

WNIOSEK O PRZEPROWADZENIE POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO
W DZIEDZINIE NAUK TECHNICZNYCH

dr inż. Jarosław Poliński

AUTOREFERAT

przedstawiający opis osiągnięć naukowych

1. Imię i nazwisko: Jarosław Poliński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1. Magister inżynier, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, Politechnika Wrocławska, 2002 rok, „*Optymalizacja wielowarstwowej izolacji próżniowej*”
2. Doktor nauk technicznych, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, Politechnika Wrocławska, 2006 rok, tytuł rozprawy doktorskiej: „*Modelowanie mechanizmów przekazywania ciepła przez kriogeniczne izolacje próżniowe*”.

Tytuł nadany Uchwałą Rady Naukowej Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej w dniu 29 listopada 2006 roku. Rozprawa obroniona z wyróżnieniem.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. 01.02.2007 – 30.09.2008 – Politechnika Wrocławska, Asystent naukowo-dydaktyczny.
Urlop bezpłatny w okresie 01.02.2007 – 30.08.2008
2. 01.09.2006 – 30.08.2008 – Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) Saclay, Francja – 2 letni kontrakt PostDoc
3. 01.10.2008 – obecnie – Politechnika Wrocławska, Adiunkt naukowo-dydaktyczny.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.).

a) *tytuł osiągnięcia naukowego,*

Osiągnięcie naukowe składa się z cyklu 7 publikacji i 2 raportów powiązanych tematycznie wspólnym tytułem:

Wybrane zagadnienia cieplno-przepływowe związane z kriostatowaniem magnesów nadprzewodnikowych.

b) *Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:*

- [H1] Michał Strychalski, Maciej Chorowski, **Jarosław Poliński**: *Heat transfer through the flat surface of Rutherford superconducting cable samples with novel pattern of electrical insulation immersed in He II*, Cryogenics. 2014, vol. 61, s. 79-85, ISSN:0011-2275, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.02.007>
Impact Factor: 01.168 (2014)
- [H2] Bertrand Baudouy, **Jarosław Poliński**: *Thermal conductivity and Kapitza resistance of epoxy resin fiberglass tape at superfluid helium temperature*, Cryogenics. 2009, vol. 49, s. 138-143, ISSN: 0011-2275, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.11.004>
Impact Factor: 00.987 (2010)
- [H3] **Jarosław Polinski**, Maciej Chorowski, Piotr Bogdan, *Methodology for the certification of radiation resistance of coil Insulation material*, EuCARD-NOT-2012-001, <https://cds.cern.ch/record/1417804>
- [H4] **Jarosław Poliński**, Piotr Bogdan, Maciej Chorowski, Jakub Niechciał, Andrzej Noga, Piotr Pyrka: *Thermal properties of LARP type Nb³Sn superconducting magnet coil electrical insulation in pressurized superfluid helium*, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2015, vol. 28, nr 2, s. 633-637, ISSN: 1557-1939, <http://dx.doi.org/10.1007/s10948-014-2796-5>
Impact Factor: 01.100 (2014)
- [H5] **Jarosław Poliński**, Maciej Chorowski, Paweł Duda, Yury Bozhko, Bernd Petersen, Joern Schaffran: *Design and commissioning of vertical test cryostats for XFEL superconducting cavities measurements*, Advances in cryogenic engineering vol. 59B: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC, Anchorage, Alaska, USA, Melville, NY : American Institute of Physics, 2014. s. 1214-1221, ISBN: 978-0-7354-1203-3
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4860844>
Web of Science: 15
- [H6] **Jarosław Poliński**, Maciej Grabowski, Maciej Chorowski, Aranud. Vande Crean, Vittorio Parma, *Design and thermal calculations of FRESKA2 heat exchangers for pressurised superfluid helium baths temperature controlling*, 27th International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018, IOP Publishing, 2019, artykuł nr 012086
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/502/1/012086>

[H7] Maciej Chorowski, **Jarosław Poliński**, Wojciech Kempański, Zbigniew Trybuła, Szymon Łoś, Katarzyna Chołast, Andrzej Kociemba*: *Continuous flow system for controlling phases separation near λ transition*, Advances in cryogenic engineering vol. 59A, Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC, Anchorage, Alaska, USA, Melville, NY : American Institute of Physics, 2014. s. 276-284, ISBN: 978-0-7354-1202-6, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4860712>

[H8] Maciej Chorowski, Jarosław Fydrych, Zbigniew Modliński, **Jarosław Poliński**, Laurent Tavian, Janusz Wach: *Risk analysis update of the LHC cryogenic system following the 19th September 2008 incident*, ICEC 23 - ICMC 2010: Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2010, Wrocław, Poland, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011. s. 879-884, ISBN: 978-83-7493-589-0

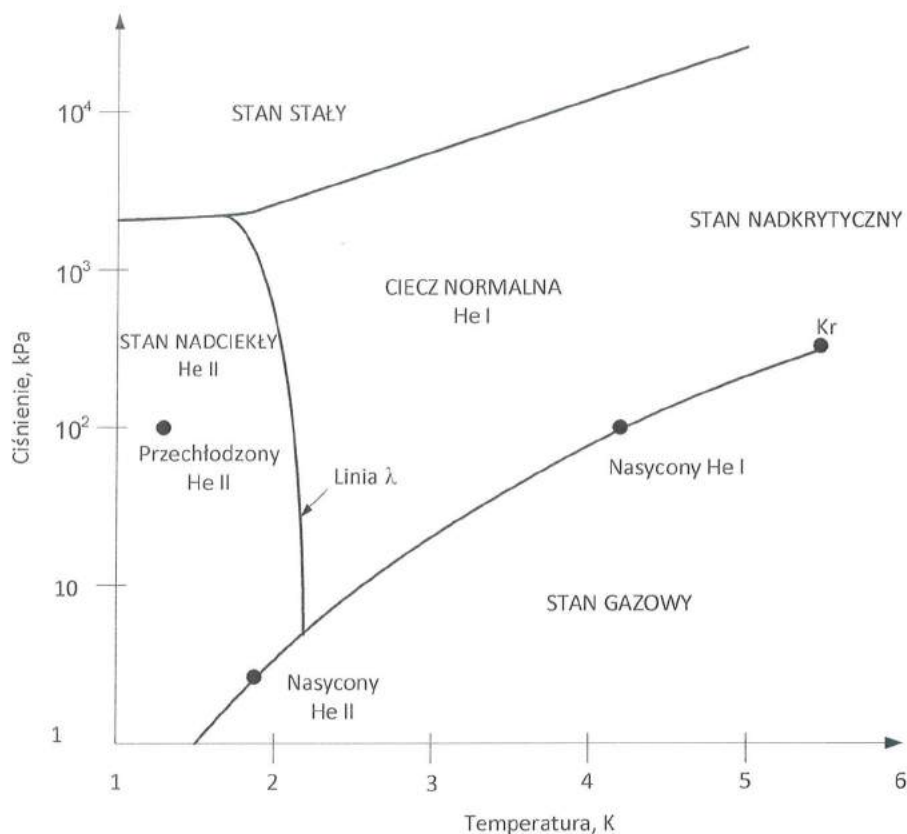
[H9] Maciej Chorowski, Jarosław Fydrych, Zbigniew Modliński, **Jarosław Poliński**, Laurent Tavian, Janusz Wach, *Upgrade on risk analysis following the 080919 incident in the LHC sector 3-4*, CERN/ATS/Note/2010/033 (TECH), 2010-07-01

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie

Postęp w badaniach naukowych związanych m.in. z fizyką wysokich energii, fizyką jądrową czy reakcjami termojądrowymi wymógł wyjście infrastruktury badawczej ze skali hal laboratoryjnych do obiektów o wymiarach liniowych liczonych w setkach metrów, a w niektórych przypadkach, nawet w dziesiątkach kilometrów. Wiele z projektów, klasyfikowanych jak Wielka Infrastruktura Badawcza (Big Science), wykorzystuje technologie nadprzewodnikowe do wytwarzania bardzo wysokich pól magnetycznych w magnesach nadprzewodnikowych oraz bardzo dużych gradientów elektrycznych w nadprzewodnikowych wnękach rezonansowych. Nieodłącznym elementem infrastruktury wykorzystującej elementy nadprzewodnikowe jest system kriogeniczny, który zapewnia schłodzenie i utrzymanie na odpowiednio niskim poziomie temperaturowym np. cewek magnesów wykonanych ze stopu NbTi.

Największe obecnie pracujące, będące w trakcie budowy lub planowane instalacje akceleratorowe i reaktory fuzji jądrowej wykorzystują magnesy wykonane z nadprzewodników niskotemperaturowych NbTi lub Nb₃Sn. W przypadku akceleratorów cząstek stosuje się ponadto struktury przyśpieszające, tzw. wnęki rezonansowe, wykonane z czystego niobu. Ze względu na fakt, że temperatury krytyczne ww. materiałów, czyli temperatury, poniżej której materiały te znajdują się w stanie nadprzewodzącym, są niższe niż 18.2 K, prawidłowa praca takich urządzeń wymaga ich chłodzenia przy użycie zimnego helu w różnych stanach termodynamicznych. Na rysunku 1 przedstawiono wykres fazowy helu, na którym zaznaczono stany termodynamiczne helu najczęściej wykorzystywane do kriostatowania elementów wykonanych z nadprzewodników niskotemperaturowych.



Rysunek 1. Wykres fazowy helu.

Nasycony hel normalny został wykorzystany do chłodzenia magnesów synchrotronu Nuclotron (JINR, Dubna, Rosja) czy też Tevatron (FermiLab, Batavia, IL, USA) i będzie wykorzystany jako czynnik chłodniczy magnesów w budowanych obecnie akceleratorach takich jak FAIR SIS100 (GSI, Darmstadt, Niemcy) czy też NICA (JINR, Dubna, Rosja). Przechłodzony hel nadciekły wykorzystywany jest do kriostatowania magnesów m.in. eksperymentalnego reaktora termojądrowego ToreSupra (CEA, Grenoble, Francja) czy też akceleratora LHC (CERN, Genewa, Szwajcaria) oraz postrzegany jest jako jeden z dwóch potencjalnych czynników chłodniczych magnesów przyszłego akceleratora FCC (CERN, Genewa, Szwajcaria). Nasycony hel nadciekły stosowany jest w akceleratorach liniowych do chłodzenia wnęk rezonansowych, np. w obecnie pracującym akceleratorze XFEL (DESY, Hamburg, Niemcy), obecnie budowanym akceleratorze ESS (Lund, Szwecja) oraz w planowanych akceleratorach PIP II (FermiLab, Batavia, IL, USA) czy też LCLS-II (SLAC, Menlo Park, CA, USA). Natomiast hel w stanie nadkrytycznym (charakteryzujący się jednofazowością oraz gęstością zbliżoną do helu skroplonego przy relatywnie technicznie niskim ciśnieniu) wykorzystuje się do chłodzenia cewek magnetycznych magnesów eksperymentalnego reaktora termojądrowego KSTAR (NFRI, Daejeon, Korea) a w przyszłości magnesów reaktora termojądrowego ITER (CEA, Cadarache, Francja) czy też w DTT (ENEA, Frascati, Włochy). Ponadto, przechłodzony hel normalny oraz hel w stanie nadkrytycznym stosowany jest do transferu tego czynnika w temperaturach kriogenicznych na znaczne odległości (nawet do kilku kilometrów).

Zapewnienie prawidłowej, bezpiecznej i optymalnej pod względem energetycznym pracy instalacji wykorzystujących elementy nadprzewodzące, wymaga analizy szeregu zagadnień związanych z wymianą ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami takiej instalacji oraz analizy procesów termodynamicznych i termo-hydraulicznych

zachodzących w złożonych systemach dystrybucji czynników kriogenicznych. Do grona takich zagadnień można zakwalifikować przede wszystkim:

1. Analizę wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym a kriostatowanym urządzeniem nadprzewodnikowym,
2. Optymalizację termodynamiczną procesu wytwarzania helu nadciekłego,
3. Analizę procesów termicznych i termo – hydraulicznych w awaryjnych stanach pracy systemów kriogenicznych.

W zasadzie na każdym etapie mojej pracy naukowej, poczynając od pracy magisterskiej, poprzez studia doktoranckie, po okres obecny, moje zainteresowania naukowe związane były z ww. zagadnieniami, dlatego też własne osiągnięcie naukowe ująłem w syntetycznym tytule niniejszego wniosku habilitacyjnego jako: **wybrane zagadnienia cieplno-przepływowe związane z kriostatowaniem magnesów nadprzewodnikowych**. Poniżej przedstawiłem szczegółowy opis poszczególnych problemów.

Ad 1. Analiza wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym a kriostatowanym urządzeniem nadprzewodnikowym

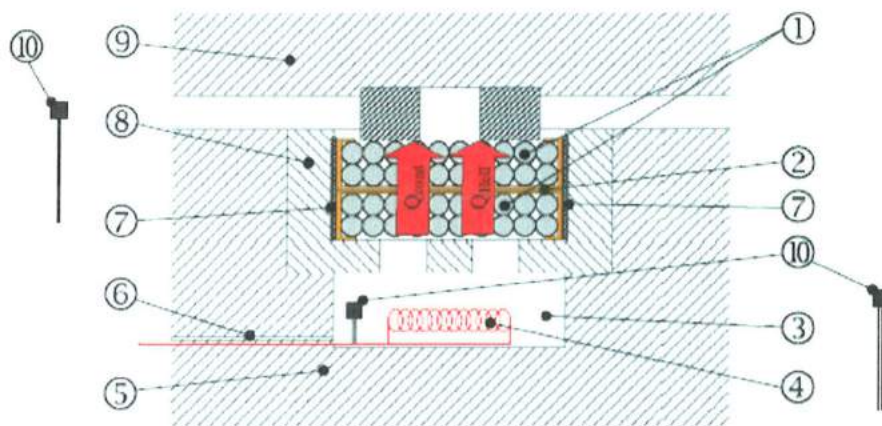
Magnesy nadprzewodnikowe, wykorzystywane obecnie w większości akceleratorów kołowych, wyprodukowane są z wykorzystaniem nadprzewodnikowego stopu NbTi o temperaturze krytycznej wynoszącej 9,6 K. Stop ten charakteryzuje się dobrymi właściwościami plastycznymi i mechanicznymi. Dzięki temu możliwa jest produkcja pojedynczych drutów zawierających na ogół kilkaset drobnych włókien NbTi w osnowie miedzianej, a następnie formowanie z takich drutów kabli o szerokiej gamie konfiguracji i kształtów. Z tak wstępnie wyprodukowanych kabli kształtuje się cewki magnesów nadprzewodnikowych, w których kable odizolowane są elektrycznie od siebie przy użyciu materiałów o wysokiej oporności elektrycznej.

W trakcie nominalnej pracy akceleratorów kołowych część przyspieszanych cząstek (np. elektronów lub hadronów) wypada ze światła wiązki a ich energia wytracana jest m.in. w strukturze cewek magnesów. Może to powodować lokalne podwyższenie temperatury nadprzewodnika i doprowadzić do jego przejścia ze stanu nadprzewodnictwa do stanu rezystywnego, czyli do tzw. z j. ang. *quenchu*. Skokowe pojawienie się wysokiego oporu elektrycznego przy istnieniu bardzo wysokiego prądu elektrycznego zasilającego magnes powoduje silne wydzielenie się ciepła Joule'a w miejscu przejścia rezystywnego, a następnie ogrzanie sąsiednich obszarów kabla nadprzewodnikowego, co może doprowadzić do propagacji przejścia rezystywnego w kolejne obszary cewki magnesu. Dlatego też, podczas nominalnych warunków pracy energia deponowana przez cząstki w cewkach magnesów musi być odbierana z odpowiednią intensywnością przez czynnik kriostatujący. Głównym ograniczeniem wymiany ciepła pomiędzy kablami cewek a kriogenem jest materiał izolacji elektrycznej, który, obok wysokiej oporności elektrycznej, charakteryzuje się dużą opornością cieplną.

W przypadku magnesów zastosowanych przez CERN w Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider, LHC) do wytworzenia cewek magnesów nadprzewodnikowych zastosowano kable typu Rutherford, gdzie, jako materiał izolacji elektrycznej, wykorzystano poliamid o handlowej nazwie Kapton. W celu dobrej wymiany ciepła pomiędzy wewnętrzną strukturą kabla a kriostatującym go przechłodzonym helu nadciekłym izolację elektryczną wykonano w postaci dwóch warstw taśmy nawiniętej

dookoła powierzchni kabla, pozostawiając pomiędzy poszczególnymi warstwami taśm niewielkie szczeliny pozwalające na relatywnie dobrą ich penetrację przez hel nadciekły. Badania wykonane na etapie projektowania magnesów LHC oraz dane zbierane podczas pracy akceleratora wskazują, iż tak zaprojektowana izolacja elektryczna zapewnia odpowiednie chłodzenie cewek magnesów. Jednak, ze względu na plany podniesienia świetlności wiązki akceleratora LHC (projekt HL – LHC), energie deponowane przez cząstki elementarne w materiale cewek magnesów mogą być nawet kilka razy wyższe niż przy obecnych parametrach pracy akceleratora LHC. Z tego względu niezbędne było opracowanie i przetestowanie m. in. pod kątem efektywności wymiany ciepła nowych konfiguracji nawinięć izolacji elektrycznych takich kabli.

Cześć badań cieplnych nowych konfiguracji nawinięć izolacji elektrycznej przeprowadziła grupa kriogeniczna Politechniki Wrocławskiej, kierowana przez prof. dr hab. Macieja Chorowskiego. Przy badaniach wykorzystano zaprojektowane przeze mnie na stanowisko testowe, którego głównym elementem jest kriostat badawczy pozwalający na wytworzenie w obrębie objętości zbiornika pomiarowego przechłodzonego helu nadciekłego o temperaturach w zakresie 1,7 – 2,1 K. Na potrzeby badań wykorzystano unikatowy przyrząd pomiarowy próbek kabli, który, w przeciwieństwie do typowych pomiarów z wykorzystaniem stosu kabli i pozwalających na wyznaczenie całkowitego strumienia ciepła przekazywanego z kabli do helu nadciekłego, umożliwia wyznaczenie strumieni przepływu ciepła pomiędzy izolacją elektryczną dwóch sąsiadujących ze sobą kabli. Dane eksperymentalne zebrane w trakcie takich pomiarów są szczególnie istotne przy analizie propagacji przejścia rezystywnego jednego z kabli do pozostałych kabli cewki magnesu. Przyrząd pomiarowy pozwalał również na zmianę siły nacisku na próbkę mierzonych kabli, dzięki czemu możliwe było określenie wpływu kompresji kabli w cewce magnesu na skuteczność odprowadzania ciepła z kabli. Schemat przyrządu pomiarowego wraz z próbką pomiarową przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Schemat przyrządu pomiarowego wraz z próbką pomiarową: 1 – kabel typu Rutherford; 2 – próbka badanej izolacji elektrycznej; 3 – komora pomiarowa; 4 – grzejnik elektryczny; 5 – obudowa przyrządu pomiarowego; 6 – doprowadzenie przewodów elektrycznych do instrumentacji w komorze pomiarowej; 7 – uszczelnienie próbki pomiarowej; 8 – łożo próbki pomiarowej; 9 – element kompresujący próbkę pomiarową; 10 – czujnik temperatury

Opracowana przeze mnie procedura testowa polegała na rozpraszaniu stałej mocy cieplnej w przechłodzonym helu nadciekłym, znajdującym się w komorze pomiarowej pod badaną próbką kabla, i pomiarze temperatury helu w tej przestrzeni przy zachowaniu stałej temperatury helu otaczającego uchwyt pomiarowy. Wyznaczenie różnic temperatur na wskroś badanych próbek dla tych samych wartości mocy grzewczych

rozpraszanych w komorze pomiarowej pozwala na porównanie efektywności transportu ciepła pomiędzy dotychczas stosowanymi a nowo proponowanymi schematami nawinięć izolacji poliamidowej. Wyniki przeprowadzonych badań wskazały, że nowe schematy nawinięć pozwalają na przepływ od 30% do 65% większej ilości ciepła niż w przypadku izolacji obecnie stosowanych, a kompresja kabli w cewce magnezu ma niewielki wpływ na właściwości transportu ciepła przez takie izolacje elektryczne. Szczegóły dotyczące procedury badawczej, oraz przebiegu i wyników badań są przedmiotem publikacji [H1].

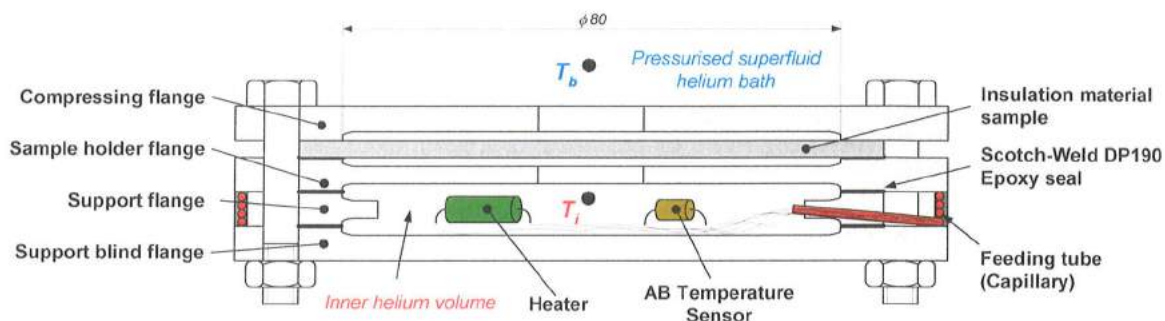
Dalsze możliwości wzrostu energii zderzeń i zwiększenia świetlności wiązki akceleratorów kołowych upatruje się m.in. w zastosowaniu magnesów nadprzewodnikowych opartych o nadprzewodnik Nb_3Sn . Pomimo, że nadprzewodnik ten został odkryty ponad 10 lat wcześniej niż stop $NbTi$, jego temperatura krytyczna jest dwukrotnie wyższa o temperatury krytycznej nadprzewodnika $NbTi$, a krytyczne pole magnetyczne wynosi ok 28 T, czyli o 13 T więcej niż w przypadku $NbTi$, to jego aplikacyjność do tej pory jest znacznie niższa niż nadprzewodnika $NbTi$. Wynika to z faktu, że nadprzewodnik Nb_3Sn ma strukturę międzykrystaliczną, charakteryzującą się bardzo małą plastycznością i niską wytrzymałością mechaniczną, przez co produkcja elementów nadprzewodzących z wykorzystaniem tego nadprzewodnika nie może odbywać się z użyciem technologii opracowanych na potrzeby przemysłu elektrycznego, tak jak ma to miejsce w przypadku nadprzewodnika $NbTi$. Produkcja urządzeń opartych na nadprzewodniku Nb_3Sn możliwa jest jedynie przy użyciu znacznie bardziej skomplikowanej technologii tzw. *Wind and React*, w której to najpierw z kabli typu Rutherford formuje się cewkę magnezu a następnie, w procesie kilkunastogodzinnego wygrzewania w temperaturze $650^\circ C$, przereagowuje się w strukturę nadprzewodnikową proszek znajdujący się we włóknach drutów kabli.

Ze względu na konieczność przeprowadzenia obróbki termicznej w wysokich temperaturach, zastosowanie w magnesach opartych o nadprzewodnik Nb_3Sn materiałów poliamidowych jest niemożliwe. Wynika to z relatywnie niskiej temperatury resublimacji takich materiałów, wynoszącej nieco ponad $410^\circ C$. Dlatego na potrzeby produkcji magnesów opartych o technologie Nb_3Sn opracowano nową, dwuetapową technologię wytwarzania izolacji elektrycznej kabli. Na etapie kształtowania cewki magnezu powierzchnia kabla owijana jest taśmą wykonaną z odpornych na wysokie temperatury włókien szklanych, która to po uformowaniu cewki pozwala na uzyskanie odpowiednich dystansów pomiędzy kablami oraz tworzy strukturę porowatą, przenikalną dla gazów obojętnych, wykorzystywanych w procesie wygrzewania magnezu. W drugim kroku, po procesie wygrzewania, cewkę magnezu impregnuje się próżniowo odpowiednią żywicą epoksydową, dzięki czemu, po procesie utwardzenia żywicy, kable cewek magnezu są zatopione w żywicy.

Taka technologia produkcji cewek magnezu powoduje, że cewki magnesów nie są zanurzone w czynniku kriostatującym a proces wymiany ciepła pomiędzy kablami cewki a kriogenem następuje na drodze przewodnictwa ciepła przez laminat żywic epoksydowych i włókien szklanych. Ponadto, jeżeli czynnikiem kriostatującym jest hel nadciekły, na granicy fazy ciekłej (helu nadciekłego) i stałej (żywicy epoksydowej) występuje opór Kapicy, dodatkowo ograniczający przepływ ciepła. Dlatego też przy projektowaniu cewek magnesów z nadprzewodnika Nb_3Sn , niezbędna jest znajomość wartości przewodnictwa cieplnego takich laminatów oraz wartości oporu Kapicy.

Eksperymentalne wyznaczenie ww. własności materiałowych, które realizowałem w latach 2006 – 2007 w ośrodku naukowym Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) Saclay we Francji podczas kontraktu typu post-doc, było jednym z celów zadania

Thermal Studies and Quench Protection (TSQP) projektu *Next European Dipole (NED)*. W ramach projektu, na potrzeby wyprodukowania magnesu nadprzewodnikowego o polu magnetycznym 15 T, planowano zastosować włókna szklane typu E oraz żywicę epoksydową DGEBF utwardzaną DETDA. Pomiary właściwości cieplnych takiego laminatu przeprowadziłem przy użyciu tzw. metody membranowej w środowisku przechłodzonego helu nadciekłego, w zakresie temperatur 1.55 – 2.05 K. W metodzie membranowej próbka materiału o niewielkiej grubości oddziela przestrzeń helu nadciekłego zamkniętego we wnętrzu uchwytu pomiarowego od przestrzeni kapilei helowej, w której znajdują się uchwyt wraz z badaną próbką. Schemat uchwytu pomiarowego wraz z badaną próbką przedstawiony jest na rysunku 3.



Rysunek 3. Schemat uchwytu pomiarowego metody membranowej

Metodyka pomiaru polegała na generowaniu przy pomocy grzejnika elektrycznego (*Heater*, rys. 3) stałego strumienia ciepła Q w helu nadciekłym, znajdującym się we wnętrzu uchwytu pomiarowego (*Inner helium volume*, rys. 3), oraz pomiarze ustalonej różnicy temperatur ΔT pomiędzy helu grzany T_i i helu znajdującym się na zewnątrz uchwytu, którego temperatura T_b utrzymywana jest na stałym poziomie. Pomiar jednej próbki materiału pozwala na sporządzenie charakterystyki $\Delta T - Q$ dla danej grubości badanego materiału, a tym samym na określenie całkowitego oporu przepływu ciepła przez próbkę, na który składa się podwójny opór Kapicy i przewodności cieplnej materiału. Sporządzenie charakterystyki $\Delta T - Q$ dla innych grubości próbek laminatów a następnie sporządzenie charakterystyki oporu przepływu ciepła dla $\Delta T \ll T_b$ w funkcji grubości badanych próbek pozwala na wyrugowanie wartości oporu Kapicy, która jest zależna jest jedynie od rodzaju badanego materiału, oraz wartości oporu przewodności cieplnej, który zależny jest zarówno od rodzaju jak i grubości badanego materiału.

Otrzymane przeze mnie wyniki badań, prezentowane w publikacji [H2], wskazały, że wartość współczynnika przewodności cieplnej badanego materiału jest relatywnie wysoka, a opór Kapicy mały, co predysponuje ten materiał do aplikacji jako izolację elektryczną cewek magnesów wykonanych z nadprzewodnika Nb_3Sn . Utylitarne znaczenie tych badań podkreśla wysoka ilość cytowań artykułu.

Prace związane z doбором odpowiednich materiałów na izolację elektryczną cewek magnesów wykonanych z nadprzewodnika Nb_3Sn kontynuowane były w ramach projektu *European Coordination for Accelerator Research and Development (EuCARD) 7* Ramowego Programu EU. Podczas projektu, w ramach zadania 7.2 *Support Studies*, brałem udział w przeprowadzeniu certyfikacji radiacyjnej kilku potencjalnych materiałów izolacji elektrycznych pod kątem wpływu silnego promieniowania na ich właściwości mechaniczne, elektryczne i cieplne.

Do końcowego programu certyfikacji radiacyjnej zakwalifikowano cztery materiały, będące laminatami włókien szklanych typu S oraz różnego typu, odpowiednio

utwardzanych żywic epoksydowych. Były to materiały: RAL Mix 71, z żywicą opracowaną na potrzeby programu NED; RAL Mix 237, z żywicą TGPAP utwardzoną DETD(2002); LARP, z żywicą ceramiczną oraz CE-Epoxy, z żywicą cyjano-estrową. Materiały te zostały opracowane i wyprodukowane przez Rutherford Appleton Laboratory Science and Technology Facilities Council (RAL, STFC) z Anglii. Pomiary wytrzymałości elektrycznej wykazały, że po procesie naświetlania wiązką elektronów o mocy 1 MeV o dawce 50 MGy wszystkie cztery materiały cechują się bardzo dobrymi właściwościami elektrycznymi, natomiast jedynie dwa z tych materiałów, żywica ceramiczna LARP oraz CE-Epoxy, zachowują dobre własności mechaniczne. Więcej informacji na temat przeprowadzonego programu certyfikacji radiacyjnej materiałów izolacji elektrycznej można znaleźć w końcowym raporcie zadania projektu [H3].

Na potrzeby badań własności cieplnych tych materiałów wybrano również pomiary metodą membranową. Ze względu na relatywnie dużą powierzchnię próbek do badań cieplnych (2 x Ø 80mm każdej z 4 grubości próbek certyfikowanego materiału) oraz czas niezbędnego do jednorodnego naświetlania tak dużej powierzchni (średnica dysponowanej wiązki promieniowania elektronowego wynosiła jedynie 6 mm) naświetlenie próbek materiału znacznie wychodziło poza ramy czasowe projektu. Dlatego podczas realizacji projektu udało się porównać właściwości cieplne jedynie materiałów nienapromieniowanych. Badania materiału RAL Mix71 oraz LARP w zakresie temperatur 1.5 – 2.0K przeprowadziła grupa kriogeniczna Politechniki Wrocławskiej, natomiast CE-Epoxy oraz RAL Mix 237 zostały przebadane przez grupę badawczą z CEA Saclay, Francja. Opis procedury pomiarowej oraz porównanie wyznaczonej wartości współczynnika przewodności cieplnej i oporu Kapicy dla materiału LARP z pozostałymi materiałami certyfikowanymi w ramach projektu EuCARD przedstawiono w [H4]. Dane te mogą być wykorzystane przy projektowaniu magnesów nadprzewodnikowych niepoddanych promieniowaniu synchrotronowemu, stosowanych np. w diagnostyce medycznej z wykorzystaniem rezonansu magnetycznego czy też w badaniach fizycznych z wykorzystaniem silnych, stałych pól magnetycznych.

Ad 2. Optymalizacja termodynamiczna procesu wytwarzania helu nadciekłego

We frontowych pod względem celów badawczych akceleratorach kołowych i liniowych, elementy nadprzewodnikowe kriostatowane są hellem nadciekłym. Nasycony hel nadciekły wykorzystywany jest do bezpośredniego kriostatowania wnęk rezonansowych akceleratorów liniowych lub, poprzez wykorzystywanie przeponowych wymienników ciepła, do obniżania temperatury przechłodzonego helu nadciekłego, kriostatującego magnesy nadprzewodnikowe akceleratorów kołowych.

Natomiast sam nasycony hel nadciekły uzyskuje się z helu normalnego poprzez obniżenie ciśnienia jego par do poziomu poniżej 50 mbar. Ze względu na dopływy ciepła od elementów kriostatowanych czy też poprzez strukturę mechaniczną i izolację cieplną kriostatów, nasycony hel nadciekły odparowuje, a generowane pary są odprowadzone do pomp próżniowych. Stały poziom cieczy nasyconego helu nadciekłego w danej objętości uzyskuje się poprzez doprowadzanie helu normalnego lub nadkrytycznego, który jest dławiony na zaworze kontrolnym do ciśnienia panującego w objętości nasyconego helu nadciekłego. Po procesie dławienia hel znajduje się w stanie dwufazowym – faza ciekła zbierana jest w danej objętości kriostatów a faza gazowa (pary) odprowadzana jest również do pompy próżniowej. Znaczną poprawę efektywności procesu produkcji nasyconego helu nadciekłego (zwiększenie ilości fazy ciekłej po procesie rozprężania) uzyskuje się poprzez zastosowanie rekuperacyjnego wymiennika

ciepła, którego rolą jest przechłodzenie helu napływającego do zaworu rozprężnego przed jego rozprężeniem, przy użyciu przepływu powrotnego par helu do pomp próżniowych. Zastosowanie wymiennika ciepła o wydajności dedykowanej danej aplikacji umożliwi uzyskanie nawet do 33% więcej cieczy po procesie dławienia niż w układach bez wymiennika. Dlatego też konstrukcja rekuperacyjnego wymiennika ciepła ma niezwykle istotny wpływ na efektywność całego procesu produkcji nasyconego helu nadciekłego.

Ponieważ tego typu wymiennik pracują zazwyczaj w zakresach temperatur 2.2 – 4.5K, lokalna różnica temperatur pomiędzy strumieniami wymieniającymi ciepło jest dość często mniejsza niż 0.2 K oraz ze względu na bardzo małe wartości ciśnień strumienia powrotnego par helu (10 - 30 mbar), konstrukcja takich wymienników powinna charakteryzować się szczególnie wysoką intensywnością wymiany ciepła przy równoczesnym zachowaniu niskich spadków ciśnienia na przepływie par helu. Obydwa warunki stoją we wzajemnej kontradycji, ponieważ poprawa intensywności wymiany ciepła poprzez zwiększenie powierzchni wymiany ciepła pociąga za sobą zwiększenie spadków ciśnienia na przepływie płynów. Dlatego też konstrukcja rekuperacyjnych wymienników ciepła na potrzeby nowych układów produkcji helu nadciekłego każdorazowo musi być poddana procesowi optymalizacji.

Do optymalizacji wielkości wymienników ciepła może posłużyć metoda minimalizacji generacji entropii, zastosowaną przez mnie w m. in. w przypadku konstrukcji kriostatów dwóch stanowisk testowych XATC [H5], które zawierają wymienniki ciepła typu Giauque-Hampsona. Obok strat związanych z różnicą temperatur strumieni wymieniających ciepło oraz strat ciśnienia związanych z ich przepływem, w procesie optymalizacji wymiennika uwzględniłem ilość entropii generowanej w procesie dławienia w zależności od początkowych parametrów procesu (temperatury i ciśnienia helu normalnego przed zaworem dławiącym).

Proces optymalizacji wymienników ciepła XATC wykazał, że dla projektowego strumienia masy helu, wynoszącego 20 g/s, optymalna ilość zwoi, determinująca powierzchnię wymiany ciepła, wynosi 26. Jednak ze względów produkcyjnych, podyktowanych bardzo trudną technologią łączenia zewnętrznie-żebrowanych rur miedzianych, zdecydowano się na zastosowanie jedynie 20 zwoi wymiennika ciepła. Pozwoliło to na rezygnację z jednego dodatkowego połączenia rur miedzianych, przez co obniżono ryzyko wystąpienia potencjalnej nieszczelności pomiędzy strumieniami wysoko- i niskociśnieniowymi, a finalna konstrukcja wymienników ciepła generowała jedynie 2% więcej entropii niż konstrukcja optymalna. Pomiarów parametrów termodynamicznych i przepływowych helu podczas nominalnej pracy obydwu stanowisk XATC pozwoliły na eksperymentalną weryfikację poprawności modelu cieplnego wymienników ciepła, opracowanego przeze mnie na potrzeby procesu optymalizacji tych wymienników. Porównanie wyników pomiarów i z wynikami modelu cieplnego zawarto również w publikacji [H5].

Nierzadko specyfika pracy niektórych systemów zwierających urządzenia nadprzewodnikowe, np. dużych stanowisk testowania magnesów nadprzewodnikowych, wymaga przechłodzenia helu normalnego do stanu nadciekłego w wyznaczonym czasie, co generuje potrzebę określenia odpowiednio dużej powierzchni wymiany ciepła pomiędzy nasyconym a przechładzonym helem nadciekłym. Główne problemy ograniczające analityczne możliwości rozwiązania takich zagadnień wynikają z nieciągłości funkcji termodynamicznych przy przejściu helu ze stanu normalnego do

stanu nadciekłości (tzw. przemiana λ) oraz ze zmiany charakteru wymiany ciepła pomiędzy helem a powierzchnią wymiennika - z konwekcji naturalnej w helu normalnym na przewodność Kapicy w helu nadciekłym. Powyższe zagadnienie zostało rozwiązane metodami numerycznymi nieustalonego przepływu ciepła na przykładzie dwóch wymienników ciepła dla stanowiska do badań właściwości i testów odbiorczych kabli nadprzewodnikowych FRESCA2 [H6]. Konstrukcja stanowiska opracowana została przez koordynowany przeze mnie zespół inżynierów i naukowców Politechniki Wrocławskiej we współpracy z CERN.

Stanowisko składa się z dwóch niezależnych kriostatów typu Claudet'a: zewnętrznego i wewnętrznego. W objętości przechłodzonego helu nadciekłego kriostatu zewnętrznego będzie znajdować się magnes z nadprzewodnika Nb_3Sn , generujący pole magnetyczne 14.7 T i mający aperturę wewnętrzną 100 mm. Przez otwór w magnecie przebiegać będzie zbiornik kriogeniczny kriostatu wewnętrznego, w którym będzie znajdować się próbka kabla nadprzewodnikowego, chłodzona niezależnie również przechłodzonym helem nadciekłym. Przechłodzony hel nadciekły w obydwu kriostatach będzie produkowany przy użyciu wymienników ciepła, wykonanych z rur miedzianych o kształcie U-rurowym, wypełnionych nasyconym helem nadciekłym.

Niezależna praca obydwu kriostatami generuje różne wymagania co do wielkości ich wymienników ciepła. Dla kriostatu wewnętrznego specyfikacja przewidywała, aby objętość helu, w której znajduje się próbka kabla, chłodzona była od temperatury 4.3 K do 1.9 K w czasie krótszym niż 1h, a w stanie ustalonym różnica temperatur pomiędzy nadciekłym helem nasyconym a przechłodzonym była mniejsza niż 20 mK dla ciepła transportowanego przez wymiennik ciepła o wartości 20 W i temperaturze przechłodzonego helu nadciekłego 1.9 K. Natomiast w przypadku kriostatu zewnętrznego chłodzenie helu od temperatury 4.3 K do 1.9 K należy przeprowadzić w czasie ok 12 h a różnica temperatur na wskroś wymiennika ciepła w stanie ustalonym powinna być nie wyższa niż 10 mK. Na potrzeby wyznaczenia wymaganej wielkości poszczególnych wymienników ciepła opracowano model cieplny takich wymienników, uwzględniając masę helu w poszczególnych kriostatach poddanego przechłodzeniu, prędkość pompowania pompy próżniowej służącej do odprowadzania par nasyconego helu nadciekłego, dopływów ciepła do przechłodzonego helu nadciekłego oraz uwzględniając współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła i przewodność Kapicy po obu stronach wymiennika ciepła. W oparciu o tak opracowany model przeprowadziłem dynamiczne symulacje zmiany temperatur w przestrzeni helu nasyconego i przechłodzonego dla różnych geometrii (długości i ilości rur) poszczególnych wymienników. Wyniki symulacji dla końcowo dobranych geometrii wymienników ciepła stanowiska FRESCA2 stanowią również część publikacji [H6]

Wyżej opisany przykład wymiany ciepła zachodzi dla cieczy pozostających w spoczynku. Natomiast, w niektórych układach zawierających hel nadciekły istnieje konieczność zastosowania rekuperacyjnego wymiennika ciepła, w którym dochodzi nie tylko do wymienny ciepła pomiędzy dwom strumieniami helu nadciekłego, ale również do przemiany danego strumienia helu ze stanu normalnego do nadciekłego lub do przemiany odwrotnej. Tego typu wymiennik został zastosowany w innowacyjnym stanowisku do separacji izotopu 3He z ze skroplonego helu 4He o wydajności półprzemysłowej.

Stanowisko to powstało w ramach projektu NCBiR INNOTECH, realizowanego przez Konsorcjum Naukowe „IFJ PAN- PGNiG o. w Odolanowie – PWR” w latach 2012 – 2015. Konstrukcja separatora umożliwia separację 3He ze skroplonego 4He w sposób ciągły a

skroplony ^4He , po odfiltrowaniu izotopu ^3He , jest zawracany do zbiorników magazynowych, przez co zachowuje swoją wartość rynkową. W oparciu o obliczenia teoretyczne wykazałem, że optymalna temperatura prowadzenia procesu separacji przy wykorzystaniu tzw. filtrów entropowych (materiałów porowatych przepuszczalnych jedynie dla frakcji nadkietkiej helu nadkietkiego) wynosi ok. 1,5 K. Kluczowym dla efektywności pracy separatora jest zastosowanie rekuperacyjnego wymiennika ciepła, w którym to strumień skroplonego helu podawanego do filtracji przechadzamy jest znacznie poniżej temperatury lambda (do ok. 1,6K) poprzez strumień helu powracającego po procesie filtracji izotopu ^3He . Trudność w projektowaniu takiego wymiennika ciepła polega na konieczności uwzględnienia bardzo dużej przewodności cieplnej helu znajdującego się w stanie nadkietkim. W celu uzyskania dużego gradientu temperatur pomiędzy wlotem a wylotem poszczególnych strumieni helu do wymiennika zdecydowałem się na zastosowanie wymiennika ciepła typu rura w rurze o bardzo dużej długości w porównaniu do pola przekroju poprzecznego zastosowanych rur. Przy obliczeniach cieplnych wymiennika przeanalizowałem wpływ stosunku pól poprzecznych poszczególnych kanałów wymiennika na jego efektywność dla różnych strumieni przepływającego czynnika. Wyniki obliczeń wykazały, że dla spodziewanych strumieni przepływu helu w zakresie 1 – 5 g/s efektywność wymiennika ciepła o długości 40 m jest bardzo słabo zależna od strumieni masowych helu wymieniającego ciepło. Dla takiej długości wymiennika jego efektywność nieznacznie spada wraz ze wzrostem stosunku pola poprzecznego kanału z helem podawanym do procesu filtracji do pola poprzecznego kanału z helem powrotnym. W przypadku wymiennika ciepła o długości 20 m wpływ wartości strumieni przepływających przez wymiennik na jego efektywność jest bardziej wyraźny, przez co w końcowej konstrukcji separatora zastosowałem wymiennik o długości 40 m. Schemat i opis zasady działania separatora ^3He ze skroplonego helu, wyznaczenie optymalnej temperatury filtracji, wyznaczenie parametrów pracy (strumieni masowych) separatora, wyznaczenie wymaganej efektywności zastosowanych rekuperacyjnych wymienników ciepła oraz proces wyboru geometrii rekuperacyjnego wymiennika ciepła szczegółowo przedstawiłem w publikacji [H7].

Ad 3. Analiza procesów termicznych i termo – hydraulicznych w awaryjnych stanach pracy systemów kriogenicznych.

Wzrost wielkości infrastruktury badawczej implikuje zwiększenie złożoności podsystemów takiej infrastruktury, a tym samym, wzrost prawdopodobieństwa jej awarii. W przypadku systemów kriogenicznych, wraz ze wzrostem wielkości infrastruktury rośnie również ilość czynnika kriogenicznego, znajdującego się w instalacji. Pomimo, iż czynniki kriogeniczne używane na potrzeby chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych, czyli hel, w przypadku nadprzewodników niskotemperaturowych, i azot, w przypadku nadprzewodników wysokotemperaturowych, nie są czynnikami wybuchowymi ani toksycznym, jednak ich niekontrolowane, awaryjne wydostanie się z systemu kriogenicznego może powodować zagrożenie osób i sprzętu znajdującego się w pobliżu takiego wycieku. Obok ryzyka „poparzenia” personelu czynnikiem o niskiej temperaturze lub długotrwałego oddziaływania niskiej temperatury na elementy konstrukcyjne niezaprojektowanych do pracy w takich warunkach, innym niebezpieczeństwem jest wyparcie tlenu z powietrza atmosferycznego przez szybko ogrzewający się i rozprężający gaz, co, w najgorszych konsekwencjach, może prowadzić do uduszenia się osób znajdujących się w takiej atmosferze. Zagrożenie to jest szczególnie istotne w przypadku wydostania się czynnika do przestrzeni zamkniętej, takich jak hala

laboratoryjna czy też tunel akceleratora. Z tego względu, analiza możliwych stanów awaryjnych systemów kriogenicznych, prawidłowe zrozumienie procesów termodynamicznych, cieplnych i termo-hydraulicznych, towarzyszących szybkiemu wydzielaniu się energii cieplnej do czynników kriogenicznych, oraz umiejętność prawidłowego doboru systemu zrzutu ciśnienia, w tym osprzętu bezpieczeństwa, jest niezwykle istotnym aspektem prawidłowego projektowania takich systemów i ich późniejszego operowania.

Jedną z najbardziej poważnych co do skutków awarii dużej infrastruktury badawczej wydarzyła się 19 września 2008 w CERN. W trakcie uruchamiania akceleratora LHC doszło do powstania wysokoenergetycznego łuku elektrycznego pomiędzy dwoma kablami nadprzewodnikowymi na wadliwie zmontowanym ich połączeniu. Łuk elektryczny przeciął dwie wewnętrzne, wypełnione helem rury procesowe akceleratora o łącznym przekroju poprzecznym 164 cm^2 , przez co prawie 6 ton helu wydostało się do przestrzeni próżniowej akceleratora. W wyniku kontaktu skroplonego helu z ciepłymi elementami przestrzeni próżniowej hel raptownie odparował, powodując gwałtowny wzrost ciśnienia w przestrzeni próżniowej. Wzrost ciśnienia aktywował zawory bezpieczeństwa chroniące zbiornik próżniowy przed nadciśnieniem i zimny hel wydostał się na zewnątrz urządzenia do tunelu akceleratora. W wyniku wzrostu ciśnienia w przestrzeni próżniowej spowodowanym niedopasowaniem wielkości zaworów próżniowych do ewakuacji tak dużych strumieni gazowego helu, uszkodzeniu mechanicznemu uległy również bariery próżniowe, ograniczające przestrzeń próżniową sektora akceleratora, w którym doszło do awarii. Wstępna analiza parametrów termiczno – ciśnieniowych, zanotowanych przez system akwizycji danych podczas awarii, oraz analiza uszkodzeń elementów akceleratora wykazała, że ciśnienie we wnętrzu przestrzeni próżniowej podczas awarii znacznie przekroczyło parametry projektowe.

Bezpośrednio po awarii CERN powierzył zespołowi prof. Chorowskiego analizę termodynamiki uszkodzenia, jakiego uległy magnesy i kriostaty akceleratora. W ramach realizacji tego zadania opracowałem model matematyczny, pozwalający na odtworzenie komputerowe procesów cieplno - hydraulicznych, jakie zaszły podczas awarii oraz symulację innych potencjalnych zdarzeń. Kluczowym elementem modelu obliczeniowego, pozwalającym na otrzymanie wyników symulacji zgodnych z parametrami zarejestrowanymi podczas awarii, okazał się model wymienny ciepła pomiędzy helem znajdującym się w przestrzeni próżniowej a zewnętrzną powierzchnią kriostatów magnesów, ekranem termicznym i wewnętrzną powierzchnią płaszcza próżniowego. Model wymiany ciepła opracowałem na podstawie fizyki wymiany ciepła przez konwekcję swobodną gazu zamkniętego w przestrzeni pomiędzy dwoma cylindrami o różnych średnicach. Ze względu na wymuszony różnicą ciśnień przepływ gazu wzdłuż zbiornika próżniowego postulowałem, iż warunki wymiany ciepła pomiędzy gazem a poszczególnymi powierzchniami zamkniętymi zbiornikiem próżniowym nie mają w pełni charakteru konwekcji naturalnej, i są bardziej zbliżone do warunków konwekcji mieszanej. Z tego względu dopasowałem model wymiany ciepła poprzez proporcjonalne zwiększanie wartości generowanych przy użyciu modelu konwekcji naturalnej do momentu uzyskania dobrej zgodności wyników symulacji i danych zmierzonych podczas awarii. Optymalna wartość współczynnika proporcjonalności wyniosła 1,6.

Symulacje numeryczne potwierdziły, iż podczas awarii ciśnienie w przestrzeni próżniowej zbliżyło się do wartości 8 bara przy ciśnieniu projektowym zbiornika próżniowego 1,5 bara. Tak wysokie ciśnienie w zbiorniku próżniowym wynikało z

zastosowania zbyt małej ilości zaworów bezpieczeństwa chroniącego ten zbiornik przed nadciśnieniem, co z kolei wynikało z nieprzewidzenia tak krytycznej awarii urządzenia na etapie jego projektowania. Model matematyczny wykazał, że awaria akceleratora LHC w dniu 19 września 2008 r. była bardzo zbliżona do najbardziej krytycznego scenariusza awarii, zredefiniowanego po awarii akceleratora, a wymagana ilość zaworów bezpieczeństwa na zbiorniku próżniowym regularnego sektora akceleratora powinna wzrosnąć z 2 do 8 szt. Szczegółowy opis opracowanego modelu matematycznego, wyniki symulacji przeprowadzonych przy jego użyciu oraz rekomendacji dotyczące modyfikacji systemu ochrony zbiorników próżniowych akceleratora LHC na okoliczność najbardziej krytycznej awarii systemu kriogenicznego są przedmiotem artykułu [H8] i raportu [H9].

Podsumowanie omówienia celu naukowego

Rezultaty przedstawionego osiągnięcia naukowego „Wybrane zagadnienia ciepłoprzepływowe związane z kriostatowaniem magnesów nadprzewodnikowych” mają istotne znaczenie dla obecnie projektowanych systemów kriostatowania urządzeń nadprzewodnikowych i zostały już wykorzystane w szeregu projektów. Przewodność cieplna i opór Kapicy wyznaczone dla laminatu włókien szklanych i żywicy epoksydowej DGEBF utwardzaną DETDA, zostały wykorzystane w CEA Saclay i w CERN przy opracowaniu konstrukcji magnesu FRESCA2 o rekordowym stałym polu magnetycznym wynoszącym 14.6 T, uzyskanym w kwietniu 2018. Rezultaty badań transportu ciepła przez izolacje poliamidowe kabli wykonanych z nadprzewodnika NbTi umożliwiły opracowanie dokładniejszych modeli transportu ciepła i masy w helu nadciekłym przez materiały o strukturze porowatej. Modele te wykorzystanie są obecnie do konstrukcji i budowy coraz to silniejszych i bardziej kompaktowych magnesów wykorzystujących stop NbTi. Model wymiany ciepła pomiędzy helum a elementami konstrukcyjnymi nadprzewodnikowych magnesów [H8 i H9], został wykorzystany przy analizach stanów awaryjnych systemów kriogenicznych m.in. akceleratorów XFEL oraz ESS. Natomiast proces optymalizacji termodynamicznej wytwarzania helu nadciekłego zostanie wykorzystany m.in. w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku przy projektowaniu i budowie systemu kriogenicznego lasera na swobodnych elektronach PoFEL.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Obok działalności z wiązanej z wyżej omówionym, głównym osiągnięciem naukowym, w swojej pracy zawodowej, w okresie po osiągnięciu tytułu doktora, zajmowałem się tematyką związaną z aplikacjami technologii kriogenicznych w dużych instalacjach naukowych i przemysłowych.

Badania modelu systemu chłodzenia cewek magnesu R3D-Glad

Po zakończeniu kontraktu na stanowisku post-doc w ramach projektu NED, CEA Saclay zaproponowało mi dalszą możliwość rocznej współpracy w ramach projektu budowy magnesu nadprzewodnikowego dla spektrometru *Reactions with Relativistic Radioactive ions Beams* (R3D-Glad), budowanego na potrzeby eksperymentu NUSTAR instalacji FAIR. Magnes R3B-Glad charakteryzuje się tym, że jego dwie z czterech cewek ułożone są horyzontalnie, a dwie pozostałe odchyłone są od poziomu do góry i do dołu o ok. 5%. Planowany sposób chłodzenia cewek magnesu polegał na zastosowaniu helu dwufazowego, cyrkulującego w układzie chłodzenia na zasadzie termosyfonu. Przed realizacją takiej koncepcji niezbędne okazało się przeprowadzenie badań stabilności i efektywności takiego układu chłodzącego, szczególnie dla przypadku cewki odchyłonej o 5% w dół od poziomu. Do moich zadań w projekcie należało przekonstruowanie części pomiarowej istniejącego stanowiska do badań efektywności termosyfonu pionowego w taki sposób, aby możliwie najdokładniej odzwierciedlić układ chłodzenia cewek magnesu R3D-Glad. Ze względu na ograniczenie gabarytowe istniejącego stanowiska zaproponowałem, aby układ modelu przewodów chłodzących cewki magnetycznej wykonać w postaci spirali. Dzięki temu uzyskano bardzo duża długość odcinka pomiarowego, wynoszącą ponad 4,2 m. Ponadto, dzięki kształtowi spiralnemu modelu rury chłodzącej, poprzez wymianę pionowego fragmentu linii zasilającej pętlę pomiarową na odcinki odpowiednio dłuższe lub krótsze, możliwe było łatwe uzyskiwanie różnych nachyleń rury chłodzącej, zarówno dodatnich, jak i ujemnych. Badany model pętli chłodzącej wyposażono w grzejnik elektryczny, dzięki czemu możliwe było badanie działania termosyfonu horyzontalnego dla różnych obciążeń cieplnych. Dodatkowo, doposażenie modelu rury chłodzącej w zestaw precyzyjnych czujników temperatury pozwoliło na określenie wahań temperatury powierzchni pętli chłodzącej w zależności od wielkości obciążenia cieplnego. Po produkcji i instalacji nowej części pomiarowej stanowiska, przeprowadziłem pierwsze testy efektywności i stabilności pracy termosyfonu o konfiguracji poziomej. Opis stanowiska pomiarowego oraz część wyników przeprowadzonych przeze mnie badań wstępnych przedstawiono w publikacji [II A6¹].

Konstrukcja, optymalizacja i analiza pracy dużych systemów kriogenicznych

Po zakończonym w 2008 roku kontrakcie w CEA Saclay i powrocie na Politechnikę Wrocławską w latach 2009 do 2012 uczestniczyłem w projekcie „*Opracowanie kriostatowania nadprzewodzących wnęk rezonansowych dla rentgenowskiego lasera na swobodnych elektronach XFEL podczas niskoprądowych testów elektrycznych w helu nadciekłym*”, realizowanym w ramach polskiego wkładu rzeczowego (In-Kind) do instalacji X-ray Free Electron Laser (XFEL), wybudowanego przy ośrodku naukowym DESY w Hamburgu, Niemcy. Więcej na temat udziału polskich instytucji naukowych i polskiego przemysłu w realizacji ww. wkładu In-Kind można znaleźć w publikacjach [II D4] i [II D16]. Moim zadaniem w projekcie, obok opisanego w części 4 c niniejszego wniosku zadania związanego z optymalizacją wymienników ciepła, było opracowanie

¹ Nr publikacji w tej części Autoreferatu odnosi się do poszczególnych punktów *Wykazu dorobku habilitacyjnego*, będącego Załącznikiem nr 3 niniejszego *Wniosku habilitacyjnego*

konstrukcji, obliczenia cieplne i procesowe, dobór elementów wykonawczych układu kontrolno - pomiarowego, wsparcie projektowe i technologiczne podczas procesu produkcji i instalacji oraz analiza wyników testów odbiorczych dwóch stanowisk XATC, służących do przeprowadzania testów odbiorczych i wydajnościowych nadprzewodnikowych wnęk rezonansowych dla akceleratora XFEL w warunkach nasyconego helu nadciętego. W trakcie dwupółrocznej kampanii pomiarowej przeprowadzono testy około 1000 wnęk rezonansowych, co wymagało ponad stukrotnego schłodzenia i wygrzania każdego z zaprojektowanych stanowisk pomiarowych. W tym czasie nie odnotowano żadnych awarii stanowisk mających wpływ na płynność prowadzenia kampanii pomiarowej.

Dodatkowym zadaniem grupy kriogenicznej Politechniki Wrocławskiej, wchodzących w zakres wkładu In-Kind do projektu XFEL, była dostawa 165-metrowej, czterokanałowej linii transferu helu XATL1, łączącej skraplarkę helu HERA z halą AMTF, przeznaczoną do prowadzenia testów wnęk rezonansowych i modułów akceleratora XFEL. W ramach tego zadania wykonałem optymalizację cieplną konstrukcji podpór rur procesowych i ekranu termicznego linii kriogenicznej oraz dokonałem optymalizacji ilości wielowarstwowej izolacji cieplnej dla poszczególnych elementów linii, w zależności od poziomu temperatur pracy tych elementów. Brałem również czynny udział w opracowaniu procedury i kryteriów akceptacji testów odbiorczych oraz współuczestniczyłem w analizie wyników pomiaru dopływów ciepła do rur procesowych i ekranu termicznego linii. Wyniki analizy prezentowane są w publikacji [II D5].

Doświadczenia zdobyte przy realizacji polskiego wkładu In-Kind do instalacji XFEL pozwoliły na wzięcie przeze mnie udziału w pracach związanych z konstrukcją kriogenicznej linii bocznikującej dla akceleratora SIS100 infrastruktury FAIR oraz z konstrukcją skrzyń podłączeń prądowych dla tegoż akceleratora. Obydwa zadania realizowane są przez grupę prof. Chorowskiego w ramach projektu pt. „Współpraca w ramach Krajowego Konsorcjum FEMTOFIZYKA w budowie, uruchomieniu i działaniu Europejskiego Ośrodka Badań Antyprotonami i Jonami”, finansowanego przez Uniwersytet Jagielloński. Prace te są związane z polskim wkładem rzeczowym (In-Kind) w infrastrukturę akceleratorową FAIR budowaną obecnie przy ośrodku naukowym GSI w Darmstadt, Niemcy. Do moich bezpośrednich zadań należy koordynacja prac koncepcyjnych i konstrukcyjnych, obliczenia termo – hydrauliczne i procesowe dla czynnych elementów sterowania i pomiaru strumieni masowych przepływu helu w rurach procesowych obydwu systemów, optymalizacja systemu izolacji termicznej oraz opracowanie strategii monitoringu parametrów termodynamicznych i elektrycznych pracy tych systemów. Częściowy opis tych prac jest przedmiotem publikacji [II D10]. Od 2016 roku w obydwóch zadaniach pełnię rolę kierownika projektu. Na początku 2016 roku Politechnika wrocławska dostarczyła do FAIR pierwszy, prototypowy moduł linii bocznikującej, zawierający w swojej konstrukcji większość rozwiązań konstrukcyjnych, które zastosowano w konstrukcji 27 pozostałych modułów linii. Po przeprowadzeniu testów cieplnych, mechanicznych i elektrycznych w warunkach kriogenicznych strona przyjmująca w pełni zaakceptowała dostarczony moduł oraz zaakceptowała wszystkie rozwiązania konstrukcyjne, zaproponowane przez Politechnikę Wrocławską.

Kolejnym systemem kriogenicznym, dostarczonym przez Politechnikę Wrocławską w ramach polskiego wkładu rzeczowego In-Kind do dużej infrastruktury naukowej, jest system dystrybucji helu do eliptycznej sekcji akceleratora liniowego ESS (European Spallation Source), budowanego obecnie w Lund, Szwecja. System ten składa się z 65-metrowej, czterokanałowej linii kriogenicznej, łączącej skraplarkę akceleratora z linią dystrybucyjną, która zawiera 30 modułów zasilających, łączących linię dystrybucyjną z

modułami kriogenicznymi akceleratora. Dodatkowym zadaniem grupy kriogenicznej Politechniki Wrocławskiej jest dostawa systemu kriogenicznego do stanowiska testów modułów eliptycznych akceleratora ESS, składającego się również z 4-o kanałowej linii transferu helu oraz z jednego modułu zasilającego testowany moduł kriogeniczny. Jako kierownik projektu zajmuję się koordynacją całości prac konstrukcyjnych, produkcyjnych i instalacyjnych. Brałem również czynny udział w optymalizacji cieplno – mechanicznej podpór wewnętrznych rur procesowych obydwu systemów, w doborze czynnych i biernych elementów automatyki kontrolno – pomiarowej parametrów przepływu helu w poszczególnych modułach zasilających, w analizie bezpieczeństwa pracy systemów oraz w doborze wymaganych rozmiarów zaworów bezpieczeństwa, chroniących poszczególne sekcje hydrauliczne obydwu systemów przed wzrostem ciśnienia powyżej parametrów projektowych. Ponadto dokonałem analizy możliwości wystąpienia niekorzystnego efektu oscylacji termo – akustycznych w przewodach hydraulicznych łączących elementy znajdujące się w temperaturze pokojowej z układami hydraulicznymi, zawierającymi hel o temperaturze kriogenicznej. Wyniki analizy, prezentowane w [II D8], pozwoliły na wskazanie tych przewodów, w których możliwe jest powstanie efektu oscylacji termo-akustycznych oraz zaproponowanie rozwiązań mitygujących ten efekt. W końcowej konstrukcji zastosowano zaproponowaną przeze mnie w artykule koncepcję zakotwiczenia termicznego przewodu hydraulicznego na poziomie temperatury pośredniej pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą procesową helu oraz zastosowano odpowiednio duże przekroje poprzeczne przewodów hydraulicznych zagrożonych efektem termo-oscylacji.

W latach 2015 – 2016 brałem udział w pracach związanych ze studium wykonalności systemu kriogenicznego akceleratora kołowego Future Circular Collider (FCC), planowanego do przyszłej realizacji przez ośrodek naukowy CERN. Więcej informacji nt. systemu kriogenicznego akceleratora FCC można znaleźć w publikacji [II D7]. Zadaniem grupy kriogenicznej Politechniki Wrocławskiej w pracach koncepcyjnych było określenie wpływu różnych opcji konstrukcji systemu na dopływy ciepła do rur procesowych systemu dystrybucji kriogenicznej. Jako opcje konstrukcyjne brano pod uwagę m. in. podniesienie nominalnego ciśnienia helu w pętli chłodzenia ekranu termicznego z typowego poziomu 20 bar do poziomu 50 bar, co znacznie obniży straty ciśnienia na przepływie helu. Ponadto, analizowano możliwość wykorzystania rur procesowych wykonanych z Inwaru (materiału o bardzo małym współczynniku rozszerzalności cieplnej) zamiast ze stali nierdzewnej (typowe rozwiązanie konstrukcyjne w podobnych systemach). Wyniki analizy, przedstawionej w [II A3], pokazały, że przy wykorzystaniu Inwaru jako materiału rur procesowych systemu dystrybucji i nawet dla opcji 50 bar ciśnienia helu w obwodzie chłodzenia ekranu termicznego, ilość ciepła dopływającego do rur procesowych będzie mniejsza o około 20% w porównaniu z opcją z wykorzystaniem rur procesowych ze stali nierdzewnej. Wynika to z faktu, że w przypadku rur procesowych wyprodukowanych z Inwaru nie ma potrzeby stosowania elementów kompensujących skurcze termiczne rur procesowych (np. mieszkań kompensacyjnych lub węży elastycznych), jak ma to miejsce w przypadku zastosowania innych materiałów rur. Dzięki temu system podpór rur procesowych nie musi przenosić dużych sił osiowych, wynikających z niezbilansowanej powierzchni bocznej mieszkań kompensacyjnych i działających na nie wysokich ciśnieniach, przez co wymagana ilość podpór jest mniejsza oraz ich konstrukcja jest mniej masywna w porównaniu z rozwiązaniami dla rur ze stali nierdzewnej. Ponadto, analizy wykazały, że brak w konstrukcji systemu dystrybucji kriogenicznej mieszkań kompensacyjnych znacznie podnosi niezawodność pracy takiego systemu, co wynika z faktu, iż poziom awaryjności mieszkań kompensacyjnych

jest ponad 10-o krotnie wyższy niż poziom awaryjności połączeń spawanych rur ciśnieniowych.

Od października 2018 jestem głównym wykonawcą projektu koncepcyjnego (wykonywanego przez Politechnikę Wrocławską) systemu dystrybucji helu dla akceleratora *Proton Improvement Plan-II* (PIP-II), mającego na celu produkcję wysokoenergetycznej wiązki protonów o dużej intensywności na potrzeby różnych eksperymentów, realizowanych na terenie ośrodka naukowego Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), Batavia, USA. System ma się składać z modułu dystrybucyjnego, współpracującego ze skraplarką helową, 5-o kanałowej linii kriogenicznej, transferującej hel od modułu dystrybucyjnego do znajdującego się w tunelu akceleratora systemu zasilania 26-u modułów kriogenicznych akceleratora. Całość systemu będzie zakończona modułem zawracającym, regulującym przepływ helu przez system dystrybucji. W tym projekcie jestem odpowiedzialny za opracowanie koncepcji pracy instalacji oraz obliczenia procesowe.

Obok zagadnień związanych z kriogenicznymi instalacjami helowymi, zajmowałem się również instalacjami wykorzystującymi skroplony gaz ziemnym (LNG) o normalnej temperaturze wrzenia wynoszącej, w zależności od składu, około 120 K. Duże zainteresowanie LNG w ostatnich latach wynika m.in. z faktu, że LNG postrzegany jest jako ekologiczne paliwo energetyczne. LNG zaczyna być również stosowany jako paliwo napędów w transporcie ciężkim, szczególnie w napędach transportów morskich. Zainteresowanie takimi aplikacjami LNG wymuszone zostało przez przepisy Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO), która konwencją MARPOL wprowadziła specjalne strefy na akwenach morskich (ECA), objętych od 2008 roku obniżoną emisją tlenków azotu i tlenków siarki. Od 2010 roku w portach Unii Europejskiej oraz od 2015 roku w strefach ECA, emisja tlenków siarki jest ograniczona do 0.1%. Spośród dostępnych rozwiązań, spełniających wymagania konwencji MARPOL, najkorzystniejszym pod względem ekonomicznym i technicznym okazuje się zastosowanie gazu ziemnego do napędów silników okrętowych, który przechowuje się w obrębie jednostki morskiej w postaci skroplonej.

W latach 2013 – 2014, w ramach dwóch projektów: „*Opracowanie koncepcji oraz projektu technicznego instalacji tankowania i zgazyfikowania skroplonego gazu ziemnego do napędu silników okrętowych*” oraz „*Model termo-mechaniczny i projekt techniczny zbiornika do przechowywania skroplonego gazu ziemnego do napędu silników okrętowych*” na zlecenie Fabryki Urządzeń Okrętowych z Rumii (obecnie Remontowa LNG Systems), koordynowałem prace grupy kriogenicznej Politechniki Wrocławskiej mające na celu konstrukcję pierwszego polskiego systemu gazowego na potrzeby napędu silników okrętowych. System został zainstalowany na pokładzie promu Samsø Ferry, wyprodukowanego w Gdańskiej stoczni Remontowa na zlecenie armatora duńskiego, pod nadzorem norweskiego towarzystwa kwalifikacyjnego DNV-LG. Obok koordynacji prac nad konstrukcją instalacji gazowej oraz kriogenicznego zbiornika do przechowywania LNG o pojemności 40m³, na etapie prac konstrukcyjnych do moich bezpośrednich obowiązków należało opracowanie koncepcji działania systemu, opracowanie schematu hydrauliczno – instrumentacyjnego (P&ID), dobór zaworów bezpieczeństwa, opracowanie planu testów produkcyjnych i odbiorczych systemu, dobór elementów czynnych systemu automatyki pod kątem wymagań towarzystwa kwalifikacyjnego, opracowanie systemu izolacji termicznej zbiornika LNG oraz konstrukcja i obliczenia cieplne wymienników ciepła do regazyfikacji LNG i dla systemu

budowania ciśnienia w zbiorniku LNG. Świadczyłem również wsparcie projektowe w trakcie produkcji elementów systemu, jego instalacji na pokładzie jednostki oraz podczas odbiorczych prób lądowych i morskich. Uproszczony schemat P&ID oraz zdjęcia opracowanego przez Politechnikę Wrocławską systemu gazowego do napędów silników promu Samsø Ferry przedstawiono w publikacjach [II D11] i [II D14].

Analizy bezpieczeństwa dużych instalacji kriogenicznych

Poza pracami związanymi z polskim wkładem In-Kind do instalacji XFEL, w latach 2011 – 2013 w ramach zlecenia „*Simulation study of Helium release into the XFEL tunnel*”, brałem udział w pracach związanych z symulacją wycieku helu do tunelu akceleratora XFEL, zleconych przez ośrodek DESY. W ramach prac uczestniczyłem w identyfikacji potencjalnych scenariuszy awarii akceleratora XFEL, opracowałem dynamiczny model cieplno-hydrauliczny przepływu helu dla sekcji akceleratora podlegającej awarii, oraz określiłem strumień masowy oraz temperaturę helu wydostającego się ze zbiornika próżniowego do przestrzeni tunelu akceleratora w zależności od średnicy hydraulicznej pęknięcia jednej z rur procesowych systemu kriogenicznego we wnętrzu akceleratora. Na podstawie prędkości i średniej temperatury helu propagującego wydłuż tunelu akceleratora określiłem również temperatury, do jakich mogą się wychłodzić zawiesia akceleratora, co pozwoliło na dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych takich zawiesi. Wyniki symulacji i obliczeń zawarte są w raporcie [II E3].

W latach 2011 – 2013 grupa kriogeniczna Politechniki Wrocławskiej brała udział w projekcie „*Large Apparatus for Grand Unification, Neutrino Astrophysics, and Long Baseline Neutrino Oscillations (LAGUNA-LBNO)*”, realizowany przez zespół czterdziestu międzynarodowych instytucji naukowych i partnerów przemysłowych w ramach 7-go Ramowego Projektu Unii Europejskiej. Projekt miał na celu przeprowadzenie studium wykonalności oraz opracowanie szczegółowego projektu koncepcyjnego detektora Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment (GLACIER) o pojemności 70 kton skroplonego argonu, umieszczonego na głębokości ponad 100 m w fińskiej kopalni miedzi Pyhäsalmi. Budowa tak dużego detektora miała być poprzedzona budową tzw. Pilota o pojemności 3.8 kton skroplonego argonu. Skroplony argon miałby być transportowany w cysternach kriogenicznych o pojemności 20 m³ znajdującym się we wnętrzu kopalni tunelem transportowym, którego średnie nachylenie wynosi 14.3% a całkowita droga od wjazdu do kopalni do lokalizacji detektora pilotażowego ma długość ok 10.5 km. W przypadku kolizji cysterny np. ze ścianą tunelu lub z innym pojazdem, istnieje ryzyko wycieku do przestrzeni tunelu dużej ilości przewożonego argonu. W tym wypadku może powstać chmura gazowego argonu, o zaniżonej koncentracji tlenu, co może stanowić zagrożenie nie tylko dla osób znajdujących się w bezpośredniej bliskości awarii cysterny, ale też dla innych osób przebywających w tunelu, z dala od miejsca kolizji. Moim zadaniem w projekcie było określenie prawdopodobieństwa zaistnienia incydentu, polegającego na wydostaniu się skroplonego argonu ze zbiornika kriogenicznego cysterny do przestrzeni tunelu, określenie najbardziej prawdopodobnego rozmiaru pęknięcia zbiornika kriogenicznego w trakcie incydentu, określenie strumienia masowego skroplonego argonu wypływającego z przez takie pęknięcie oraz określenie powierzchni, na której nastąpi pełne odparowanie skroplonego argonu. Na tej podstawie dokonano symulacji propagacji chmury gazowego argonu wzdłuż tunelu oraz określono rozkład koncentracji tlenu w chmurze argonowej w zależności od prędkości przepływu powietrza wentylującego tunel. Następnie opracowano rekomendacje dotyczące warunków wentylacji tunelu i zachowania się personelu w przypadku wystąpienia incydentu oraz

dotyczące zastosowania dodatkowej odzieży ochronnej dla kierowców cystern jak i dla ekip ratunkowych. Wyniki prac Politechniki Wrocławskiej w projekcie zaprezentowano w publikacjach [II A2] i [II D9].