

RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Dudy
pt. „Termo-hydrauliczno-mechaniczna optymalizacja konstrukcji rurociągów do
przesyłu wybranych płynów kriogenicznych”**

1. Informacje ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Macieja Chorowskiego. Pracę opublikowano jako raport serii PREPRINT nr 5/2017 na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

Recenzję opracowano w oparciu o decyzję Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego PWr z dnia 05.07.2017 r.

Praca doktorska została przedstawiona na 147 stronach i zawiera dziewięć rozdziałów, które poprzedza spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie. Dysertacja zawiera 82 pozycje rysunków i 32 pozycje tabel oraz wykaz literatury - 116 pozycji.

2. Omówienie treści pracy

Pracę rozpoczyna spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń. Zawarto, także dwustronicowe streszczenie, które w zwięzłej formie przedstawia motywację do pracy, zawartość pracy oraz konkluzje wynikające z analizy linii kriogenicznej zaprojektowanej w ramach dysertacji. (Linia została zaprojektowana głównie na potrzeby ośrodka naukowego DESY w Hamburgu w celu zasilania stanowisk testowych elementów lasera XFEL *European X-ray Free Electron Laser*.)

W obszernym rozdziale drugim (22 strony), zatytułowanym *Wstęp*, Autor opisuje wpływ zużycia gazów technicznych, takich jak azot, tlen, argon, wodór, dwutlenek węgla oraz gaz ziemny na rozwój gospodarczy państw. Stwierdza, że konsumpcja wyszczególnionych gazów pozostaje w ścisłej korelacji z produktem krajowym brutto

(PKB). Następnie praca skupia się na kategoryzacji gazów i zbiorników w kontekście zwiększenia gęstości gazów w funkcji sprężenia do wysokich ciśnień lub skroplenia, celem ułatwienia i obniżenia kosztów ich transportu oraz przechowywania. Z analiz wynika, że *ciekłe gazy charakteryzują się największą gęstością przy ograniczonych gabarytach zbiornika. Zauważa oczywisty fakt, że istotnym parametrem ... jest ciepło parowania oraz jakość izolacji cieplnej zastosowanej w zbiornikach lub rurociągach kriogenicznych.*

W podrozdziale 2.1 pt. *Wykorzystanie rurociągów jednokanałowych do transportu ciekłych gazów*, Doktorant opisuje podstawowe elementy konstrukcyjne występujące w jednokanałowych modułarnych rurociągach kriogenicznych. Opisuje sposoby kompensacji w celu ograniczenia naprężeń termicznych, np. poprzez wykorzystanie kształtu rurociągu oraz mieszków kompensacyjnych. Następnie skupia się na ważnym elemencie, analizowanym również w dalszej części pracy, czyli podporach przesuwnych, mających za zadanie *ograniczenia ruchu promieniowego rury procesowej do dopuszczalnej wartości*. Podrozdział ten kończy analizą łączenia modułów kriogenicznych linii jednokanałowych poprzez demontowalne (skręcane) złącze bagnetowe oraz spawalne złącze komorowe. W rozdziale 2.2 pt. *Przykłady zastosowania rurociągów jednokanałowych* Doktorant opisuje największe instalacje przemysłowe, w których zastosowano rurociągi jednokanałowe głównie do transportu LNG oraz azotu. W przypadku helu linie te nazywane są lewarem, a ich długość dochodzi zazwyczaj do 5 m.

W osobnym podrozdziale 2.3 pt. *Transport helu w wielokanałowych rurociągach kriogenicznych* wprowadza się czytelników dysertacji w zagadnienia związane z transportem helu na większe odległości specjalnymi rurociągami wielokanałowymi, które są głównym przedmiotem niniejszej rozprawy. Zaprezentowano schemat dystrybucji helu do modułów kriogenicznych oraz określono pola pokazujące parametry termodynamiczne helu na przykładzie zasilania akceleratora liniowego budowanego w ESS-Lund.

Przegląd istniejących konstrukcji wielokanałowych rurociągów kriogenicznych przedstawiony został w podrozdziale 2.4. W sumie przeanalizowano 13 zbudowanych lub planowanych wielokanałowych helowych linii kriogenicznych. Analiza dotyczyła parametrów termodynamicznych oraz geometrycznych, jak ilość rur procesowych, długości linii czy konfiguracja rozmieszczenia poszczególnych linii przesyłowych.

W jednym z końcowych podrozdziałów Autor dysertacji opisuje *Stany awaryjne występujące w kriogenicznych liniach przesyłowych*. Stany te mogą wystąpić w wyniku utraty próżni wynikającej z uszkodzenia płaszcza próżniowego. W takim przypadku należy przeanalizować pod kątem bezpieczeństwa skutki utraty szczelności rury procesowej wypełnionej helem w stanie gazowym oraz ciekłym. W ostatnim podrozdziale 2.6 Doktorant *podsumowuje zagadnienia związane z kriogenicznymi liniami wielokanałowymi* opisując bezpieczeństwo użytkowania, sprawność termodynamiczną i hydrauliczną, wytrzymałość mechaniczną i niezawodność.

Rozdział 3 (17 stron) pt. *Wykorzystanie drugiej zasady termodynamiki w optymalizacji urządzeń cieplno-przepływowych* w głównej mierze skupia się na aspektach teoretycznych istotnych dla omawianego zagadnienia. We wstępie definiuje podstawowe wielkości termodynamiczne jak: ciepło dostarczone do i oddane z układu, praca obiegu oraz sprawność cieplna. Cytuje drugą zasadę termodynamiki sformułowaną przez Plancka oraz przytacza relacje pomiędzy stosunkiem ciepła dostarczonego a oddanego do obiegu, zależnym tylko od temperatury źródeł ciepła zgodnie z relacją Kelvina. Dalej Doktorant opisuje pojęcie entropii zdefiniowanej przez Clausiusa i wykorzystując relacje wynikające z pierwszej zasady termodynamiki definiuje pojęcie entropii dla układu otwartego oraz zamkniętego.

W podrozdziale 3.1 Autor dysertacji opisuje *Prawo Gouya-Stodoli*. W części tej podejmuje dywagacje na temat zjawisk związanych z nieodwracalnością przemian termodynamicznych mających wpływ na przyrost entropii w szczególności na pracę przemiany. Podrozdział kończy się stwierdzeniem, że *dzięki wyznaczeniu przyrostów entropii i wykorzystaniu prawa Gouya-Stodoli możliwa stała się ocena jakościowa i porównawcza procesów cieplno-przepływowych*.

W podrozdziale 3.2 pt. *Analiza egzergiczna* przeanalizowano i wyjaśniono pojęcie egzergii, konkludując, że parametr ten jest przydatny w czasie optymalizacji konstrukcji, bowiem *strata egzergii wywołuje zmniejszenie efektów użytecznych procesu lub zwiększenie zużycia środków napędowych*.

Przykłady wykorzystania analizy entropowej zostały przedstawione w podrozdziale 3.3. W pierwszej kolejności w podrozdziale 3.3.1 pt. *Wykorzystanie analizy entropowej dla przepływów w kanałach* podany jest przykład zastosowania tytułowej analizy do modelowania transportu ciepła i masy w przepływie laminarnym dla oleju silnikowego, wody oraz freonu w kanale okrągłym. Inny przykład został opisany w podrozdziale 3.3.2 i dotyczył *Wykorzystania analizy entropowej dla wyznaczania strat związanych z*

procesami przekazywania ciepła i masy. Autor powołuje się na 7 pozycji literaturowych, w których wykorzystano analizę entropową. Przykłady optymalizacji procesów cieplno-przepływowych, np. Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji i oceny konstrukcji urządzeń cieplno – przepływowych (3.3.4.1), Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji i oceny wymienników ciepła (3.3.4.2), Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji bromo-litowej chłodziarki absorpcyjnej (3.3.4.3), Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji silników cieplnych (3.3.4.4), Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji urządzeń kriogenicznych (3.3.4.5) czy Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji systemów wspomagania ogrzewania domów wykorzystujących materiały zmiennie-fazowe (3.3.4) przedstawiono w podrozdziale 3.3.3 pt. Wykorzystanie analizy entropowej dla optymalizacji i oceny urządzeń cieplno-przepływowych.

Podsumowanie przeglądu literatury dotyczącej przykładów wykorzystania metody minimalizacji entropii przeprowadzono w podrozdziale 3.3.5. W tej części pracy bazując na analizie światowej literatury Autor definiuje algorytm postępowania w przypadku poszukiwania konstrukcji optymalnej pod kątem entropowym. Określa także bardzo przydatny w analizie entropowej parametr, tzw. wskaźnik entropowy, który jest stosunkiem rzeczywiście wygenerowanej entropii do minimalnego strumienia entropii, jaki musi zostać wygenerowany podczas pracy konkretnego systemu.

W rozdziale czwartym (1 strona) Doktorant formułuje cele, tezy oraz zakres dysertacji. Wyznacza trzy cele rozprawy, tzn. „przeгляд konstrukcji jedno- i wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych z uwzględnieniem konstrukcji własnych autora, opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na wykorzystanie metody minimalizacji entropii do termo-hydrauliczno-mechanicznej optymalizacji rurociągów kriogenicznych, opracowanie wytycznych i zaleceń do projektowania kriogenicznych linii przesyłowych w oparciu o wyniki uzyskane na drodze optymalizacji”. Teza, jaką postawił Autor, została sformułowana następująco: *Ponieważ projektowanie kriogenicznych rurociągów jedno- i wielokanałowych wiąże się z koniecznością jednoczesnego uwzględnienia sprzecznych funkcji celu, poszukuje się termodynamicznego wskaźnika, który obejmuje wszystkie zagadnienia mające wpływ na konstrukcję, bezpieczeństwo i parametry cieplno-przepływowe rurociągu. W procesie projektowania i optymalizacji linii kriogenicznych można wykorzystywać drugą zasadę termodynamiki, pozwalającą na globalną ocenę nieodwracalności wynikających z*

nieporównywalnych parametrów. Zakres pracy doktorskiej został opisany w dwunastu punktach, które pokrywają się z rozdziałami zawartymi w dysertacji.

W rozdziale piątym pt. *Optymalizacja jednokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych* (25 stron) Autor analizuje w szczególności proces optymalizacyjny wspomnianych linii. W podrozdziale 5.1 pt. *Źródła entropii w jednokanałowych kriogenicznych liniach przesyłowych* Autor stwierdza, że w *rurociągach kriogenicznych wzrost entropii wynika z dwóch procesów: dławienia czynnika podczas przepływu przez rurę procesową oraz wymiany ciepła pomiędzy elementami charakteryzującymi się różnymi temperaturami*. Następnie szczegółowo opisuje strumień entropii generowany na skutek różnicy temperatury między czynnikiem kriogenicznym a otoczeniem. Także w tej części pracy scharakteryzowano ogólnie mechanizm przekazywania ciepła w jednokanałowej linii kriogenicznej zwłaszcza w tzw. połączeniu bagnetowym. Szczegółową analizę dopływów ciepła w jednokanałowych liniach kriogenicznych przedstawiono w rozdziale 5.2. W pierwszej kolejności w podrozdziale 5.2.1 opisano *Przepływ ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową*, zwaną również superizolacją. Korelacje opisujące procesy wymiany ciepła przedstawiono w podrozdziale 5.2.1.1, dotyczyły one przede wszystkim powierzchni cylindrycznych oraz materiałów izolacyjnych zastosowanych przy produkcji.

W podrozdziale 5.2.2 pt. *Przepływ ciepła przez podpory w kriogenicznych rurociągach jednokanałowych* poddano analizie jeden z mechanizmów przepływu ciepła, jakim jest przewodzenie. W podrozdziale 5.2.2.1 został zdefiniowany strumień ciepła dopływającego do czynnika kriogenicznego przez męską i żeńską część złącza bagnetowego. Podano także typoszereg złączy bagnetowych w funkcji kanału przepływowego stosowanego powszechnie w urządzeniach kriogenicznych. Kolejnym elementem poddanym analizie były podpory przesuwne (podrozdział 5.2.2.2). Za pomocą metody elementów skończonych Autor zanalizował dwa typy podpory: z wykorzystaniem płaskich płytek oraz z wykorzystaniem trzpieni. Analizy pokazały, że podpora wykonana z płaskiej płytki charakteryzuje się mniejszymi dopływami ciepła. Także w tym rozdziale stwierdzono, że *korzystniejszym rozwiązaniem jest zainstalowanie mieszka kompensacyjnego zaraz przy złączu bagnetowym, które stanowi podporę stałą i bardzo dobrze usztywnia rurę procesową*. Ostatnią składową poddaną analizie w podrozdziale 5.2.2.3 jest *Wpływ wartości strzałki ugięcia rury procesowej na dopływy ciepła przez podpory ślizgowe*. Autor podaje ogólne równania związane z wytrzymałością, tzn. maksymalnej strzałki ugięcia oraz wynikającej z niej maksymalnej

odległości między kolejnymi podporami. Autor rozprawy stwierdza, że dla zapewnienia większej stabilności mechanicznej rurociągu konieczne jest zastosowanie większej ilości podpór, co z kolei powoduje większe strumienie ciepła będące konsekwencją przewodzenia przez te elementy.

Rozdział 5.3 pt. *Opory przepływu jako źródła entropii w liniach kriogenicznych* omawia zjawisko produkcji entropii będące konsekwencją występowania pola prędkości. Analizy dotyczą przepływów laminarnych oraz turbulentnych w układzie cylindrycznym. Ostatecznie została w tym podrozdziale podana zależność na generowany strumień entropii wynikający z liniowych i miejscowych strat ciśnienia. W podrozdziale 5.4 pt. *Źródła entropii w jednokanałowych kriogenicznych liniach przesyłowych – podsumowanie* zaprezentowano przykład obliczeniowy dwóch 12metrowych modułów połączonych za pomocą złącza bagnetowego. Wyniki obliczeń zilustrowano na wykresach, na których na osiach odciętych zostały pokazane charakterystyczne punkty lub odległość rurociągu, a na osiach rzędnych poziom entropii generowanej na skutek dopływów ciepła oraz spadku ciśnienia.

W dalszej części rozdziału w podrozdziale 5.5 *Przykład optymalizacji jednokanałowej linii przesyłowej* Autor rozpatruje zależności strumieni generowanej entropii od średnicy rury procesowej w rurociągu przesyłającym przechłodzony azot, a także analizuje produkowany strumień entropii w funkcji liczby Reynoldsa.

Podsumowanie rozdziału piątego stanowi podrozdział 5.6.

Kolejny rozdział - szósty - dotyczy *Wielokanałowych rurociągów kriogenicznych*. Rozdział rozpoczyna się od omówienia wielokanałowej linii kriogenicznej na przykładzie linii zasilającej chłodziarki satelitarne akceleratora Tervatron, opisuje także rolę tych linii w instalacjach kriogenicznych. Podrozdział 6.1 pt. *System podpór wykorzystanych w rurociągach wielokanałowych* szczegółowo charakteryzuje wspomniane elementy konstrukcyjne. Doktorant wyróżnił następujące podpory:

- *Podpory ekranów radiacyjnych w wielokanałowych liniach kriogenicznych*, (podrozdział 6.1.1), podzielone na:
 - o Podpory ustalające ekranów radiacyjnych (6.1.1.1)
 - o Podpory przesuwne ekranów radiacyjnych (6.1.1.2)
- *Podpory rur procesowych w wielokanałowych liniach kriogenicznych* (6.1.2), podzielone na:
 - o Podpory ustalające dla rur procesowych (6.1.2.1)
 - o Podpory przesuwne dla rur procesowych (6.1.2.2)

Podstawy teoretyczne mechanizmu wymiany ciepła na drodze promieniowania oraz wpływ zastosowania superizolacji w wielokanałowych liniach kriogenicznych, Autor przedstawił w podrozdziale 6.2 pt. *Zasadność stosowania ekranów radiacyjnych w instalacjach kriogenicznych.*

Rozwiązania techniczne ekranów, stosowane głównie w linach do transportu helu, przedstawiono w podrozdziale 6.3. Ekranu muszą być połączone z elementami przesyłowymi w celu uzyskania odpowiedniej temperatury i w konsekwencji zmniejszenia strat cieplnych. Takimi rozwiązaniami są specjalne profile aluminiowe oraz elastyczne elementy termalizacyjne.

Podrozdział 6.4 dotyczy *Optymalizacji temperatury ekranu metodą minimalizacji generowanej entropii.* Ekranu takie są stosowane w kriogenicznych liniach przesyłowych transportujących hel. Jak wykazuje Autor, *bardzo istotnym parametrem mającym wpływ na efektywność działania ekranu radiacyjnego jest jego temperatura.* W dalszej części został omówiony sposób działania czynnego ekranu radiacyjnego, materiały stosowane w dla tych elementów w technice kriogenicznej. Bazując na zależnościach matematycznych przedstawionych we wcześniejszej części dysertacji, Autor pokazuje, jak można zoptymalizować linie kriogeniczną pod kątem minimalizacji strat cieplnych wynikających z nieodwracalności powstałych na skutek promieniowania w funkcji temperatury ekranu radiacyjnego. Końcowym efektem procesu optymalizacyjnego jest wykres pokazujący optymalne wartości temperatury ekranu radiacyjnego w funkcji stosunku powierzchni ekranu i rur procesowych dla wartości temperatury wynoszącej 4.5 K.

Wpływ wartości ciśnienia na pracę linii kriogenicznej przedstawiono w podrozdziale 6.5 pt. *Wpływ zwiększenia ciśnienia projektowego na konstrukcję i sprawność wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych na przykładzie linii zasilającej akcelerator FCC – Future Circular Collider.* Po wstępie, zawierającym opis wspomnianej instalacji, Autor rozpatruje kilka wariantów budowy linii, które mogą być wykonane z różnych materiałów oraz mieszków kompensacyjnych:

- *Model linii kriogenicznej z rurami procesowymi wykonanymi ze stali austenitycznej i mieszkami kompensacyjnymi (6.5.1)*
- *Model linii kriogenicznej z rurami procesowymi wykonanymi ze stali austenitycznej i długimi mieszkami kompensacyjnymi (6.5.2)*
- *Model linii kriogenicznej z rurami procesowymi wykonanymi z Invaru® (6.5.3)*

Podsumowanie wpływu zwiększenia ciśnienia projektowego na konstrukcję 50-metrowego odcinka kriogenicznej linii przesyłowej oraz sprawność wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych przeprowadzono w podrozdziale 6.5.4. Finalnie Autor stwierdza, że najlepszym rozwiązaniem jest budowa przesyłowych linii kriogenicznych wykonanych z Invaru®, ze względu na niższe dopływy ciepła, wynikające z mniejszej ilości zastosowanych mieszek kompensacyjnych oraz bardzo dobre właściwości mechaniczne, tzn. wysoki moduł Younga, co przekłada się na mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia awarii.

Rozdział siódmy (27 stron) dotyczy *Wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych* zaprojektowanych dla rurociągu XATL1 na potrzeby budowy superlasera XFEL (*The European X-ray Free Electron Laser*). Podrozdziały 7.1 pt. *Lokalizacja i przebieg wielokanałowej linii kriogenicznej XATL1* oraz 7.2 pt. *Budowa modułowa i parametry projektowanej linii XATL1* opisują podstawowe parametry projektowanej linii ze względu na lokalizację oraz wymagane warunki techniczne, głównie temperaturę na poszczególnych elementach rurociągu. Dokładny opis konstrukcji zaproponowanej linii został przedstawiony w podrozdziale 7.3 pt. *Budowa wewnętrzna linii XATL1*. Autor analizuje podpory linii procesowej występujące w modułach liniowych jak: lekka podpora ustalająca, pojedyncza podpora przesuwna czy podwójna podpora przesuwna. Następnie przechodzi do opisów podpór ekranu radiacyjnego występujących w modułach liniowych jak: lekka podpora ustalająca oraz podpora przesuwna z trzpieniem dystansowym.

Wykorzystanie drugiej zasady termodynamiki do oceny linii XATL1 Doktorant przedstawił w podrozdziale 7.4. Opis tego rozdziału rozpoczął od *schematu opomiarowania linii XATL1* (podrozdział 7.4.1), Zaprezentował wyniki pomiarów wykonanych podczas rozruchu i pracy linii XATL1 (7.4.2), uzyskane dla pętli chłodzenia ekranu radiacyjnego „40 K” i „80 K” (7.4.2.1). Na podstawie danych pomiarowych wyznaczył wartości strumieni i straty mocy użytecznej dla pętli „40 K”/„80 K”. Podobne procedury jak dla linii „gorącej” zostały przeprowadzane dla linii „zimnej”, czyli „4.5 K”/„5 K”. Także i dla tego przypadku zostały zaprezentowane wyniki pomiarów (7.4.2.3) i wyznaczone strumienie entropii i straty mocy użytecznej (7.4.2.4). Całość analiz linii „gorącej” oraz „zimnej” podsumowano w podrozdziale 7.4.3 pt. *Wyznaczenie strumieni entropii i straty mocy użytecznej na podstawie danych zawartych w specyfikacji linii kriogenicznej XATL1*. Z porównania wartości strat mocy użytecznej w rurach procesowych linii kriogenicznej dla parametrów zmierzonych

i zawartych w specyfikacji wynika, że zaprojektowana linia charakteryzuje się niższą wartością straty mocy użytecznej, która wynosi 4.11 kW w porównaniu z wartością założoną w specyfikacji równą 4.8 kW.

Cieplno-mechaniczna optymalizacja systemu podpór rurociągów kriogenicznych na przykładzie rurociągu XATL1 jest tematem podrozdziału 7.5. Autor zastanawia się nad wpływem strzałki ugięcia rur procesowych na generowane strumienie entropii (7.5.1) oraz za pomocą analizy FEM wykonanej w środowisku Ansys Workbench 13.0 określa strumienie ciepła dopływające do rur procesowych przez podpory przesuwne (7.5.2). Bazując na wcześniejszych analizach Doktorant wyznacza sumaryczne strumienie entropii generowane na skutek dopływów ciepła przez podpory przesuwne w przypadku 24 metrowego odcinka kriogenicznej linii wielokanałowej (7.5.3). Dalej przedstawiono wykorzystanie metody entropowej do porównania rozwiązań konstrukcyjnych silnej podpory ustalającej (7.5.4), jak również wykorzystano metodę entropową do poprawy konstrukcji lekkiej podpory ustalającej (7.5.5). Ostatnimi elementami poddanymi analizie są podpory przesuwne ekranu radiacyjnego (7.5.6). Całość analiz zebrano w podrozdziale 7.5.7 pt. *Podsumowanie analizy entropowej podpór wykorzystanych w wielokanałowej linii kriogenicznej XATL1*.

Ósmy rozdział dysertacji (3 strony) stanowią *Podsumowanie i wnioski wynikające z pracy*.

W rozdziale dziewiątym podano wykaz literatury (107 pozycji) oraz stron internetowych (9 pozycji), głównie w języku angielskim. Większość to publikacje wydane zaledwie kilka lat temu.

3. Ocena pracy

3.1. Wybór tematu rozprawy

Istniejące już lub powstające obecnie duże infrastruktury badawcze, w których występuje potrzeba utrzymania urządzeń w temperaturach kriogenicznych, wymagają budowy infrastruktury wspomagającej. Jednym z jej elementów jest/może być wielokanałowa linia kriogeniczna do przesyłu czynników kriogenicznych w zakresie temperatur pomiędzy 1.7 – 100 K. Do takich ośrodków należą: TORE SUPRA – CEA/Cadarache, Francja – 0.1 km, TEVATRON – FERMILAB/Batavi, USA – 6.5 km, HERA – DESY/Hamburg, Niemcy – 6.4 km, LHC – CERN/Genewa, Szwajcaria – 26.4 km, KEKB – KEK/Tsukuba, Japonia – 1.0 km, XFEL – DESY/Hamburg, Niemcy –

0.34 km. ITER – IO/Cadarache, Francja – 3.5 km, FAIR – GSI/Darmstadt, Niemcy – 2 km oraz ESS – Lund, Szwecja.

Analizowane linie muszą spełnić trzy kryteria, które często pozostają w sprzeczności ze sobą i są to:

1. Bezpieczeństwo użytkowania, tzn. powinny być tak zaprojektowane, aby gwarantować bezpieczeństwo obsługi i otoczenia podczas każdego z możliwych scenariuszy awarii. Konieczne jest zastosowanie odpowiedniej liczby i jakości zaworów bezpieczeństwa.
2. Minimalizacja strat cieplnych oraz strat hydraulicznych, co jest związane z zapewnieniem izolacji, najczęściej próżniowej, zastosowaniem materiałów o niskich współczynnikach przewodzenia ciepła oraz niskim współczynnikiem odgazowania próżni, zapewnieniem niskich spadków ciśnienia przepływającego czynnika oraz opracowaniem taniego i sprawnego sposobu chłodzenia ekranów radiacyjnych.
3. Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej i jednocześnie niezawodności, co można osiągnąć poprzez gwarancję założonej wartości strzałki ugięcia rur procesowych i płaszczu próżniowego, zapewnienie odpowiedniej kompensacji skurczu termicznego, stabilny system podparcia dla rur procesowych, ekranu radiacyjnego i płaszczu próżniowego, odpowiednią grubość ścianek wspomnianych rur.

Jak zauważył Doktorant w dysertacji, istnieje wiele parametrów związanych z rurociągami kriogenicznymi, które są kluczowe dla zapewnienia stabilnej, ekonomicznie opłacalnej i bezpiecznej pracy rurociągu. *Nie można poprawiać parametrów mechanicznych podpór, nie badając jednocześnie ich właściwości związanych z przewodzeniem ciepła i wpływem na mieszki kompensacyjne. Dobór średnic i grubości ścianek rur procesowych musi uwzględnić zarówno parametry hydrauliczne, cieplne oraz mechaniczne, w celu zapewnienia wymaganej wytrzymałości i stabilności pracy rurociągu.* Wydaje się, że najbardziej naturalnym parametrem mogącym uwzględnić te sprzeczne czasami kryteria jest produkcja entropii, a dokładnie minimalizacja tego parametru.

Kompleksowe podejście do problemu poprzez połączenie wiedzy z wielu obszarów, jak termodynamika, mechanika płynów, wytrzymałość oraz eksploatacja i bezpieczeństwo jest niewątpliwie atutem tej rozprawy, dlatego wybór tematu pracy doktorskiej uważam za trafny i ważny z naukowego oraz przede wszystkim z aplikacyjnego punktu

widzenia. Temat stworzył również możliwość wykazania się umiejętnościami technicznymi i badawczymi.

3.2. Metodologia prowadzonych badań

Warsztat badawczy Doktoranta składał się głównie z analiz teoretycznych. Analizy te przeprowadzone były przede wszystkim przy użyciu środowiska Ansys Workbench 13.0 oraz samodzielnie opracowanych kodów obliczeniowych.

Należy tutaj nadmienić, że obszar badań był bardzo szeroki i wymagał poznania oraz wnikliwych analiz zachodzących procesów.

3.3. Ocena wyników badań

Uważam, że praca wyróżnia się kompleksowym podejściem do problemu. Do najważniejszych jej osiągnięć zaliczam:

- Zastosowana metoda optymalizacji pozwala na jednoczesne uwzględnienie wielu parametrów, często ze sobą sprzecznych;
- Metoda minimalizacji produkcji entropii umożliwia przedstawienie i porównanie często nieporównywalnych parametrów, takich jak np. dopływy ciepła i spadki ciśnienia, stabilność mechaniczna;
- Jak pokazano na przykładzie linii XATL1, zastosowanie metody minimalizacji entropowej może być wykorzystane również, jako kryterium doboru i oceny wielu urządzeń cieplno-przepływowych;
- Praca poza rozważaniami teoretycznymi proponuje i opisuje algorytm postępowania, który może zostać zastosowany podczas projektowania przyszłych konstrukcji linii kriogenicznych;
- Założenia i tezy dysertacji zostały zweryfikowane na podstawie analiz pracy rzeczywistego rurociągu, przetestowanego w ośrodku badawczym Desy w Hamburgu.

3.4. Uwagi krytyczne

1. Wiele informacji dotyczących budowy, projektowania i konstrukcji kriogenicznych linii przesyłowych podano bez wskazania źródeł

- literaturowych (Czy Autor pracy posiada aż tak duże doświadczenie w projektowaniu tego typu konstrukcji?)
2. Autor w bardzo zdawkowy sposób opisał metodę kompensacji rurociągów opartą na modyfikacji kształtu rurociągu (kompensacja kształtem); metoda ta jest istotna, ponieważ pozwala na uzyskanie wysokiej stabilności mechanicznej rurociągu.
 3. W rozdziale 6.5 pt. *Wpływ zwiększenia ciśnienia projektowego na konstrukcję i sprawność wielokanałowych kriogenicznych linii przesyłowych na przykładzie linii zasilającej akcelerator FCC - Future Circular Collider* Autor stosuje jako model sprawdzający prosty odcinek rurociągu o długości 50 m. Model ten uwzględnia tylko straty liniowe. Co ze stratami miejscowymi?
 4. W analizie MES jako jedyny mechanizm przekazywania ciepła Doktorant uwzględnia przewodzenie. W przypadku linii kriogenicznej drugim ważnym mechanizmem jest promieniowanie. Jaki jest wpływ tego mechanizmu na przeprowadzone w pracy analizy numeryczne?
 5. W literaturze światowej w ostatnich 15 latach pojawił się nowy parametr, podobny do przyjętego w pracy podejścia entropowego, zwany *entrancy*. Czy jest możliwe zastosowanie tego parametru w przypadku projektowania wielokanałowych linii kriogenicznych?

3.5. Uwagi redakcyjne

W pracy występują błędy składniowe oraz redakcyjne, na które zwrócono bezpośrednio uwagę Autorowi. Niektóre pojęcia zaczerpnięte z literatury anglojęzycznej wydają się niezręcznie przełożone. Przed dalszym rozpowszechnianiem pracy błędy te powinny zostać wyeliminowane, a pewne fragmenty przeredagowane.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej opinie uwzględniające wybór tematu rozprawy, sposób jego analizowania, osiągnięte wyniki i zastosowane metody badawcze, stwierdzam, że Pan mgr inż. Paweł Duda wykazał, że jest naukowcem dojrzałym, o dużym doświadczeniu badawczym. Stwierdzam także, że posiadana wiedza oraz umiejętności pozwalają Mu na prowadzenie badań w dziedzinie nauk technicznych w

dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, dlatego też spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14. 03. 2003 r., o dopuszczenie Go do obrony pracy i nadanie stopnia doktora nauk technicznych.



Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ, prof. nadzw. PWr