

Dr hab. Wojciech Kempiński, prof. inst.
Zakład Fizyki Niskich Temperatur,
Instytut Fizyki Molekularnej PAN
ul. M. Smoluchowskiego 17
60-179 Poznań

Poznań 07.09.2019

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Valentiny Venturi

zatytułowanej:

***„Thermodynamic and technological optimization of complex
cryogenic insulation systems”***

Europejska Organizacja Badań Jądrowych CERN w swoich planach przewiduje budowę następcy Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC – Large Hadron Collider), którego wstępne opracowania zostały ostatnio opublikowane pod roboczą nazwą Future Circular Collider (FCC). Celem projektu jest osiągnięcia energii zderzenia na poziomie 100 TeV. W ten olbrzymi projekt zaangażowanych jest około 150. instytutów badawczych i partnerów przemysłowych z całego świata. W obrębie projektu konieczne jest opracowanie nowych rozwiązań w wielu obszarach technologicznych, w tym również w obszarze kriogeniki.

Aktualność rozwiązywanych problemów to jedno z podstawowych kryteriów pozytywnej oceny każdej pracy doktorskiej. Cecha ta w przypadku omawianej dysertacji ma szczególne znaczenie, bowiem zagadnienia w niej poruszane mogą mieć zastosowanie zarówno w dzisiejszych, laboratoryjnych konstrukcjach kriogenicznych, jak i w przyszłych wielkoskalowych rozwiązaniach, takich właśnie jak Future Circular

Collider, któremu praca ta jest dedykowana. Wybór tematyki to niewątpliwie również zasługa promotora pracy prof. Macieja Chorowskiego, wieloletniego współpracownika grup działających w obszarach wysokich technologii, realizowanych w takich ośrodkach jak CERN, gdzie prowadzone były badania prezentowane w tym opracowaniu.

Praca doktorska mgr inż. Valentiny Venturi zredagowana została w języku angielskim. Składa się z sześciu podstawowych rozdziałów umieszczonych w *Spisie treści*. Poza spisem znajdują się *Streszczenie*, przedstawione również w języku polskim, *Spis rysunków* (85 pozycji) i *Tabel* (3 pozycje), oraz *Literatura* (43 pozycje) zamykająca dysertację.

Rozdział pierwszy to obszerne wprowadzenie zawierające ogólne omówienie założeń konstrukcyjnych FCC w odniesieniu do istniejących rozwiązań dla LHC. Autorka skupia się głównie na przedstawieniu krótkiej historii nadprzewodnictwa oraz rozwiązaniach dotyczących budowy i rozmieszczenia magnesów nadprzewodnikowych w konstrukcjach LHC i FCC. Jest to poprawnie ujęta część pracy, jako że kriogeniczne rozwiązania, którymi zajmuje się Doktorantka, związane są z koniecznością utrzymywania w omawianych konstrukcjach niezwykle rozbudowanego systemu magnesów nadprzewodnikowych, w temperaturach z obszaru kriogeniki, na poziomi 1.9 K. Zagadnienia te omówiono w podrozdziałach 1.1 oraz 1.2. Podrozdział 1.3 Autorka poświęciła przedstawieniu motywacji podjęcia się prezentowanych badań. Cel pracy Doktorantka określiła jako chęć, a może nawet konieczność, zrozumienia w jaki sposób można ulepszyć system izolacji termicznej w wielkoskalowych konstrukcjach, w celu zmniejszenia transferu ciepła z otoczenia do części tych układów pracujących w obszarach kriogenicznych. W podrozdziale tym Autorka przedstawia również schemat układu modelowego, który posłużył jej do zaprezentowania zestawu wzorów do obliczenia całkowitej mocy chłodniczej niezbędnej do utrzymania izolowanego układu w stanie ustalonym. Z przyczyn nieznanymi recenzentowi wszystkie zaprezentowane tu wzory, od 1.3.1 do 1.3.5, powtórzone zostały w rozdziale piątym z nową numeracją od 5.3.1 do 5.3.5. W obu przypadkach wzory te zaprezentowano bez umocowania literaturowego. Sposób zaprezentowania i odwoływania się do pozycji literaturowych w

tej pracy jest jednym z poważniejszych problemów, do którego odniosę się w dalszej części mojej oceny.

W rozdziale pierwszym, podrozdział 1.4, Autorka omówiła jeszcze wielowarstwowe układy izolujące, które były w bezpośrednim kręgu jej zainteresowań i prowadzonych przez nią badań. Znajdują się tutaj takie zagadnienia jak budowa wielowarstwowych układów izolujących termicznie (w pracy określanych jako MLI – Multilayer Insulation Systems) o zróżnicowanym upakowaniu, transfer ciepła w tych układach z uwzględnieniem również przekładek dystansowych oraz transfer ciepła związany z promieniowaniem jak i konwekcją cząsteczek, które w obszarze próżniowym mogą pojawiać się w wyniku nieszczelności układu. Zagadnienie to dotyczy głównie silnie penetrujących wszelkie nieszczelności atomów helu.

Rozdział pierwszy kończy podrozdział 1.5, w którym Doktorantka dokonała przeglądu literatury na temat wielowarstwowych izolacji termicznych. Przedstawiła tu wyniki badań tego typu izolacji o różnej ilości warstw i gęstości ich upakowania oraz badań dotyczących różnego stopnia zagazowania przestrzeni próżniowej, w której warstwy te są umieszczane.

Rozdział drugi dysertacji to krótkie, półtorastronicowe przedstawienie zakresu pracy oraz zdefiniowanie jej podstawowej tezy. Tekst wzbogacono o schematyczny rysunek wspomagający, na którym jednoznacznie określono jakim obszarem układu FCC będzie zajmowała się Doktorantka. Częścią tego rysunku jest wzór 1.3.5 (lub 5.3.5 – patrz komentarz do podrozdziału 1.3), jednak pojawiający się tutaj ponownie bez żadnego odnośnika, w dodatku w nieco zmienionej formie – patrz oznaczenie η .

Postawiona teza brzmi następująco: utrzymywanie ekranu termicznego osłaniającego kriogeniczne części akceleratora cząstek w temperaturze około 50 K jest bardziej efektywne energetycznie w porównaniu do sytuacji, w której temperatura tego ekranu jest wyższa lub niższa. Nie zdefiniowano jednak jak duże odstępstwa od wyznaczonej wartości 50 K, są dopuszczalne.

Rozdział trzeci poświęcono metodom badawczym. Zawarto w nim omówienie zakresu temperatur, w którym prowadzono testy, opis typów osłony komory termostatowanej z uwzględnieniem jej temperatury (77 K lub 4.2 K) oraz sposobu i

stopnia degradacji próżni utrzymywanej w obszarze izolacji termicznej. Warunki eksperymentu zebrano w Tabeli 2. Oprócz wielowarstwowej izolacji termicznej testowanej w dwóch konfiguracjach, 10 i 50 warstw/cm, badaniu poddano również komorę nieosłoniętą o temperaturze ciekłego azotu 77 K oraz ciekłego helu 4.2 K. Jako osłony termicznej użyto również pojedynczej warstwy folii aluminiowej. Zakres ciśnień w przestrzeni próżniowej, dla różnych konfiguracji izolacji, ustalono pomiędzy 2×10^{-7} mbar i 1×10^{-3} mbar.

W omawianym rozdziale przedstawiono również ogólną budowę kriostatu jako całości, oraz poszczególnych jego części, wraz z rozmieszczeniem termometrów oraz miejscem posadowienia grzałki – rys. 27. Omówiony został również sposób zagazowywania przestrzeni próżniowej – rys. 28. Wyniki zbierano i analizowano z użyciem programu LabView. Próżniowo-szczelne podłączenie czujników układu pomiarowego zapewniał 24-pinowy, hermetyczny przepust elektryczny typu Fischer Connectors.

Przygotowaniu wielowarstwowej osłony termicznej poświęcono szczególną uwagę, co przedstawiono w podrozdziale 3.6. Testy układu zaprezentowano w podrozdziałach od 3.7 do 3.10. Na poszczególnych poziomach testów wprowadzano odpowiednie ulepszenia, takie jak np. radiatory na mirnikach poziomu helu, przekładki na linii zasilania helem przeciwdziałające termo-akustycznym oscylacjom, czy pokrycie czarnym lakierem wewnętrznej części aluminiowego ekranu termicznego w celu zwiększenia dokładności pomiarów.

Rozdział czwarty poświęcony jest prezentacji i omówieniu wyników badań. Zawiera on sześć podrozdziałów. W czterech pierwszych zaprezentowano wyniki badań dla czterech konfiguracji układu: komory bez osłony termicznej, komory osłoniętej pojedynczą warstwą aluminiową, komory osłoniętej wielowarstwową izolacją o niskiej gęstości warstw (10 warstw/cm) oraz komory osłoniętej wielowarstwową izolacją o wysokiej gęstości warstw (50 warstw/cm). Dla wszystkich konfiguracji układu przeprowadzono badania dla przypadku wysokiej próżni utrzymywanej w przestrzeni osłony termicznej (poziom 10^{-7} mbar) oraz próżni degradowanej w kilku przypadkach nawet o cztery rzędy wielkości, do poziomu 10^{-3} mbar. Zestawienie wyników przedstawiono w podrozdziale 4.5 gdzie na rysunkach od 58 do 62 można porównać zachowanie się układu dla poszczególnych przypadków. Z przedstawionych tu wykresów

wynika dosyć jednoznacznie, że dla wysokiego poziomu próżni najlepsze osłony termiczne to pojedyncza warstwa aluminiowa oraz wielowarstwowa izolacja o małej gęstości, przy czym strumień ciepła dla wielowarstwowej izolacji o małej gęstości do poziomu temperatur około 50 K jest o rząd wielkości mniejszy niż dla przypadku pojedynczej warstwy aluminiowej. Wyniki badań pokazują również, że zwiększanie gęstości upakowania warstw izolacji wielowarstwowej to zły kierunek dla uzyskania lepszej izolacji termicznej. Autorka zauważa ten fakt na str. 71 stwierdzając, że gęstość upakowania warstw izolacji wielowarstwowej odgrywa kluczową rolę w wyborze sposobu izolowania termicznego na poziomie niskich temperatur. Sytuacja ulega jednak zmianie gdy mamy do czynienia z układem, w którym występują nieszczelności i próżnia może być utrzymywana na poziomie np. tylko 10^{-5} mbar (rys. 59). Widzimy, że parametry dla wszystkich przypadków pogarszają się znacząco, a pojedyncza warstwa aluminiowa posiada w tym przypadku gorsze parametry niż wielowarstwowa izolacja o wysokiej gęstości upakowania. Wydaje się, że wynika to z faktu, że część molekuł biorących udział w konwekcyjnym przekazie ciepła może być zaadsorbowana w wielowarstwowej przestrzeni. Zależność tę obserwuje się również na poziomie ciśnienia 1×10^{-4} mbar oraz 2×10^{-4} mbar, przy czym transfer ciepła dla izolacji wielowarstwowej o dużej gęstości upakowania warstw, w tych przypadkach zaczyna zbliżać się do obserwowanego dla izolacji wielowarstwowej o małej gęstości upakowania. Poziom próżni 10^{-3} mbar (rys. 62) już znacznie pogarsza warunki izolacji termicznej i zrównuje parametry wielowarstw o małej i dużej gęstości upakowania. Przytoczony wyżej wniosek Doktorantki ze str. 71 powinien być więc ograniczony do przypadku szczelnego układu i wysokiego poziomu próżni. W prezentowanych wynikach niezrozumiałe jest dlaczego na dwóch rysunkach (50, 53) ciśnienie oznaczono jako "teoretyczne"?

W podrozdziale 4.6 przedstawiono matematyczne modelownie procesów transferu ciepła dla kilku wybranych przypadków MLI – takie stwierdzenie zawiera tytuł podrozdziału. Jednak pierwszy z rozpatrywanych przypadków dotyczy komory bez jakiegokolwiek izolacji termicznej i jest to jedyny przypadek gdzie modelownie zbliżone jest do doświadczenia – rysunki 65 i 66. Pozostałe wyniki zaprezentowane w tym podrozdziale są podane w formie najmniej przystępnej z punktu widzenia odbiorcy. Ponownie nie podano źródeł wzorów, z których korzysta Autorka. Rozbieżności pomiędzy wynikami

obliczeń a doświadczeniem są w niektórych przypadkach tak znaczące – np. rysunki od 73 do 79, że trudno w ogóle dyskutować w tych przypadkach słuszność założeń modelowych. Zwłaszcza, że prawie we wszystkich wyżej wskazanych przypadkach nawet tendencja zmian uzyskanych z obliczeń silnie odbiega od doświadczenia. Autorka, niestety tych niezgodności w ogóle nie komentuje... Również analizowany przypadek z dopasowaniem wyników dla różnych wartości korygowanych ciśnień (przypadek 2 – rysunki 67 i 68) w pierwszym czytaniu jest nie do zaakceptowania, ponieważ Autorka pod rysunkami umieszcza te same opisy, z czego wynika, że na rys. 67 ciśnienia również są skorygowane. Dodatkowo w opisie punktów i linii na rysunku pojawiają się oznaczenia "Theoretical". Pytaniem otwartym pozostaje – jak korygowano ciśnienia? Z kolei, chyba jedyne rzeczywiście dobre dopasowanie widoczne na rysunku 82, to wynik uzyskany z użyciem wielomianu – wzór 4.6.3. Jego forma jest jednak ponownie niedoprecyzowana. Pytania jakie pojawiają się w tym miejscu to: jaki związek ma wzór 4.6.3 ze wzorem 1.4.1 – to samo oznaczenie strumienia cieplnego? Co oznacza symbol E i jaką przyjmuje wartość? Jakie, i czy w ogóle, fizyczne znaczenie mają współczynniki wielomianu?

Rozdział piąty poświęcony został matematycznemu modelowi doboru temperatury osłony termicznej możliwej do zastosowania w FCC tak aby niezbędna moc chłodnicza była najniższa. Wykorzystując wzór 5.3.5 (lub 1.3.5) Autorka pokazała, że dla osłanianej zimnej masy o temperaturze 1.8 K najniższą moc chłodniczą uzyskuje się dla temperatury osłony termicznej równej 53 K wykonanej z wielowarstwowej izolacji termicznej o gęstości 10 warstw/cm. Przedstawiono to na rysunku 85, który jest podsumowaniem rezultatów pracy, potwierdzającym jej tezę.

Wynik zaprezentowany w rozdziale piątym wyeksponowano we wnioskach zawartych w rozdziale szóstym, zamykającym pracę. Zamieszczono tu również ważną uwagę wskazującą na fakt, że utrzymywanie osłony termicznej w standardowo ustalonej temperaturze uzyskiwanej przy użyciu ciekłego azotu (77 K) podwaja moc chłodniczą. Uzyskany końcowy wynik pracy to ważny wynik, zwłaszcza gdy patrzymy na niego z punktu widzenia wielkoskalowych konstrukcji wykorzystujących rozwiązania z obszaru kriogeniki. Zmusza on do zastanowienia się nad wyborem jednego z dwóch

podstawowych mediów chłodzących wykorzystywanych w tym obszarze – drogiego ciekłego helu i stosunkowo taniego ciekłego azotu – być może w różnych wersjach temperaturowych.

Mimo niezaprzeczalnych zalet, omawiana praca w wielu punktach zmusza czytelnika do dużego wysiłku niezbędnego do uporządkowania swoistego chaosu informacyjnego obecnego w tym opracowaniu. Zaczyna się on w momencie gdy czytelnik próbuje skorzystać z informacji zawartych w literaturze. W spisie pozycji literaturowych tylko niektóre pozycje przedstawiono w standardowo przyjętej formie pozwalającej na odnalezienie danej pozycji w jednej z dostępnych bibliotek. Spis literatury nie posiada również zwyczajowo ustalanego porządku – czy to alfabetycznego, czy też kolejności pojawiania się odpowiednich pozycji w tekście. W przebijaniu się przez tekst nie pomagają również liczne literówki oraz niezręczności językowe. Niektóre usterki utrudniające poruszanie się w tekście zostały wskazane już wcześniej. Tutaj, z obowiązku recenzenta, zmuszony jestem dodać jeszcze kilka punktów, które znacząco obniżają poziom omawianej pracy. W tekście, jak i na rysunkach brakuje wielu wyjaśnień, lub pojawiają się nie w tych miejscach, w których powinny. Na przykład N na str. 22 wyjaśniono na stronie następnej; obszar oznaczony tęczą na rys. 14 pozostawiono bez komentarza (obszar światła widzialnego?); rys. 15 nie do końca zgodny jest z opisem w tekście (różne oznaczenia F_{12} oraz brak wyjaśnienia dla A we wzorze 1.4.4); ciśnienia podawane są w różnych jednostkach (np. rys. 20 [Pa], rys. 21 [mbar]; na str. 33 pojawia się odniesienie do wzoru 5.2, którego nie ma w tekście; temperatura ekranowanej masy w akceleratorach podawana jest czasami jako 1.8 K a czasami jako 1.9 K; do rys. 22 dołączono wzór bez jakiegokolwiek wyjaśnienia; na porównawczym rys. 52 pojawia się dodatkowy punkt, którego nie ma na rys. 51; podpis pod rys. 56 mówi o różnych poziomach ciśnienia, a na tym rysunku uwidoczniono tylko wynik dla jednej wartości ciśnienia (podpis identyczny jak na rysunku następnym – 57); na rys. 63 pojawia się nieczytelne wyjaśnienie wykropkowanych obszarów; na str. 78 znajduje się odniesienie do podrozdziału 1.4.7, którego nie ma w tekście; na str. 79 zamieszczono odnośnik do podrozdziału 4.6.2, w którym omawiany jest przypadek komory bez osłony termicznej, a nie osłony wykonanej z pojedynczej folii aluminiowej, o czym mówi odnośnik; z jakiego źródła pochodzi rys. 84 - w jego lewym, górnym narożniku znajduje się oznaczenie 3.3?

Wymienione powyżej oraz w obrębie całej recenzji nieścisłości oraz usterki redakcyjne uważam za poważne. Obniżają one znacznie wartość omawianej rozprawy. Jednak uzyskane wyniki, zwłaszcza doświadczalne, bronią pracy jako całości. Doceniając wkład Doktorantki w prowadzone badania i opracowanie ich wyników, pozostaję w przekonaniu, że przedłożona do recenzji rozprawa mgr inż. Valentiny Venturi spełnia warunki stawiane ustawowo rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony zawartych w niej tez.



Wojciech Kempinski