

Dr hab. Marian CISZEK
Instytut Niskich Temperatur
i Badań Strukturalnych PAN
ul. Okólna 2, 50-422 Wrocław
tel: +48-663 219 780
e-mail: m.ciszek@intibs.pl

Wrocław, dnia 15. 08. 2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Valentiny VENTURI pt: „Thermodynamic and technological optimization of complex cryogenic insulation systems”

opracowana na podstawie pisma prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gnutka, Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, nr W9/PW/939/2019 z dnia 21. 06. 2019 r.

Praca doktorska mgr inż. Valentiny VENTURI została wykonana w Katedrze Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Macieja Chorowskiego. Zrealizowana została ona w ramach współpracy naukowej między Wydziałem Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej a Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN, mieszczącą się w Genewie, w Szwajcarii.

Uwagi wstępne

Kolejne akceleratory cząstek elementarnych dużej energii, jak np. obecnie wstępnie studiowany i projektowany w CERN tzw. Przyszły Zderzacz Kołowy (*ang.* Future Circular Collider, FCC) będą wymagały znacznie większych magnesów nadprzewodnikowych i w znacznie większej ich ilości. Dla porównania, projektowany akcelerator FCC ma mieć 100 km długości i energię cząstek 100 TeV, podczas gdy obecnie eksploatowany zderzacz LHC ma tylko 27 km długości a energia przyśpieszanych cząstek to 14 TeV. W projektowanym FCC zapewnione muszą być optymalnie chłodzone kriostaty utrzymujące odpowiednią temperaturę pracy magnesów nadprzewodnikowych, a co za tym idzie, zaprojektowana musi być odpowiednia infrastruktura całego kriogenicznego systemu chłodzenia. Efektywność izolacji termicznej tych kriostatów jest więc niezwykle ważnym parametrem technicznym decydującym o mocy chłodzenia całego systemu akceleratora w czasie bezpiecznej jego pracy

W technice kriogenicznej niezwykle ważnym parametrem jest wielkość mocy wymaganej do utrzymania danego urządzenia w odpowiednio niskiej temperaturze. Moc ta może być znacząco obniżona m.in. poprzez optymalizację izolacji termicznej pomiędzy otoczeniem a roboczym wnętrzem kriostatu. W kontekście wymaganej mocy chłodniczej, w pracy doktorskiej analizowany jest projektowany dla FCC kriostat do magnesu nadprzewodnikowego z wielowarstwową izolacją termiczną. Bardzo ogólnie, kriostat FCC zawiera w sobie wewnętrzny obszar tzw. „zimnej masy” (ang. „cold mass”), definiowany jako właściwy magnes nadprzewodnikowy z uzwojeniami i obudową, który pracuje w obszarze temperatur helowych, oraz ekranu termicznego i zewnętrznej obudowy próżniowej. Pokazano, że optymalizując odpowiednio temperaturę dodatkowego ekranu termicznego, można znacząco obniżyć moc wymaganą do utrzymania danego systemu kriogenicznego w żądanej temperaturze. Stosując równania opisujące równowagę energetyczną rozpatrywanego systemu jako funkcje mocy chłodzenia, oraz biorąc pod uwagę uzyskane dane eksperymentalne, znaleziono optymalną temperaturę takiego ekranu termicznego.

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest wybranym aspektom termicznego izolowania kriogenicznego nadprzewodnikowych magnesów w akceleratorach cząstek elementarnych dużej energii. Podjęta tematyka pracy jest nowatorska i odważna, szczególnie w aspekcie uzyskanych danych eksperymentalnych dotyczących minimalizacji obciążeń cieplnych danego kriostatu akceleratora. To z kolei wpływa na wielkość energii jaką trzeba dostarczyć, aby utrzymać dane urządzenie w bezpiecznych temperaturowych reżimach pracy. Zagadnienia poruszane w recenzowanej tu pracy doktorskiej są ważnymi przyczynkami do przyszłego sukcesu efektywnej i bezpiecznej pracy projektowanego obecnie w CERN przyszłego akceleratora kołowego (FCC) dużej energii.

Treść pracy doktorskiej

Rozprawa doktorska przedstawia sobą następujący zakres wykonanej pracy:

- krótkie wprowadzenie do podstaw systemu kriogenicznego akceleratora cząstek elementarnych na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC) pracującego obecnie w CERN.
- Zaprojektowanie i wykonanie próbek wielowarstwowej superizolacji o różnej ilości warstw ekranów z Mylaru®, i różnej gęstości ich upakowania.
- Wprowadzenie do głównych mechanizmów fizycznych przenoszenia ciepła w takich systemach superizolacji.

- Opis kriostatu do pomiarów gęstości strumienia ciepłego przez badane próbki superizolacji oraz właściwego układu pomiarowego.
- opracowanie modeli matematycznych pozwalających na wyznaczenie parametrów termodynamicznych badanych konfiguracji próbek superizolacji.
- weryfikacja doświadczalna założeń modeli teoretycznych.

Poruszone problemy, związane z wybranymi aspektami modelowania termicznych izolacji wielowarstwowych w systemach kriogenicznych akceleratora wysokiej energii oraz uzyskane dane eksperymentalne prowadzą, według Doktorantki, do sformułowania następującej głównej tezy zawartej w pracy:

- dodatkowy ekran termiczny, zabezpieczający centralny obszar kriostatu akceleratora, zawierający główny magnes nadprzewodnikowy (obszar tzw. „zimnej masy”), utrzymywany w temperaturze ok. 50 K, jest bardziej efektywnym rozwiązaniem jeśli chodzi o zużycie mocy chłodniczej wymaganej do utrzymania całego urządzenia w warunkach pracy, w porównaniu do konfiguracji układu, gdy ekran ten znajduje się temperaturach wyższych bądź niższych.

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim, jest stosunkowo obszerna, liczy 103 strony, wydrukowana w formacie A4 i składa się ze wstępu, przeglądu publikacji dotyczących tematu, oraz czterech głównych rozdziałów. Umieszczona na końcu dysertacji bibliografia dotycząca tematu badań obejmuje 43 pozycje literaturowe, w tym jedna publikacja, której Doktorantka jest współautorką. Tekst pracy uzupełniony jest 85 rysunkami i wykresami oraz 3 tabelami, prezentującymi najważniejsze uzyskane wyniki podjętych badań naukowych. Całość pracy doktorskiej zwieńczona jest konkluzjami wypływającymi z przeprowadzanych tu badań naukowych, oraz wniosków jakie z nich wynikają dla dalszych prac dotyczących optymalizacji energetycznej istotnych dla systemów akceleratorów wysokiej energii.

Rozdział 1 jest krótkim wprowadzeniem do zagadnień z zakresu podstaw technik i technologii kriogenicznych stosowanych w akceleratorach wysokiej energii, w szczególności akceleratora LHC pracującego w CERN. Przedstawiono tu też główne założenia koncepcyjne planowanego przyszłego akceleratora kołowego (*ang.* Future Circular Collider, FCC) o znacznie większej mocy niż ma obecnie eksploatowany akcelerator LHC. Aby system kriogeniczny podtrzymywał nadprzewodnictwo w elektromagnesach akcelerator FCC będzie potrzebował znacznie więcej mocy chłodniczej niż ma to miejsce obecnie dla urządzenia LHC. W drugiej części rozdziału przedstawiono ogólnie rodzaje izolacji termicznej w kriostatatach akceleratora, w

tym najbardziej wydajnej izolacji wielowarstwowej na bazie foli Mylaru® (tzw. superizolacji). Przedstawiono tu też główne mechanizmy fizyczne transportu energii cieplnej tj. przewodnictwa cieplnego przez ciało stałe, przez promieniowanie oraz poprzez cząsteczki gazu resztkowego obecnego w stosowanych superizolacjach. Podano tu również dane literaturowe dotyczące dotychczasowych badań tych izolacji oraz wpływu niektórych parametrów materiałowych na efektywność ekranowania termicznego, takich jak ilość warstw Mylaru®, gęstości badanych superizolacji, poziomu gazu resztkowego (próżni), itp.

W rozdziale 2 Doktorantka krótko przedstawia główne tezy i zakres tematyki swojej pracy dyplomowej. Główne cele to przebadanie eksperymentalne wykonanych przez siebie pewnych próbek superizolacji wielowarstwowej pod względem ich efektywności ekranowania termicznego centralnych obszarów kriostatu akceleratora o temperaturze ciekłego helu (4.2 K). Ponadto, określono optymalną temperaturę dodatkowego, metalowego ekranu termicznego, w celu zminimalizowania wymaganej mocy chłodniczej do zapewnienia efektywnej i bezpiecznej pracy akceleratora.

Rozdział 3 pracy poświęcony jest właściwej części eksperymentalnej, zawiera dokładne opisy próbek badanych superizolacji, ich wykonania, określenie ich materiałowych parametrów eksploatacyjnych, itp. Przedstawiono tu dość dokładny opis kriostatu pomiarowego, wcześniej zaprojektowanego i wykonanego na Politechnice Wrocławskiej. Został on zmodyfikowany i dostosowany do programu badawczego uruchomionego w CERN a dotyczącego termicznych izolacji wielowarstwowych dla kriogeniki akceleratorów. Główna zmiana w kriostacie to wprowadzenie dodatkowego metalowego (tu aluminium) ekranu termicznego, o regulowanej temperaturze, który pozwalał na pomiar strumienia ciepła poprzez badane superizolacje-z obszaru o wyższej temperaturze do centralnego obszaru o temperaturze ciekłego helu. Układ próżniowy, pompy, mikro-dozowniki gazowego helu, głowice pomiarowe, itp. pozwalał na regulację próżni w obszarze superizolacji; tym samym można było określić wpływ ciśnienia gazu resztkowego (tu helu) na strumień ciepła płynący przez badaną superizolację. Precyzyjny system czujników temperatury i grzejników, wraz z miernikiem przepływającego gazu, oraz układem akwizycji danych, pozwalał na pomiary ze stosunkowo małym błędem. Dokładnemu skalibrowaniu całego układu pomiarowego poświęcono tu wiele pracy, gdyż pomiary kalorymetryczne są, w swojej naturze, bardzo czasochłonne, uciążliwe i obciążone stosunkowo wysokim poziomem niepewności.

W rozdziale 4, zatytułowanym „Experimental results”, zawarte są najważniejsze wyniki badań Doktorantki, wraz z interpretacją i opisem matematycznym, a dotyczące jakości izolacji termicznej badanych próbek. W części początkowej tego rozdziału przedstawiono wyniki

dotyczące pomiarów przepływu strumienia ciepła od ekranu termicznego do obszaru zawierającego ciekły hel („*test vessel*”), dla różnych przypadków. I tak, np. bez badanej próbki superizolacji („*bare test vessel*”), zmieniano ciśnienie gazu resztkowego, od niskiego ciśnienia (7×10^{-7} mbara) do ciśnień wyższych (1×10^{-4} mbara). Podobnie, testowe pomiary wykonano z użyciem pojedynczej folii Mylaru®, zmieniając temperaturę ekranu termicznego oraz wartości próżni w układzie. Następne opisane tu pomiary dotyczą właściwych próbek superizolacji wykonanych przez Doktorantkę, tj. zawierających 10 warstw Mylaru® z przekładkami (próbka o niskiej gęstości upakowania, 10 warstw/cm grubości pakietu) jak i próbek o wyższej gęstości upakowania warstw (50 warstw/cm). Wyniki pomiarów strumienia ciepła przez superizolację, w funkcji temperatury ekranu termicznego i ciśnienia gazu resztkowego, dla różnych badanych próbek podane są na kolejnych wykresach. Uzyskane tu dane eksperymentalne zostały opisane modelami matematycznymi z uwzględnieniem głównych mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za transport energii cieplnej, tj. przewodnictwo cieplne ciała stałego, promieniowanie oraz przenoszenia ciepła przez gaz resztkowy. Uzyskano tu dostatecznie dobrą zgodność dla niektórych przypadków.

W końcowym rozdziale 5 przedstawiono krótko projekt kriostatu dla przyszłego akceleratora FCC wraz z analizą dotyczącą mocy chłodniczej wymaganej dla poprawnej pracy urządzenia. Znalaziono optymalną temperaturę ekranu termicznego, która ma zapewnić wymaganą, minimalną moc dostarczaną do systemu chłodzenia akceleratora.

Uwagi krytyczne

Praca doktorska napisana jest w języku angielskim, generalnie dostatecznie zrozumiałym. Pod względem edytorskim opracowana jest niezbyt przejrzyście, jest w swojej treści miejscami chaotyczna, co nie ułatwia jej lektury. Spotyka się w tekście pracy wiele niezgrabności stylistycznych, także gramatycznych. Wielka szkoda, że Doktorantka nie zadbała o profesjonalną korektę edytorską i językową swojej pracy. Pragnę zwrócić uwagę także na inne pewne niedociągnięcia i niestaranności widoczne w pracy: Oto wykaz tylko niektórych z nich:

- Zawarty w pracy spis cytowanej literatury („References”) przedstawiony jest w sposób niepoprawny, niedbały i chaotyczny; brak jakiegokolwiek jednolitego stylu cytowanych pozycji literaturowych. Jest tu zmieniana kolejność autorów, brak numerów tomu czasopisma, roku wydania, stron, brak tytułów czasopism, gdzie szukana praca ma się znajdować, zupełny brak korelacji z kolejnością, w jakiej pojawiają się odnośniki w tekście rozprawy. Taki bałagan nie ułatwia czytelnikowi śledzenia cytowanej literatury. Ponadto, zabrakło tu także publikacji, w której Doktorantka jest współautorką, a związanej

tematycznie właśnie z badaniami właściwości termoizolacyjnych superizolacji (*V. Venturi et al., IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 502 (2019) 012077*). Dlaczego?

- na str. 17 i str. 97, odpowiednio rysunki 8 i 84, odnoszą się do tego samego projektu kriostatu FCC?. Widoczne są pewne różnice, nie wiadomo więc dokładnie, który z nich jest kriostatem omawianym w pracy.
- Brak staranności w prezentowanych wzorach i ich opisach, np. wzór 1.3.5.; według opisu lewa strona to „power” a prawa strona równania to „heat”, a przecież to dwie różne wielkości fizyczne. Używanie takiego żargonu nie jest wskazane w drukowanych pracach naukowych.
- Str. 22: użyto liter n i N dla opisu tej samej wielkości, powinien być tylko jeden symbol przypisany do danej wielkości fizycznej.
- Str. 23; w równaniu 1.4.1 (niezupełnie poprawnym) jednostka po lewej stronie nie jest tożsama z jednostką po stronie prawej. Podobnie jest w równaniach 1.4.4 i 1.4.5 (są podane niepoprawnie).
- na str. 24, w równaniu 1.4.2 parametr λ opisuje inną wielkość fizyczną (długość fali) niż ten sam symbol pojawiający się w równaniu 1.4.6 (długość średniej drogi swobodnej, str. 26). Ponadto w równaniach 1.4.6 i 1.4.7 dla oznaczenia ciśnienia użyto dwóch różnych liter, p i P . Przez całą pracę przewijają się jednostki ciśnienia jako paskal i mbar; jednostki powinny być ujednolicone dla łatwiejszego porównania danych liczbowych tych wielkości.
- str. 24; wartość stałej Stefana-Boltzmanna jest podana błędnie, powinno być $5.67 \cdot 10^{-8}$.
- Str. 26; zwykle stała Boltzmanna opisujemy symbolem k_B .
- str.27; w równaniu 1.4.11 użyto symbolu k (przewodnictwo cieplne) który koliduje z tym samym oznaczeniem użytym w równaniu 1.4.6 (stała Boltzmanna).
- rysunki 16-20 zawierają referencje, które nie istnieją w spisie literatury. W niektórych z tych referencji istniejących zmieniano kolejność autorów.
- str. 33; ” *to complete the refrigeration power equation (5.2)* ”, nie można odszukać w tekście równania o tym numerze.
- str. 34; rys. 22; brak wartości liczbowych na osiach załączonego wykresu.
- Str. 46; kolejny konflikt oznaczeń: we wzorze 1.4.6 oznaczenie d jest tu dla średnicy cząsteczki gazu, natomiast na rys. 30 sama litera oznacza grubość warstwy superizolacji.
- str. 57; błędna wartość mocy podanej w podpisie rys. 44.
- str. 63; legenda na rys. 50 odnosi się do danych eksperymentalnych czy teoretycznych, jak jest tam napisane. Ta sama uwaga odnosi się do rys. 53 (str. 66).

- str. 76; opis w rys. 63 jest niezupełnie poprawny: tytuł rysunku „*Mean free path vs distance between walls*” koliduje z tym co widać na wykresie, tj. zależności średniej drogi swobodnej (tu „*length [m]*”) od ciśnienia resztkowego gazu.
- str. 77; referencje literaturowe podane w tabeli 3 (NIST, Dupont, itp.) są niepełne, nie mają swoich odpowiedników w spisie cytowanej literatury.
- Treść podrozdziału 5.3 jest prawie identyczna z treścią zawartą we wcześniejszym podrozdziale 1.3.

Bardzo często występują w pracy błędy maszynowe, tzw. „literówki”, których wszystkich nie sposób tu wymieniać.

Podczas studiowania recenzowanej rozprawy doktorskiej nasunęły się pewne uwagi krytyczne i wątpliwości, z których najważniejsze wymienione są poniżej:

- Czy człony opisujące przewodzenie ciepła w superizolacji przez molekuly gazu resztkowego w równaniach 1.4.7, 4.6.1 oraz 4.6.2 są ze sobą tożsame? Jaka jest różnica pomiędzy \dot{q} (równanie 1.4.7) a q_{12} (równania 4.6.1 i 4.6.2). W jednym z równań symbol R opisany jest jako uniwersalna stała gazowa a w innym równaniu (4.6.1 i 4.6.2) litera R jest podana jako stała Boltzmanna (konflikt z wcześniejszym opisaniem stałej gazowej). Czy wymiar wyrażenia pod pierwiastkiem jest taki sam dla obu wymienionych wyżej równań?
- Czy wiadomo dla jakich ciśnień parcjalnych przewodnictwo cieplne przez gaz resztkowy zależy już tylko od temperatury, a nie zależy od ciśnienia tego gazu?
- Czy rozmiar metalowego ekranu termicznego ATS (średnica czy grubość ścianki) wpływa w sposób istotny na proces chłodzenia tzw. „zimnej masy” w rozpatrywanym kriostacie?
- Czym można wytłumaczyć nagły skok strumienia ciepła przewodzonego przez pojedynczą folię Mylaru® jak to zmierzono, rys. 51, w temperaturze powyżej 50 K?
- Otrzymane wyniki (numeryczne) dotyczące temperatur poszczególnych warstw Mylaru® w badanych próbkach superizolacji przedstawione są na rys. 69, 70, 71 (str. 82-84), tj. wykresy „*Layer Temperature*” versus „*iteration*”. Jakie są podstawy matematyczne aby wartości „*iteration*” na osi odciętych przekształcić do jednostek czasu?

Wniosek końcowy

Wyniki prac eksperymentalnych prowadzonych przez Doktorantkę są ciekawe i obiecujące, pozwalające na ulepszenie parametrów termicznych stosowanych w kriogenice superizolacji. Zawarte w pracy wyniki eksperymentalne dotyczące przenikania ciepła przez izolacje wielowarstwowe mogą posłużyć projektantom instalacji kriogenicznych w akceleratorach do optymalizacji mocy chłodniczych potrzebnych do utrzymania danego urządzenia w swoich

reżimach efektywnej i bezpiecznej pracy. Opracowano interesującą i nowatorską metodę pomiarów przewodnictwa cieplnego izolacji stosowanej w magnesach nadprzewodnikowych akceleratorów. Zaproponowano modele matematyczne opisujące rezultaty prac eksperymentalnych. Uzyskane dane eksperymentalne posłużyły do oszacowania minimalnej mocy chłodzenia dla projektowanego akceleratora. Doktorantka wykazała się dużą samodzielnością w prowadzeniu eksperymentalnych badań naukowych tu prezentowanych.

Podsumowując uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. Valentiny Venturi spełnia ustawowe, jak i merytoryczne, wymagania stawiane pracom doktorskim (ustawa z dnia 14.03.2003, Dz. U. Nr 65/03 poz. 595, z późniejszymi zmianami Dz. U. Nr 15.04, poz. 128) i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. Marian CISZEK
