzania analiz cieplno-przepływowych w zakresie 1D kodu numerycznego THEA. W następnej kolejności opisany jest model kabla LTS i HTS w programie THEA oraz założenia modelu w zakresie parametrów roboczych kabla, zależności opisujących opór przepływu, współczynnik przejmowania ciepła, natężenie prądu w cewce, indukcję pola magnetycznego, obciążenia cieplne, i wybrane własności fizyczne materiałów. W dalszej części rozdziału przedstawiona jest weryfikacja obliczeń cieplno-przepływowych wykonanych dla kabli cewek TF oraz CS za pomocą kodu THEA z wykorzystaniem uproszczonego modelu hydraulicznego oraz modelu odprowadzania ciepła. Są to modele przedstawione w pracach promotorki Doktorantki.

**Rozdział szósty** to przedstawienie wyników analizy cieplno-przepływowej uzwojenia CS and TF reaktora DEMO. Przedstawione są wyniki obliczeń hydraulicznych, parametryczna symulacja zjawiska utraty stanu nadprzewodzenia w kablach HTS oraz wyniki obliczeń dla obu cewek.

**Rozdział siódmy** opisuje stanowisko badawcze, które zbudowano na potrzeby pracy oraz opis wyników dla wybranych zależności wykorzystywanych w analizach TH kabli nadprzewodnikowych.

**Rozdział ósmy** to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski.

## 2. Teza pracy

Doktorantka stawia tezę badawczą w postaci:

*Udoskonalanie modeli matematycznych stosowanych w analizach cieplno-przepływowych kabli nadprzewodnikowych, a także opracowanie spójnej metodyki prowadzenia tych analiz za pomocą kodu THEA, pozwala na bardziej rzetelną ocenę parametrów użytkowych kabli nadprzewodnikowych projektowanych dla reaktora EU-DEMO. Opracowanie nowych korelacji opisujących współczynniki oporu hydraulicznego dla prototypowych kabli HTS oraz kanału spiralnego wykorzystanego w prototypowym kablu zaprojektowanym dla cewki TF reaktora EU-DEMO, a także korelacji opisujących współczynnik wymiany ciepła w kablu CICC, pozwoli na bardziej rzetelną analizę zjawisk cieplno-przepływowych zachodzących w kablach nadprzewodnikowych projektowanych dla reaktora EU-DEMO.*



W ramach przeprowadzonych prac Doktorantka w pełni wykazuje prawdziwość tezy i w pełni dokumentuje ją badaniami i obliczeniami zamieszczonymi w pracy. Można mieć co prawda zastrzeżenia do stylu jej zapisu, gdyż słowo „rzetelna ocena” czy „rzetelna analiza” nie za bardzo mi pasuje do tego kontekstu. Można by na przykład wykorzystać tu słowo „bardziej dokładna”.

### **3. Oryginalność pracy**

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. specjalnie w tym celu zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe do badania oporów przepływu oraz współczynnika przejmowania ciepła dla różnych geometrii kabli,
2. opracowanie metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych,
3. przeprowadzenie systematycznych i precyzyjnych pomiarów oporów przepływu oraz współczynnika przejmowania ciepła dla różnych geometrii kabli dla cewek reaktora EU-DEMO,
4. opracowanie kompleksowej metodyki przeprowadzania analiz cieplno-przepływowych kabli nadprzewodnikowych LTS oraz HTS, a także warunków ich pracy w uzwojeniu TF oraz CS reaktora, uwzględniając zmienność natężenia prądu charakterystyczną dla danych warunków pracy cewki, realistyczny rozkład pola magnetycznego, jądrowe obciążenie cieplne (cewka TF) oraz obciążenia cieplne wynikające z przepływu prądu zmiennego przez uzwojenia(cewka CS).
5. opracowanie wyników badań eksperymentalnych za pomocą kodu obliczeniowego THEA.

### **4. Wartości użytkowe pracy**

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się podstawowym charakterem badań, niemniej uzyskane wyniki wyróżniają się bardzo dużym potencjałem praktycznym, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistych kabli nadprzewodnikowych, które są wykorzystywane w zaawansowanym stanowisku eksperymentalnym nadprzewodnikowych cewek EU-DEMO. Projektowanie tego typu elementów instalacji bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktorantkę jest obarczona dużymi niepewnościami i prowadzi do przewymiarowania lub niewłaściwej pracy urządzeń, w których są one wykorzystywane, a co za tym idzie niepotrzebnego zwiększania kosztów.

### **5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy**

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalna i wartościowa. Napisana jest nieco rozwlekle, ale bardzo dobrze zapoznaje czytelnika z informacjami koniecznymi do pełnego rozpoznania zagadnienia. Jest zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analizy cieplno-przepływowej kabli nadprzewodnikowych cewek CS (moduł CS1, projekt EPFL-SPC) oraz TF (projekt KIT), przeprowadzone za pomocą kodu THEA, są kompleksową metodyką przeprowadzania takich analiz kabli zaprojektowanych dla cewek reaktora EU-DEMO i stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem układów cieplno-przepływowych w instalacjach przemysłowych. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest bardzo pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowana metodologia analizy może znaleźć szerokie uznanie wśród innych badaczy tego zagadnienia, co należy uznać za zaletę pracy. Potwierdzone jest to także przez szereg opublikowanych prac, w których Doktorantka jest współautorką.



Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem, z wykorzystaniem właściwej terminologii, a jej lektura nie nastęcza większych trudności. Na uwagę zasługuje praktycznie idealna strona edytorska pracy, nieliczne są uchybienia językowe, a szata graficzna jest nienaganna.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem dotyczą przede wszystkim przygotowania i opracowania eksperymentu i są następujące:

1. We wzorze (5.4) zdefiniowano współczynnik tarcia, przywołując podręcznik z wymiany ciepła prof. Staniszewskiego (1979) i przytaczając definicję, która zarezerwowana jest dla definicji wg Moody'ego (Darcy'ego). W istocie, jak można się domyśleć z dalszej części pracy powinna to być definicja współczynnika Fanninga, o czym świadczy, że liczba 2 znajduje się w liczniku. Fakt ten trzeba zawsze zaznaczać w tekście, aby nie było nieporozumień. Z moich doświadczeń wynika, że z reguły symbol „f” jest zarezerwowany dla współczynnika Darcy'ego.
2. O ile wzór (5.7) pochodzi z pracy Shaha i Sekulica (2003), o tyle Autorka nie podaje z jakiego źródła literaturowego pochodzą zależności (5.8) i (5.9).
3. Analiza rys. 6.35 wykazuje, że wymiana ciepła między zwojami jest istotna. Czy są znane Doktorantce badania eksperymentalne potwierdzające ten fakt?
4. Doktorantka w pracy używa określenia „efektywny współczynnik przejmowania ciepła”, co zdefiniowała wzorem (7.32). Raczej szukałbym innego określenia dla tego terminu, gdyż efektywny raczej kojarzy się z faktem, że uwzględnione byłyby inne mechanizmy transportu ciepła, np. przez radiację, co w niniejszej pracy nie miało miejsca. Może lepiej byłoby nie wprowadzać w ogóle dodatkowego określenia dla tego współczynnika.
5. Str. 94<sub>9</sub> – jest: „Stanowisko zostało następnie rozbudowane .... co ...umożliwiło wykorzystanie go również do badań eksperymentalnych współczynnika przejmowania ciepła w kablach CICC”. Jakie elementy stanowiska umożliwiły ten fakt, jakie są konieczne wymagania do badań kabli CICC?
6. W badaniach eksperymentalnych wykorzystywano wodę demineralizowaną do badań. Czy jest to wystarczająca czystość chemiczna wody dla takiego eksperymentu?
7. W charakterystyce badań eksperymentalnych przedstawiono instrumenty pomiarowe, ich klasy dokładności, przedstawiono wyrażenia określające niepewności pomiarowe, ale nie pokazano bezwzględnych wartości tych błędów. Jaka była dokładność wyznaczenia współczynnika tarcia oraz współczynnika przejmowania ciepła?
8. Przyczyną pewnych rozbieżności w pomiarach hydraulicznych i wymiany ciepła w pęczkach kabli jest ich gęstość upakowania. W jaki sposób była ona brana pod uwagę w przedstawionych w pracy badaniach?
9. Z rys. 7.5 wynikają duże rozbieżności z badań THETIS i OTHELLO. Jakie są to różnice procentowe, szczególnie w obszarze wspólnym?
10. Str. 113<sup>7</sup> – jest: „Charakteryzują się stosunkowo dużą mocą grzewczą przy niewielkich rozmiarach”. Nie powinno się używać tak ogólnych i nieprecyzyjnych stwierdzeń. Raczej należałoby podać po prostu wartość gęstości strumienia ciepła,  $q[W/m^2]$ , która byłaby bardziej miarodajna.
11. We wzorach (7.21d), (7.23), (7.25), (7.26)-(7.28) mamy do czynienia ze strumieniem ciepła, czyli  $\dot{Q}$ .
12. Na rys. 7.17 widzimy rozkłady temperatury dla trzech różnych temperatur  $T_{in}$ . Dziwi fakt, że wyniki dla  $T_{in}=47^{\circ}C$  nie znajdują się pomiędzy dwoma pozostałymi, tj.  $T_{in}=30^{\circ}C$  oraz  $T_{in}=56^{\circ}C$ .

W pracy znajdują się nieliczne błędy edytorskie, które pokrótce wymieniam poniżej:



1. Str. 41<sub>7</sub> – jest: „nie co”; powinno być: „nieco”.
2. Str. 69<sup>5</sup> – jest: „zwalidowany”; nie powinno się używać żargonowych zwrotów w pracach kwalifikacyjnych.
3. Str. 116 – entalpię powinno oznaczać się symbolem „h”.

## 6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania zjawisk ciepłno-przepływowych w kablach nadprzewodnikowych. Dotyczy ona systematycznych badań zarówno numerycznych jak i laboratoryjnych. Interpretacja wyników jest przekonująca o wysokim poziomie kompetencji Doktorantki. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autorka przeprowadziła rzetelny przegląd literaturowy, analizę przeprowadzonych przez siebie badań eksperymentalnych i obliczenia za pomocą modelu THEA. Wykazała się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Ponadto wykazała się inwencją twórczą w prowadzeniu prac, jak też dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie.

**Podsumowując** stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Aleksandry Dembkowskiej do publicznej obrony.**

*Dariusz Anulowicz*

23.11.2020