

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 08.02.2024 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Patryka Brenka nt.:

„Wpływ zamarzania cieczy grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych”

Opinia została opracowana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej dr hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego – prof. uczelni – pismo z dnia 14.12.2023 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Ziemowit Malecha - profesor Politechniki Wrocławskiej.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 140 stron i została podzielona na osiem rozdziałów. Dodatkowo podano: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń, bibliografię oraz spis rysunków i tabel. W treści rozprawy zawarto:

1. **Analizę dotychczasowego stanu wiedzy**, gdzie podano podstawowe informacje o transformacji energetycznej oraz zwrócono uwagę na szczególne znaczenie skroplonego gazu LNG w jej przebiegu. Scharakteryzowano skroplony gaz ziemny, który jest coraz powszechniej wykorzystywany jako źródło energii pozwalające ograniczyć niekorzystny wpływ procesów spalania na otaczające środowisko. Przedstawiono problemy związane z transportem i regazyfikacją LNG
2. **Cel, teza i zakres pracy**, gdzie podano motywację podjęcia tematyki, cel i tezy rozprawy doktorskiej oraz opisano zadania planowane do realizacji.
3. **Wstępny model wrzącej cieczy kriogenicznej i wymiany ciepła z czynnikiem grzewczym**, gdzie kriogen przedstawiono jako ciało stałe o dostosowanej przewodności cieplnej. Podano założenia do modelu, opis modelu matematycznego oraz modelu numerycznego pozwalającego prowadzić obliczenia w przypadku wymiennika płytowego i płaszczowo-rurowego.
4. **Wielowariantowe badania na przykładzie przepływu czynnika grzewczego (wody) przez wąski, prostokątny kanał odseparowany płytami od wrzącego LNG**. Podano opis przypadku i metodologii optymalizacji zagęszczenia siatki. Przeprowadzono analizę

wplywu zagęszczenia siatki na precyzję uzyskiwanych wyników i czas obliczeń. Główną uwagę skierowano na badania wplywu warunków przeplywu na tworzenie się warstwy lodu w kanałach z czynnikiem grzewczym. Dokonano również walidacji modelu matematycznego i numerycznego.

5. **Badania nad wplywem geometrii przegród na proces narastania lodu i wymiany ciepła podczas oplywu pęczka rur**, gdzie opracowany wcześniej model obliczeniowy przystosowano do obliczeń wymiennika o odmiennej geometrii w postaci wymiennika płaszczowo-rurowego. Podjęto rozważania dotyczące wplywu zaproponowanych modyfikacji na proces kształtowania się warstwy lodu na powierzchni ścianki wymiennika oraz jego oddziaływanie na zachodzącą wymianę ciepła.
6. **Rozszerzony model wymiennika do odparowania cieczy kriogenicznej**, który oprócz odparowania cieczy dodatkowo uwzględnia możliwość przegrzania powstałych par.
7. **Opis eksperymentu porównawczego dla rozszerzonego modelu wymiennika**, który przeprowadzono z wykorzystaniem wymiennika płaszczowo-rurowego. Podano opis stanowiska laboratoryjnego, badanego wymiennika, metodykę badawczą. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami obliczeń numerycznych.
8. **Wnioski i kierunki dalszych badań**, gdzie wyeksponowano główne osiągnięcia Autora w zakresie tematu rozprawy oraz wskazano możliwości dalszej rozbudowy modelu numerycznego w celu uwzględnienia nierównomierności rozdziału czynnika grzewczego na poszczególne przepływy w wymienniku..
9. **Bibliografia**, która obejmuje 89 pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych.

2. Cel, teza i zakres pracy

Doktorant w rozdziale drugim podał cel, tezy i zadania do realizacji. Jako cel rozprawy przyjął opracowanie modelu numerycznego z zakresu obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) przeznaczonego do wielowariantowych obliczeń koncepcyjnych wspierających proces projektowania wymiennika, analizy jego pracy w określonych warunkach, jak również podejmowania określonych działań na wypadek awarii.

Tezy swojej pracy sformułował następująco:

1. *„Możliwa jest integracja złożonych modeli zjawisk fizycznych występujących podczas procesu regazyfikacji cieczy kriogenicznych za pomocą modelowania numerycznego”*,
2. *„Proces regazyfikacji może przebiegać stabilnie mimo częściowego zamarzania cieczy grzewczej”*.

Mając na uwadze udowodnienie powyższych tez Doktorant zaplanował następujące zadania do realizacji: 1 - uzasadnienie i wybór metod CFD do rozwiązania problemu sprzężonej wymiany ciepła, 2 - opracowanie modelu wymiennika ciepła lub jego części, 3 – określenie wplywu właściwości termodynamicznych cieczy grzewczej na pracę zamodelowanego wymiennika, 4 – określenie wplywu zastosowanej geometrii wymiennika na proces tworzenia się lodu na powierzchni wymiany ciepła, 5 - rozwinięcie modelu wrzenia cieczy kriogenicznej poprzez uwzględnienie w nim przegrzewu par czynnika, 6 – przeprowadzenie analizy porównawczej wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych.

Poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac Doktorant w pełni zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej oraz uzasadnił postawione tezy.

3. Rozwinięcie celu, tezy i zakresu pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań technicznych w układach chłodniczych do regazyfikacji cieczy kriogenicznych. Wynika to z potrzeby dalszego doskonalenia konstrukcji wymienników ciepła, lepszego poznania procesów tam zachodzących i parametrów, które je determinują. Pozwoli to na wzrost sprawności i efektywności instalacji kriogenicznych, bezpieczeństwa pracy i podejmowania określonych decyzji na wypadek awarii. Ma to istotne znaczenie ponieważ obserwuje się ciągły wzrost zapotrzebowania na czynnik energetyczny w postaci gazu ziemnego w fazie lotnej jak i cieczonej. Pozyskiwanie energii poprzez spalanie gazu ziemnego nie powoduje tak dużej generacji dwutlenku węgla do atmosfery jak spalanie węgla kamiennego czy brunatnego, co czyni go mniej szkodliwym dla otaczającego środowiska naturalnego. Dlatego jego znaczenie dla gospodarki energetycznej będzie bardzo duże jeszcze w perspektywie co najmniej kilkunastu lat. Mając na uwadze transport gazu ziemnego na duże odległości wykorzystuje się jego postać płynną w postaci cieczy, której objętość właściwa jest kilkaset razy mniejsza w porównaniu z fazą lotną. Taka zamiana fazy gazowej na fazę cieczową i odwrotnie wymaga określonych nakładów energetycznych oraz rodzi szereg problemów technicznych i technologicznych. Doktorant w swojej rozprawie skupił się na procesie regazyfikacji gazu ziemnego z gazy cieczonej (LNG) do fazy lotnej gazowej. Główną uwagę zwrócił na procesy zachodzące w wymiennikach ciepła, gdzie odparowuje skroplony gaz pobierając energię od czynnika grzewczego w postaci wody. Ponieważ temperatura wrzącej cieczy LNG jest bardzo niska, to istnieje realne zagrożenie namarzania wody na powierzchni wymiany ciepła, a w konsekwencji zablokowanie jej przepływu. Analiza tego zjawiska stanowi główny temat prezentowanej rozprawy.

W rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant podał podstawowe informacje na temat transformacji energetycznej jako zmiany dotychczasowego modelu produkcji i konsumpcji energii opartej w dużej mierze na konwencjonalnych nośnikach energii pierwotnej. Zaprezentował w tym zakresie jedną ze strategii Unii Europejskiej zwaną Europejskim Zielonym Łądem, która zakłada osiągnięcie w 2050 roku zerowego poziomu emisji gazów cieplarnianych netto. Oznacza to, że w najbliższych latach znaczenie gazu ziemnego jako źródła energii będzie jeszcze bardzo duże. Obecnie, w związku ze zmianą sytuacji geopolitycznej (wojna na Ukrainie) dostawy gazu ziemnego do krajów europejskich opierają się głównie na jego postaci w formie cieczy (LNG), co wymusza potrzebę jego odparowania i dostarczenia do odbiorcy w postaci gazowej (lotnej). Rodzi to szereg problemów i dlatego wybór przez Doktoranta tematyki rozprawy jest celowy i bardzo aktualny. Rozdział drugi zawiera cel, tezy i zakres pracy, gdzie podano motywację podjęcia tematyki, cel i tezy rozprawy doktorskiej oraz opisano zadania planowane do realizacji, które w głównej mierze opierają się na prowadzeniu badań teoretycznych z wykorzystaniem modelowania matematycznego i numerycznego. W rozdziale trzecim zawarto opis wstępnego modelu wrzącej cieczy kriogenicznej i wymiany ciepła z czynnikiem grzewczym. Autor zaproponował koncepcję obliczeń, w której główna uwaga jest skupiona na przepływie i możliwym zamrażaniu medium grzewczego. Skomplikowany z punktu widzenia obliczeń numerycznych proces wrzenia został uproszczony poprzez potraktowanie tego obszaru jako ciała stałe o dostosowanej przewodności cieplnej. Było to możliwe po porównaniu ze sobą dwóch wartości gęstości strumienia ciepła wyznaczonych z prawa Newtona i Fouriera. Zaproponowany model matematyczny zjawisk zachodzących w analizowanych fragmentach wymiennika ciepła oparto na wykorzystaniu równań zachowania energii, pędu i masy. Dodatkowo zastosowano model entalpia-porowatość, który zakłada, że zmiana fazy (topnienie lub zamrażanie) zachodzi w stałej temperaturze. Opracowany model umożliwi wyznaczenie w pobliżu chłodzonej ścianki obszaru, gdzie nastąpiło krzepnięcie czynnika grzewczego i przesuwanie się frontu zamrażania. Model numeryczny

opisuje w jaki sposób w prowadzonych symulacjach zostały odwzorowane rzeczywiste procesy, definiuje kwestie podziału przestrzeni obliczeniowej na wyodrębnione regiony oraz ich właściwości, deklaruje warunki brzegowe oraz zastępczą reprezentację wrzenia czynnika LNG w prowadzonych obliczeniach wymienników płytowych i płaszczowo-rurowych. W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki prac badawczych związane z praktycznym wykorzystaniem wcześniej opracowanego modelu. Prowadzono obliczenia numeryczne dla przepływu czynnika grzewczego (wody) przez wąski prostokątny kanał odseparowany płytami od wrzącego LNG. Dokonano również optymalizacji zagęszczenia siatki obliczeniowej w symulacjach CFD stwierdzając, że jest ono zależne od liczby Reynoldsa na dopływie czynnika grzewczego do kanału. Interesujące są wyniki badań dotyczące wpływu warunków przepływu na tworzenie się warstwy lodu. Walidacja modelu obliczeniowego wykazała dobrą zgodność wyników obliczeń według modelu analitycznego 1D z wynikami obliczeń numerycznych, co oznacza, że wszystkie niezbędne zjawiska fizyczne zostały zachowane w opracowanym modelu. Rozdział piąty prezentuje wyniki badań dotyczących wpływu geometrii przegród na proces namarzania lodu i wymiany ciepła podczas opływu pęczka rur. Prowadzone prace dotyczyły adaptacji zaproponowanego modelu obliczeniowego opisu zjawisk fizycznych zachodzących w wymienniku płaszczowo-rurowym przy poprzecznym opływie pęczka rur przez czynnik grzewczy (wodę). Prowadzone analizy dotyczyły procesu kształtowania się warstwy lodu na powierzchni rur i jego oddziaływania na zachodzącą wymianę ciepła. Prowadzono również obliczenia dla kilku przypadków spłaszczonych, w tym oceniając wartości spadku ciśnienia. W rozdziale szóstym przedstawiono uproszczony model wymiennika do odparowania cieczy kriogenicznej, w którym uwzględniono przebieg procesu odparowania kriogenu oraz przegrzania powstałych par. Dotychczasowy obszar obliczeniowy rozszerzono dodatkowo o dwa osobne przypadki – odpowiednio kriogenu w stanie cieczy wrzącej oraz kriogenu w stanie gazowym. Takie podejście pozwoliło na określenie punktu zakończenia odparowania czynnika, określenie wielkości przegrzewu jego par, a także działanie w sposób iteracyjny zapewniając zbieżność wyników osiąganych wartości oraz możliwość reakcji na potencjalne zmiany w rozpatrywanym systemie. Rozdział siódmy zawiera opis eksperymentu porównawczego dla rozszerzonego modelu wymiennika. Jego celem było przeprowadzenie testów wydajności wymiennika płaszczowo-rurowego służącego do regazyfikacji LNG. Uzyskane wyniki pomiarów wykorzystano do jakościowej oceny predykcji rozwijanego modelu oraz nadaniu mu potencjalnych ścieżek dalszego rozwoju. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami symulacji numerycznych. Uzyskano zadowalającą zgodność. W rozdziale ósmym podano wnioski oraz wskazano kierunki dalszych badań. Stwierdzono, że wyniki badań potwierdziły możliwość opisu założonych modeli zjawisk cieplno-przepływowych zachodzących przy wymianie ciepła pomiędzy wrzącą cieczą kriogeniczną a czynnikiem grzewczym za pomocą modelowania z wykorzystaniem metod obliczeniowej mechaniki płynów (CFD). Wykazano również, możliwość wykorzystania tak przygotowanego modelu do efektywnej analizy konkretnego układu. Wskazano również, że dalsze prace badawcze powinny się koncentrować nad wykorzystaniem innych korelacji na współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu cieczy kriogenicznej oraz ich wpływu na końcowe wyniki. Mając na uwadze, że rozptył czynników roboczych w wymienniku może być nierównomierny to dalsze badania powinny uwzględniać dodanie części obliczeń, determinujących ich rozptył, a informacje o tym powinny trafiać do poszczególnych kroków modelu.

Na podkreślenie zasługuje to, że Autor zastosował w swojej pracy adekwatne do potrzeb narzędzia formalne dotyczące metod numerycznych obliczeniowej mechaniki płynów (CFD). Opracował własny model numeryczny przeznaczony do wielowariantowych obliczeń koncepcyjnych wspierających proces projektowania wymiennika, analizy jego prac w określonych warunkach, jak również podejmowania określonych działań na wypadek awarii. Przeprowadził również badania eksperymentalne modelowego wymiennika ciepła, co umożliwiło mu

potwierdzenie słuszności założeń przyjętych do modelowania numerycznego. Wykazał się bardzo dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, zarówno od strony teoretycznego modelowania numerycznego jak i praktycznych badań eksperymentalnych. Przedstawiony program badań jest prawidłowy, obfitujący dużą liczbą otrzymanych wyników danych. Uzyskane wyniki prac badawczych charakteryzują się dużym potencjałem poznawczym jak i aplikacyjnym. Układ pracy oceniam jako właściwy, a zastosowane metody badawcze w postaci wykorzystania oprogramowania numerycznej mechaniki płynów (CFD), badań eksperymentalnych i procedur obliczeniowych są adekwatne do rozwiązywanych problemów.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Cel i zakres rozprawy doktorskiej wynikają z potrzeby prowadzenia badań naukowych o charakterze poznawczym i stosowanym. Pomimo prowadzenia w ostatnich latach intensywnych prac nad regazyfikacją ciekłych gazów ilość uzyskanych wyników jest niewspółmiernie mała w stosunku do potrzeb związanych z rozwiązywaniem problemów tam występujących. Dlatego podjęta tematyka pracy, jej cel i zakres są bardzo aktualne i potrzebne, zarówno pod względem naukowym, jak i aplikacyjnym.

Należy podkreślić oryginalność wyboru tematyki rozprawy doktorskiej. W ostatnich latach gwałtownie wzrosło zapotrzebowanie na gaz ziemny w postaci cieczy (LNG). Wynika to ze zmian geopolitycznych we współczesnym świecie. Embargo na rosyjski gaz wymusiło potrzebę transportu morskiego gazu z innych kontynentów i późniejszą jego regazyfikację. Rodzi to potrzebę poszukiwania nowych rozwiązań technicznych pozwalających zwiększyć efektywność procesów odparowania ciekłych gazów, zapewniając jednocześnie pełne bezpieczeństwo i opłacalność ekonomiczną. Występują tutaj liczne problemy związane z identyfikacją procesów fizycznych zachodzących podczas wrzenia gazu ziemnego, wymianą ciepła pomiędzy czynnikiem grzewczym a wrzącym gazem przez przegrodę wymiennika, możliwością zamarzania czynnika grzewczego i zatrzymaniem jego przepływu. Dlatego podjęcie przez Doktoranta prac w tym zakresie należy uznać za słuszne i jak najbardziej wskazane.

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- **poprawną identyfikację zjawisk** zachodzących w wymiennikach ciepła do regazyfikacji gazu ziemnego LNG;
- **opracowanie wstępnego modelu wrzącej cieczy kriogenicznej i wymiany ciepła z czynnikiem grzewczym**, gdzie prawidłowo przyjęto założenia do modelu, opisano własne modele: matematyczny i numeryczny. Modele te pozwalają prowadzić obliczenia numeryczne w przypadku wymiennika płytowego i płaszczowo rurowego. Jako oryginalne rozwiązanie można uznać potraktowanie wrzącego gazu ziemnego jako ciało stałe o dostosowanej przewodności cieplnej. Pozwala to znacznie uprościć obliczenia i skrócić czas obliczeń przy prawie niezminionej ich dokładności;
- **zastosowanie modelu entalpia-porowatość**, który umożliwia wyznaczenie w pobliżu chłodzonej ścianki obszaru, gdzie nastąpiło krzepnięcie czynnika grzewczego i przesuwanie się frontu zamarzania;
- **przeprowadzenie wielowariantowych badań numerycznych przepływu czynnika grzewczego (wody)** przez wąski, prostokątny kanał odseparowany płytami od wrzącego LNG. Prawidłowo dokonano optymalizacji zagęszczenia siatki oraz zbadano wpływ jej zagęszczenia na dokładność uzyskiwanych wyników i czas obliczeń. Przeprowadzone badania pozwoliły określić wpływ warunków przepływu cieczy grzewczej na tworzenie się warstwy lodu w kanałach. Wykonana walidacja modelu obliczeniowego wykazała dobrą

zgodność wyników obliczeń według modelu analitycznego 1D z wynikami obliczeń numerycznych. Oznacza to, że wszystkie niezbędne zjawiska fizyczne zostały zachowane w opracowanym modelu;

- **opracowanie uproszczonego modelu wymiennika do odparowania cieczy kriogenicznej**, w którym uwzględniono przebieg procesu odparowania kriogenu oraz przegrzania powstałych par. Obszar obliczeniowy rozszerzono dodatkowo o dwa osobne przypadki – odpowiednio kriogenu w stanie cieczy wrzącej oraz kriogenu w stanie gazowym. Takie podejście pozwoliło na określenie punktu zakończenia odparowania czynnika, określenie wielkości przegrzewu jego par, a także działanie w sposób iteracyjny zapewniając zbieżność wyników osiąganych wartości oraz możliwość reakcji na potencjalne zmiany w rozpatrywanym systemie;
- **przeprowadzenie badań eksperymentalnych wymiennika płaszczowo-rurowego** służącego do regazyfikacji LNG. Badania przeprowadzono na specjalnie wykonanym stanowisku laboratoryjnym umożliwiającym pomiar parametrów cieplno-przepływowych czynników roboczych oraz wyznaczenie mocy cieplnej w różnych wariantach pracy wymiennika. Uzyskane wyniki pomiarów wykorzystano do jakościowej oceny predykcji rozwijanego modelu oraz nadaniu mu potencjalnych ścieżek dalszego rozwoju. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z dobrym skutkiem z wynikami symulacji numerycznych;
- zaproponowanie **wykorzystania opracowanego modelu do symulacji awarii** oraz usuwania ich skutków. Prowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły odwzorować stan awarii, w którym zatrzymany zostaje przepływ czynnika grzewczego - wody. Następnie sprawdzano, czy po takim incydencie możliwe jest przywrócenie wymiennika do normalnej pracy. Takie działania pozwoliły określić przedziały czasowe poszczególnych działań.

Reasumując Doktorant, zgodnie z postawioną tezą pracy wykazał, że możliwa jest integracja złożonych modeli zjawisk fizycznych występujących podczas procesu regazyfikacji cieczy kriogenicznych za pomocą modelowania numerycznego. W opracowanym modelu matematycznym i numerycznym umiejętnie powiązał ze sobą procesy przejmowania ciepła po obu stronach przegrody wymiennika w postaci regazyfikatora z procesem przewodzenia ciepła w jego ściankach. W ten sposób powstał pełny opis procesu przenikania ciepła w wymienniku przepływowym. Wykazał również, proces regazyfikacji może przebiegać stabilnie mimo częściowego zamarzania cieczy grzewczej w kanale. Oznacza to, że Doktorant w pełni zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej oraz uzasadnił postawione tezy. Wyniki przeprowadzonych obliczeń i analiz oraz przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy istotnego problemu poszukiwania nowych rozwiązań technicznych pozwalających zwiększyć efektywność procesów odparowania ciekłych gazów, zapewniając jednocześnie pełne bezpieczeństwo i opłacalność ekonomiczną. Ponieważ procesy regazyfikacji przebiegają w bardzo niskich temperaturach, to istnieje ryzyko zestalania się czynnika grzewczego, co może prowadzić do zniszczenia wymiennika i innych urządzeń całej instalacji. Dlatego istotnym jest analiza tych procesów zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym. Zaproponowane przez Autora modele obliczeniowe ujmują podstawowe parametry przepływowe zachodzących zjawisk w wymiennikach ciepła w postaci regazyfikatorów i pozwalają określić strefy wrzenia i przegrzania gazu ziemnego oraz obszary zestalania się czynnika grzewczego i przesuwania się frontu jego zamarzania w różnych warunkach pracy wymiennika. Takie informacje są nie-

zmiernie istotne w projektowaniu regazyfikatorów i całych instalacji gazowych. Pozwalają optymalizować konstrukcję wymienników oraz parametry czynników roboczych, co przyczynia się do wzrostu efektywności i sprawności ogólnej. Odpowiednie wykorzystanie zaproponowanych modeli obliczeniowych umożliwia przewidywanie awarii w pracy wymienników, to jest w przypadkach zamarzania czynnika grzewczego, gdzie jego przepływ zostaje wstrzymany, a następnie wznowiony. Poprawność prowadzenia obliczeń numerycznych potwierdzono poprzez ich weryfikację na podstawie własnych wyników badań eksperymentalnych.

Rezultaty prac Doktoranta znajdą zapewne zastosowanie w technice gazowniczej. Prezentowana rozprawa doktorska jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie rozwoju niskotemperaturowej energetyki. Oznacza to, że zaprezentowana rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane aplikacyjności prowadzonych badań naukowych.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W pracy na stronie 34 podano, że wrzący czynnik chłodniczy potraktowano jako ciało stałe w postaci cienkiej warstwy o dostosowanej przewodności. Oznacza to, że przejście ciepła opisane prawem Newtona zastąpiono przewodzeniem ciepła opisany prawem Fouriera. Zakładając równość jednostkowych strumieni ciepła można wyznaczyć z porównania oporów przepływu wartość zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła. Należy jednak założyć grubość przyjętej warstwy, w której odbywa się hipotetyczny proces przewodzenia ciepła. Istnieje pytanie, czym się kierowano przyjmując grubość tej warstwy i z czego to wynika.
2. Na stronie 26 podano równania zachowania energii, pędu i masy wykorzystane w opracowanym modelu obliczeniowych. Wynika z nich, że parametry układu są funkcją przestrzeni i czasu. W rozdziale 4.3 na rys. 4.10 przedstawiono wyniki obliczeń udziału lodu w kanale dla różnych liczb Reynoldsa czynnika grzewczego. Nie jest jednak jasne, jakiego stanu dotyczą przedstawione wyniki, czy stanu ustalonego po okresie rozruchu, czy może gdyby w dalszym ciągu przepływał czynnik to we wszystkich przypadkach nastąpi zatrzymanie przepływu czynnika. To trzeba wyjaśnić. Szkoda, że Autor nie podał po jakim czasie wystąpi przedstawiona na rysunkach sytuacja. Czy przedziały czasowe są jednakowe, czy różne? Pytania dotyczą również rys. 4.11 i 4.12.
3. Opór cieplny po stronie wrzącego LNG wyznaczano na podstawie zależności eksperymentalnych innych autorów (rozdział 3.3.3). W efekcie końcowym przyjęto, że wrzenie ma charakter błonowy, a wartość współczynnika przejmowania ciepła jest funkcją różnicy temperatur ścianki i wrzącego płynu (wzór 3.21). Czy takie założenie w pełni uwzględnia zmianę struktury przepływu wrzącego LNG wzdłuż ogrzewanej ścianki, który dopływa do wymiennika jako ciecz, a wypływa w postaci gazowej? Przecież następuje tutaj zmiana stopnia suchości od zera do jeden, a to powoduje zmianę wartości współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż drogi przepływu. Czy nie jest to zbyt duże uproszczenie?
4. Na stronie 17 napisano, że na rys. 1.3 podano „*skąd do Europy trafiał gaz ziemny*”. Jednak na tym rysunku brak jest takiej informacji w zakresie dostaw LNG.
5. Na rys. 5.9 (str. 79) przedstawiono zależności mocy cieplnej od liczby Reynoldsa dla przepływu wody przez pęczek rur o różnej podziałce. W zakresie liczb Reynoldsa od 20

do 40 obserwuje się znaczną fluktuację mocy cieplnej. Co jest tego przyczyną? Błędy obliczeń czy zjawiska fizyczne? Podobna sytuacja występuje na rys. 5.16 ÷ 5.18.

6. Na kilku rysunkach podano strzałki (np. rys. 5,9, 5.16 ÷ 5.18 itp.). Co one oznaczają?
7. Na stronie 97, punkt 3 napisano „*Wśród parametrów dotyczących cieczy kriogenicznej uwzględnić należy stopień suchości, strumień masowy, a także kierunek przepływu*”. W pracy brak jest pełnej informacji na temat jak uwzględniano stopień suchości LNG w obliczeniach. Należy to jasno wykazać.
8. Na stronie 99 wymieniono różne zależności eksperymentalne na wrzenie LNG, nie podano jednak, którą wykorzystano w prowadzonym modelowaniu.
9. W opisie rys. 6.2, str. 100 nie podano jaki przepływ uwzględniano w wymienniku przeponowym, współ- czy przeciwny.
10. Na rys. 7.5 podano wartości stopnia suchości x . Czego dotyczą podane wartości, czy są to wartości średnie w całym wymienniku czy na dopływie LNG do wymiennika? Dotyczy to również rys. 7.6 ÷ 7.8
11. .

Uwagi edytorskie

- ogólne

Należy podkreślić bardzo dobry poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę wysoka jakość rysunków, formatowania i styl tablic i wzorów. Jednak pomimo starannego sprawdzenia tekstu Autor nie ustrzegł się kilku błędów:

- szczegółowe

1. W przypadku kilku rysunków podano opis w języku angielskim, np. 1.1, 1.2. W publikacjach w języku polskim należy je także podawać w tym języku.
2. Na stronie 17, 5 wiersz od góry jest „...skroplonego gazu ziemnego *W specjalnych zbiornikach*.”, powinno być „...skroplonego gazu ziemnego *w specjalnych zbiornikach*.”
3. Na stronie 17, 3 wiersz od dołu jest „...*(rysunek 1.3)*.”, powinno być „...*(rysunek 1.3)*”.
4. Na stronach 21 i 22 podano cele pracy, w tym:
 - *określenie wpływu zastosowanej geometrii wymiennika* – nie podano na co,
 - *analiza porównawcza wyników numerycznych z pomiarami wykonanymi na stanowisku badawczym*. Lepszym byłoby sformułowanie: „*przeprowadzenie analizy porównawczej wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów dokonanych na stanowisku badawczym*”.
5. Na stronie 49, 4 wiersz od góry jest „...4,7 ..”, powinno być „...4,6 i 4,7...:
6. Na rys. 4.14 (str. 63) – na schemacie modelu numerycznego nie podano strzałek wskazujących na kolejność postępowania.
7. Na stronie 77, 10 wiersz od góry podano „*W ten rozpatrzone zostały warianty ...*”. powinno być „*W ten sposób rozpatrzone zostały warianty...:*
8. Na rys. 6.4, str. 103 brak jest oznaczenia osi poziomej.

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz, dotyczących nowatorskich rozwiązań w zakresie instalacji chłodniczych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam wysoko.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Inżyniera Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu techniki cieplnej i chłodniczej w prowadzeniu analiz i obliczeń teoretycznych, modelowania numerycznego, badań eksperymentalnych i opracowania uzyskanych wyników. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej. Należy podkreślić, że przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (określonego w temacie rozprawy) oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie stosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej. **Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Arkadiusza Patryka Brenka, jako rozprawy doktorskiej** odpowiadającej warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2022 r., poz. 574) i **o dopuszczenie jej do publicznej obrony**. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie zwiększenia efektywności energetycznej urządzeń chłodniczych i kriogenicznych. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i badań eksperymentalnych przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie szeroko pojętej energetyki niskotemperaturowej.

