

dr hab. inż. Wojciech Sobieski, prof. UWM
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Wydział Nauk Technicznych
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
10-957 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 11
e-mail: wojciech.sobieski@uwm.edu.pl
tel.: (89) 5-23-32-40
fax: (89) 5-23-32-55

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Płuszki pt.:
„Modelowanie numeryczne chłodziarki magnetokalorycznej – badanie
wpływu właściwości termofizycznych płynu roboczego i struktury złoża
regeneratora na przekazywanie ciepła”

1. Opis ogólny rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt. „Modelowanie numeryczne chłodziarki magnetokalorycznej – badanie wpływu właściwości termofizycznych płynu roboczego i struktury złoża regeneratora na przekazywanie ciepła” obejmuje łącznie 255 stron tekstu, przy czym treść zasadnicza zajmuje 204 strony, a pozostałe strony to dedykacja, streszczenie w języku polskim, spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i terminów, bibliografia, załącznik, streszczenie w języku angielskim, spis wykresów i tabel oraz podziękowania. Objętość pracy odpowiada standardom rozpraw doktorskich i nie budzi żadnych zastrzeżeń, podobnie jak jakość i liczba materiałów źródłowych (łącznie 199 pozycji).

Rozdział 1 zawiera ogólne wprowadzenie to tematyki rozprawy doktorskiej oraz sformułowanie tezy, celu oraz głównych zadań badawczych.

Dalsza część pracy podzielona jest na 3 części. Pierwsza, obejmująca rozdziały 2 i 3, przedstawia obecny stan wiedzy; druga, w skład której wchodzi rozdziały 4, 5, 6, 7 i 8, opisuje pracę własną Autora; trzecia, zawierająca rozdział 9, stanowi podsumowanie rozprawy.

Rozdział 2 obejmuje: a) ogólny opis materiałów kalorycznych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów magnetokalorycznych; b) przedstawienie podstawowych zależności matematycznych obowiązujących dla materiałów magnetokalorycznych; c) opis wybranych materiałów magnetokalorycznych; d) opis czterech magnetotermodynamicznych obiegów chłodniczych; e) opis rzeczywistego braytonowskiego obiegu AMR; f) przegląd literatury dotyczący rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń chłodniczych wykorzystujących efekt magnetokaloryczny.

W Rozdziale 3 zawarto: a) wprowadzenie dotyczące obliczeniowej dynamiki płynów; b) wyprowadzenie równań bilansowych charakterystycznych dla Metody Objętości Skończonych, przy czym ograniczono się do przepływów laminarnych płynów newtonowskich; c) przegląd zjawisk i procesów zachodzących w układach magnetokalorycznych oraz parametrów niezbędnych do ich opisanie; d) przegląd modeli numerycznych urządzeń magnetokalorycznych ze szczególnym uwzględnieniem typu obliczeń (stacjonarne i niestacjonarne) oraz liczby wymiarów (1D, 2D i 3D).

Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis stanowiska laboratoryjnego oraz wyniki badań doświadczalnych, z których najważniejsze są wykresy widoczne na Rys. 4.9 i 4.10. W końcowej części rozdziału przedstawiono, w postaci charakterystyk, podstawowe własności termofizyczne gadolinu.

W Rozdziale 5 przedstawiono, pochodzący z literatury, ale częściowo zmodyfikowany przez Autora, model 0D opisujący pracę wybranej chłodziarki magnetokalorycznej. W kolejnych podrozdziałach opisano założenia i dane wejściowe modelu, równania niezbędne do przeprowadzenia bilansu ciepła oraz wybrane wyniki obliczeń. W końcowej części zawarto podsumowanie oraz listę wniosków dotyczących uzyskanych wyników.

Rozdział 6 zawiera opis tworzenia modelu numerycznego, mającego reprezentować opisany wcześniej układ eksperymentalny. Dużo uwagi poświęcono aspektom związanym z tworzeniem zastępczego modelu 2D oraz warunkom brzegowych. Opis wykonano w kontekście pakietu obliczeniowego OpenFOAM, nie wdając się w szczegóły techniczne dotyczące implementacji poszczególnych elementów modelu. W końcowej części rozdziału umieszczono porównanie wyników symulacji, uzyskanych dla czterech wariantów geometrii złoża porowatego, z wynikami pochodzącymi z eksperymentu.

Rozdział 7 przedstawia badania wpływu własności termofizycznych płynu roboczego na wybrane parametry pracy chłodziarki magnetokalorycznej, przy czym badania oparto na zmienionym, w stosunku do przedstawionego poprzednio, modelu symulacyjnym. W pierwszej części rozdziału opisano szczegółowo nowy model symulacyjny oraz jego wstępną konfigurację. Następnie zaprezentowano eksperyment numeryczny, w ramach którego badano ogólną wrażliwość modelu symulacyjnego na cztery kluczowe parametry materiałowe. Po sformułowaniu dwóch równań predykcyjnych, na możliwą do uzyskania różnicę temperatur oraz na dostępną moc chłodniczą, wykonano kolejną serię obliczeń i symulacji, bazujących tym razem na rzeczywistych parametrach kilku wybranych czynników chłodniczych. Rozdział kończy podsumowanie.

W Rozdziale 8 przedstawiono wyniki stacjonarnych obliczeń numerycznych przeprowadzonych w trójwymiarowej przestrzeni obliczeniowej dla czterech typów geometrii (oraz jednej geometrii referencyjnej) i trzech wariantów tzw. wymiaru charakterystycznego. Wyniki przedstawiono w formie charakterystyk porównawczych, przy czym skupiono się na trzech aspektach: spadku ciśnienia w funkcji strumienia objętości czynnika roboczego, stosunku odebranego strumienia ciepła do mocy hydraulicznej pompy w funkcji strumienia objętości czynnika oraz stosunku odebranego strumienia ciepła do mocy hydraulicznej pompy w funkcji strumienia objętości czynnika roboczego. Ostatnim elementem rozdziału jest podsumowanie przedstawionych w nim badań.

Rozdział 9 zawiera wnioski i spostrzeżenia dotyczące kolejnych etapów badań oraz uwagi co do dalszych kierunków badań.

Rozprawa zawiera załącznik poświęcony zagadnieniom związanym z planowaniem eksperymentu i obróbką wyników (S1), przedstawiający wybraną geometrię zastępczą układu (S2) oraz uwagi dotyczące przygotowania geometrii złoż porowatych (S3).

2. Ocena edytorskiej strony rozprawy doktorskiej

Strona edytorska rozprawy jest wysokiej jakości. Autor zastosował skład w TeXie, co dobrze świadczy o jego warsztacie. Autor stosuje czytelny podział na rozdziały i podrozdziały. Wyjątkiem jest tu wprowadzenie do drugiej części pracy, które nie posiada żadnego nagłówka. Praca jest estetyczna, a tekst napisany jest ładnym, poprawnym i zrozumiałym – a przy tym fachowym (poza nielicznymi wyjątkami) – językiem. W kilku przypadkach Autor używa pojęć, bez wskazania, że są one wyjaśnione dalej, co negatywnie wpływa na czytelność niektórych fragmentów tekstu. W pracy nie ma niepotrzebnych powtórzeń, a Autor sprawnie posługuje się odnośnikami do stosownych elementów. Układ treści jest spójny i logiczny, co sprawia że pracę czyta się dobrze. W treści występują różne drobne błędy językowe i edytorskie – część z nich wskazano w uwagach szczegółowych.

Sobierl

Rysunki i tabele wykonane są starannie, estetycznie, czytelnie i w spójnym stylu graficznym. Na uwagę zasługuje sprawne i konsekwentne posługiwanie się kolorami. Rozmiar rysunków, jak również występujących na nich elementów, jest odpowiedni.

Literatura cytowana jest w kolejności występowania w tekście. Odwołania są czytelne i poprawne. Formatowanie spisu literatury jest poprawne.

3. Ocena merytorycznej strony rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy aktualnych i ważnych zagadnień z zakresu chłodnictwa. Chłodziarki magnetokaloryczne są rozwiązaniem względnie nowym i wciąż stanowią ciekawy obiekt badań naukowych. Ponieważ, jak do tej pory, nie osiągnięto w pełni zadowalających efektów, szczególnie w kontekście potencjalnej komercjalizacji, to wszelkie badania naukowe służące do zwiększenia wiedzy o zjawiskach i procesach występujących w tego typu urządzeniach są jak najbardziej wskazane i zasadne. Wykonany przez Autora przegląd literatury dobrze oddaje obecny stan wiedzy i stanowi kompletne i wyważone wprowadzenie do kolejnych części pracy. Wypunktowane przez Autora zadania badawcze są sformułowane zwięźle i czytelnie, pasując jednocześnie do tytułu rozprawy.

Podejście do rozwiązania problemu jest kompletne. W trakcie realizacji celów rozprawy doktorskiej Autor wykorzystuje eksperyment, model analityczny 0D, różne narzędzia i metody statystyczne, teorię eksperymentu oraz kilka nietrywialnych modeli numerycznych 2D/3D. Stosowane narzędzia i metody badawcze są nowoczesne i dobrze dobrane. Daje się zauważyć duże umiejętności praktyczne związane z obsługą pakietu OpenFOAM, a także wykorzystywaniem innych specjalistycznych narzędzi, takich jak język Python czy program YADE, będący implementacją Metody Elementów Dyskretnych.

W Rozdziale 3 daje się zauważyć brak głębszego rozeznania w zakresie podstaw teoretycznych Metody Objętości Skończonych (MOS). Autor korzystał głównie z jednej pracy (pozycji o numerze [78]), która nie była najlepszym wyborem i która zawiera nawet pewne błędy. Istotną wadą opisów przedstawionych w tej części rozprawy – mnie osobiście dość rażąca – jest brak pełnej spójności z główną ideą MOS. Metoda ta polega zasadniczo na uwzględnianiu dwóch typów czynników: powierzchniowych oraz objętościowych. W tym kontekście, np. równanie energii jest pewną szczególną postacią I Zasady Termodynamiki, w której to zmiana energii w czasie, w pojedynczej objętości skończonej wypełnionej płynem jednoskładnikowym, może nastąpić wyłącznie na skutek: a) pracy sił powierzchniowych: normalnych i stycznych (nazywanych przez Autora ogólnie siłami zewnętrznymi); b) pracy sił objętościowych (działających na każdą cząsteczkę płynu, niezależnie od jej lokalizacji); c) ciepła wymienianego z otoczeniem przez powierzchnię; d) wewnętrznych źródeł ciepła. Nazywanie sił powierzchniowych siłami zewnętrznymi jest mylące, gdyż w klasycznej teorii MOS siłami zewnętrznymi nazywa się siły pochodzące od czynników, których źródło ulokowane jest poza objętością skończoną – przykładem może być działanie grawitacji (błędnie sklasyfikowanej jako czynnik działający na powierzchni objętości skończonej) czy pól elektromagnetycznych. Pragnę podkreślić, że przedstawione przez Autora równania są zasadniczo poprawne i nie obniżają jakości pracy, a moje uwagi mają charakter subiektywny. Niemniej jednak zachęcam Autora, jeśli będzie On nadal chciał korzystać z MOS, do opracowania bardziej eleganckich i współczesnych wyprowadzeń podstawowych równań bilansowych.

W trakcie realizacji tematyki rozprawy Autor skorzystał z istniejącego już stanowiska badawczego, ale wykonał na nim własne pomiary. Takie podejście nie budzi zastrzeżeń, tym bardziej że wyraźnie wskazane jest źródło (praca [160]). Podobna sytuacja pojawia się w rozdziale kolejnym, w którym opisany jest, również opracowany przez inną osobę, model 0D. Należy pochwalić, że Autor korzysta z osiągnięć innych osób i sprawdza, czy jego dane, wyniki lub wnioski nie stoją w sprzeczności z efektami prac bazujących na innych podejściach. Mimo, że nie udało się uzyskać pełnej zgodności ilościowej, to przedstawiony w Rozdziale 5 materiał stanowi ciekawe uzupełnienie rozprawy, tym bardziej że Autor nie ograniczył się do modelu pierwotnego (praca [163]), ale zaproponował w nim własne modyfikacje.

Sabiel

Kluczowymi, najbardziej oryginalnymi i wartościowymi fragmentami rozprawy są Rozdziały 6, 7 i 8, ściśle powiązane z głównymi zdaniami badawczymi zdefiniowanymi w sekcji 1.2.

Podejście zastosowane do generacji złożeń zastępczych w Rozdziale 6 jest niewłaściwe (finalnie Autor dochodzi do podobnych wniosków, czego dowodem są uwagi zawarte w Rozdziale 8). Należy podkreślić, że zadanie nie jest łatwe, głównie ze względu na problemy z generacją siatki numerycznej w okolicy punktów styków sfer reprezentujących poszczególne cząstki gadolinu. Autor zaproponował ciekawe rozwiązanie, polegające na tworzeniu „mostków” w punktach styku, niemniej jednak istotnie zmienia ono strukturę przestrzenną kanałów porowych (co widać doskonale na Rys. S8). To z kolei wpływa na pole przepływu i transfer ciepła między płynem, a częścią stałą ośrodka porowatego. Z tego względu najpierw należałoby dokładnie określić kluczowe parametry złoża porowatego, a dopiero później zająć się takim generowaniem geometrii, aby te parametry osiągnąć. W szczególności bezwzględnie należałoby zachować odpowiednią masę gadolinu (inaczej trudno się spodziewać, że bilans ciepła będzie poprawny) oraz porowatość. Teraz należałoby się zastanowić, jak rozwiązać problem punktów styku – tu zasadniczo rozwiązania są trzy: a) generowanie sfer bez kontaktu (tu najlepiej sprawdziłyby się losowe metody generowania geometrii); b) generowanie sfer z kontaktami (tu sprawdzi się Metoda Elementów Dyskretnych, przy czym można rozważyć dwa rodzaje kontaktów, tzw. twarde lub miękkie); c) metoda hybrydowa, będąca połączeniem metod a) i b), ale zastosowana w taki sposób, aby struktura złoża była jednorodna (miarą równomierności struktury mogłoby być np. pole krętości). Pragnę podkreślić, że generacja geometrii jest zadaniem jednostkowym, zasadniczo niezależnym od pozostałych elementów czy etapów tworzenia modelu symulacyjnego, i może być w dowolnym czasie modyfikowana i doskonalona. Dlatego też, mimo pewnych uwag krytycznych, nie uważam aby zauważone niedoskonałości obniżały w istotny sposób jakość całej rozprawy – tym bardziej, że opis wyników przedstawionych w sekcji 6.4.1 wskazuje, że poszczególne elementy wcześniej opisanego modelu matematycznego zaimplementowane zostały poprawnie. Na podkreślenie zasługuje estetyczna i przejrzysta forma prezentacji wyników.

Przeprowadzanie analizy wrażliwości, analizy wariantowej, tworzenie modeli zredukowanych czy też stosowanie innych elementów z obszaru szeroko pojętego planowania eksperymentu uważam za bardzo pomocne w pracy naukowej. Autor w swojej rozprawie zawarł tego typu elementy, co oceniam bardzo wysoko. Dyskusyjne jednak jest wykonanie tego pomysłu, a w szczególności przyjęcie niesymetrycznych wartości współczynników DOE oraz duży ich zakres, w wyniku czego spora część punktów planu ma nierealne, niemożliwe do praktycznego uzyskania parametry materiałowe. Rozumiem jednak, że uzyskane wyniki posiadają pewną wartość poznawczą i że to właśnie było celem Autora. W Rozdziale 7 zwraca uwagę bardzo dobre opanowanie obsługi pakietu OpenFOAM: umiejętność stosowania nietypowych warunków brzegowych (skok ciśnienia imitujący istnienie pompy), umiejętność zadawania profilu prędkości na brzegu, umiejętność monitorowania zmiennych w wybranych punktach i przekrojach, umiejętność modyfikacji warunków brzegowych w czasie trwania symulacji itp. Dobrze to świadczy o przygotowaniu Autora i jego potencjale do prowadzenia dalszych badań naukowych w przyszłości.

Rozdział 8 stanowi wartościowe uzupełnienie pracy. Odnosi się wrażenie, że opracowany wcześniej model 2D, wymagający stosowania wielu specjalnych zabiegów związanych z konwersją przestrzeni 3D do 2D, nie spełnił oczekiwań Autora i postanowił On uprościć modelowanie, kosztem przejścia do przestrzeni trójwymiarowej, obliczeniowo znacznie bardziej wymagającej. Dobór wariantów złoża jest zasadny, a przedstawiony tok rozumowania logiczny. Wyniki wskazują, że ten kierunek badań jest obiecujący, tym bardziej, że w przypadku dostępu do komputerów o większej mocy, można by względnie łatwo przejść z obliczeń stacjonarnych na niestacjonarne i jeszcze precyzyjniej modelować i przewidywać zachowanie wybranych typów urządzeń magnetokalorycznych.

Podsumowanie rozprawy, podzielone na sekcje odpowiadające poszczególnym rozdziałom, jest zwięzłe i odpowiada temu, co zostało przedstawione wcześniej. Wnioski są poprawne, a spostrzeżenia trafne. Ważnym elementem podsumowania są uwagi dotyczące dalszych, potencjalnych kierunków badań.

Sobierki

- Gazu Sietciowego Boltzmanna); 3) skalę makro – dynamikę ośrodków ciągłych (tu przykładem mogą być równania bilansowe Metody Objętości Skończonych).
17. Strona 47: Metod numerycznych wchodzących w zakres mechaniki płynów jest więcej. Wymienić tu należy przede wszystkim Metodę Gazu Sietciowego Boltzmanna oraz Metodę Cząstek Wygładzonych. Duże znaczenie posiada również – często stosowana w kontekście wybranych zagadnień przepływowych (np. modelowania procesu fluidyzacji) – Metoda Elementów Dyskretnych.
 18. Strona 48 (Q1): Stwierdzenie, że Metoda Objętości Skończonych „jako jedyna z trzech przedstawionych metod zapewnia pełne zachowanie masy, pędu i energii w całej domenie obliczeniowej, niezależnie od jej rozmiaru” nie jest zrozumiałe. W szczególności: a) co oznacza pełne (lub niepełne) zachowanie masy, pędu i energii?; b) w jaki sposób rozmiar domeny wpływa na jakość rozwiązania uzyskanego Metodą Różnic Skończonych lub Metodą Elementów Skończonych?
 19. Strony 49-60: Sposób wyprowadzenia równań jest dość archaiczny. Współcześnie stosuje się podejście ogólniejsze, nawiązujące nie do konkretnego układu współrzędnych, ale do ogólnie zdefiniowanej pojedynczej objętości skończonej.
 20. Strona 49: Na Rys. 3.1 występuje błąd w oznaczeniach kroków przestrzennych.
 21. Strona 50: To czy domena obliczeniowa jest ruchoma czy nieruchoma nie ma większego znaczenia w wyborze opisu matematycznego. Ilustracją może być wspomniana przez Autora fluidyzacja, która może być modelowana zarówno w ujęciu Euler-Euler (przy użyciu tzw. Wielofazowego Modelu Eulera i odpowiedniego zestawu domknięć), jak i w ujęciu Euler-Lagrange (tu zazwyczaj stosuje się połączenie dwóch metod numerycznych, np. Metody Objętości Skończonych lub Metody Gazu Sietciowego dla fazy tła i Metody Elementów Dyskretnych dla fazy rozproszonej). Kluczowe znaczenie ma tu założenie, czy poszczególne obiekty fazy rozproszonej mają być rozróżniane i śledzone, czy też nie.
 22. Strona 52: Nie jest prawdą, że siły pochodzące od grawitacji są siłami powierzchniowymi (przy czym przyczyną tego błędu jest niepoprawna informacja w cytowanej tam pracy [78]). Grawitacja działa na każdą cząsteczkę płynu i jest to klasyczny przykład siły masowej (uwzględnianej w członie źródłowym równania pędu).
 23. Strona 53: Na Rys. 3.3 występuje błąd w oznaczeniach kroków przestrzennych.
 24. Strona 53 (Q2): Podczas definiowania tensora naprężeń Autor opiera się na nietypowym, i jak się już wcześniej okazało zawierającym błędy opisie, zaczerpniętym z pracy [78]. Szkoda, że przedstawiony tam materiał nie został skonfrontowany z inną literaturą. Autor stwierdza, że „Oddziaływanie sił powierzchniowych wywołuje w elemencie płynu stan naprężeń, który składa się z członów naprężeń normalnych do powierzchni elementu (ciśnienia) p oraz naprężeń ścinających, równoległych do powierzchni elementu i oznaczonych jako τ_{ij} ”. W tym kontekście pojawia się pytanie czym jest składowa τ_{xx} pojawiająca się obok ciśnienia w równaniu (3.13)? Klasycznie przyjmuje się, że ciśnienie to średnia arytmetyczna składowych normalnych tensora naprężeń (ze znakiem minus, aby zachować spójność logiczną z koncepcją objętości skończonej). Podsumowując, sugeruję aby Autor zapoznał się z innymi źródłami i w przyszłości nie korzystał z tych opisów, które przedstawił w rozprawie. Uwaga ta dotyczy wyprowadzeń wszystkich równań bilansowych Metody Objętości Skończonych.
 25. Strona 54: Błąd w wyrażeniu: „... aby powiązać je z z polem ciśnienia ...”.
 26. Strona 55: Klasycznie, współczynnik przewodności cieplnej w prawie Fouriera oznacza się symbolem λ . Wybranie symbolu k nie jest zbyt korzystne, gdyż w CFD k jest standardowym symbolem energii kinetycznej turbulencji.
 27. Strona 55: Podczas wyprowadzania ogólnych (uniwersalnych) równań bilansowych MOS (a tytuł Rozdziału 3.1. sugeruje, że takie właśnie równania zostaną w nim przedstawione) należy unikać definiowania konkretnych domknięć, gdyż zazwyczaj powoduje to „zawężenie” teorii do pewnych klas zagadnień. Tak jest w wyprowadzeniu równania energii przedstawionym przez Autora – przyjęcie prawa Fouriera (szczególnie bez dodatkowych wyjaśnień dotyczących interpretacji współczynnika przewodności cieplnej) zawęża teorię do przepływów laminarnych (swoją drogą tak samo było w wyprowadzeniu równania pędu, w którym to całkowicie pominięto wątek turbulencji).

Sobierł

Rozprawa zawiera załącznik składający się z trzech sekcji. Sekcja S1 mogłaby być usunięta z rozprawy bez większej szkody dla całości. Rozumiem jednak, że jest ona próbą usystematyzowania przez Autora fragmentów wiedzy z zakresu planowania eksperymentu oraz metod statystycznych. Sekcje S2 i S3 mogłyby zostać umieszczone w odpowiednich miejscach stosownych rozdziałów – osobiście nie widzę zalet wyprowadzenia tych fragmentów do załącznika.

Uzupełnieniem do ogólnej opinii są uwagi szczegółowe, przedstawione w kolejnej części recenzji.

4. Uwagi szczegółowe

Uwagi, komentarze i pytania do wybranych fragmentów rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Płuszki (bez podziału na uwagi edytorskie¹ i merytoryczne):

1. Strona 12: Wyrażenie „... poprzez doprowadzenie osiągnięcie stanu wrzenia ...” jest niepoprawne.
2. Strona 12: W wyrażeniu „7-18 K” zastosowano błędną jednostkę temperatury.
3. Strona 13: Zdanie rozpoczynające się od słów „Założeniem rozwijanych narzędzi CFD ...” jest dyskusyjne: a) czy narzędzia CFD mogą posiadać założenia?; b) czy stworzenie modelu numerycznego w jakimś programie obliczeniowym jest równoważne z rozwinięciem tego programu?
4. Strona 13: Sformułowanie „uzasadnienie wyboru numerycznej mechaniki płynu jako właściwej metody modelowania ...” jest niepoprawne. Czy numeryczna mechanika płynów, podobnie jak np. fizyka czy chemia, jest metodą modelowania?
5. Strona 23: Brak spójności językowej poszczególnych punktów listy numerowanej.
6. Strona 25/26: Kilukrotnie pojawia się błędna jednostka ciepła właściwego „J/(kg·T)”.
7. Strona 24/27/...: W pracy wielokrotnie pojawia się określenie „łoże AMR”, które to wystąpiło po raz pierwszy podczas opisu Rys. 2.8 i którego znaczenie nie zostało tam omówione (początkowo wydaje się, że jest to błąd literowy w słowie „złoże”). Kwestia ta wyjaśnia się dopiero kilkanaście stron dalej.
8. Strona 27: Dlaczego do oznaczenia natężenia pola magnetycznego stosuje się symbol B, zamiast wcześniej wprowadzonego symbolu H (str. 19)?
9. Strona 37: Ostatnie zdanie w 2 punkcie listy numerowanej jest językowo niepoprawne.
10. Strona 38: Ostatnie zdanie z podrozdziału 2.4 jest dyskusyjne. Zdanie to sugeruje, że należy dążyć do uzyskania maksymalnej różnicy temperatur za wszelką cenę, podczas gdy w praktyce chodzi zazwyczaj o osiągnięcie pewnego konsensusu pomiędzy wydajnością chłodniczą a innymi czynnikami, głównie kosztami. Autor już wcześniej wspomniał (str. 25), że kwestie ekonomiczne stanowią duże wyzwanie w komercyjnym rozwoju maszyn magnetokalorycznych.
11. Strona 41 (i dalsze): Autor wielokrotnie używa pojęcia „macierz Halbacha”. Warty byłoby wspomnieć, że wyjaśnienie tego terminu znajduje się dalej, w Rozdziale 3.3.
12. Strona 41: Co to jest „częstotliwość cyklowania”?
13. Strona 46: Podczas opisu roli CFD korzystnie byłoby przyjąć jedno kryterium podziału obszarów zastosowań, np. według obecnie obowiązującej klasyfikacji dziedzin nauki i dyscyplin naukowych.
14. Strona 47: Podział mechaniki płynów na mechanikę eksperymentalną, teoretyczną i numeryczną jest błędny. Sugeruje on, że mechanika numeryczna i eksperymentalna nie posiadają podstaw teoretycznych. Znacznie korzystniej byłoby podzielić mechanikę na eksperymentalną, analityczną (taką, w której można uzyskać rozwiązanie dokładne) oraz numeryczną (taką, w której uzyskuje się rozwiązanie przybliżone).
15. Strona 47: Stwierdzenie, że rozwiązanie numeryczne uzyskuje się w węzłach nie jest ogólne. Tak jest w przypadku Metody Różnic Skończonych bądź Metody Elementów Skończonych. W przypadku MOS stosuje się siatki centralne względem komórki, gdzie szuka się rozwiązania dla wnętrza komórek, a nie dla węzłów, na bazie których komórka została utworzona.
16. Strona 47: Współcześnie wyróżnia się 3, a nie 2 skale modelowania: 1) skalę mikro – dynamikę molekularną; 2) skalę mezo – dynamikę statystyczną (tu lokuje się np. równanie Boltzmanna i Metoda

¹ Aby nie rozbudowywać tej części recenzji, pominięto część błędów edytorskich.

Sobierl

28. Strona 57 (Q3): Stwierdzenie, że „W numerycznej mechanice płynów przyjmuje się założenie, że elementy modelowanego płynu znajdują się w stanie równowagi termodynamicznej” jest błędne. Równowaga termodynamiczna oznacza stan, w którym makroskopowe parametry układu, takie jak ciśnienie, objętość i wszystkie funkcje stanu, są stałe w czasie. Stwierdzenie to jest sprzeczne również z tym, co zostało przedstawione w Rozdziale 3.1. Skoro nic się nie zmienia, to po co wyprowadzać równania różniczkowe, które to opisują zmiany wybranych wielkości fizycznych w czasie?
29. Strona 59 (Q4): Zdanie „W równaniu 3.36 człon źródłowy SM został poszerzony względem równania (3.17) o mniej znaczące człony pochodzące od niutonowskiej formułacji tensora naprężeń [78]” nie jest zrozumiałe – tym bardziej, że tensor naprężeń jest obiektem zdefiniowanym dla powierzchni objętości skończonej, a człon źródłowy (z definicji) dotyczy oddziaływań zachodzących w objętości.
30. Strona 62: Domknięcia (tu wyrażenia na H_{wewn} , H_{zewn} itp.) wprowadza się do modelu matematycznego, a nie do symulacji.
31. Strona 65: Wyrażenie „... zagadnienie strata ...” jest niepoprawne.
32. Strona 68: Wyrażenie „... ponieważ składa tworzy go ...” jest niepoprawne.
33. Strona 69: Wyrażenie „... eliminuje się założeń upraszczające ...” jest niepoprawne.
34. Strona 70: Użyto tu pojęcia „współczynnik wykorzystania”, które to wyjaśniono dopiero na str. 84.
35. Strona 74/75: Występuje tu fragment o nieokreślonej strukturze (brak nagłówka, tytułu czy numeru), mający charakter streszczenia części drugiej. Zaburza on dotychczasowy układ treści oparty na częściach, rozdziałach oraz podrozdziałach. Korzystniej byłoby przyjąć jeden styl i dać albo jedno wprowadzenie do wszystkich części pracy, albo oddzielne wprowadzenia do każdej z jej części.
36. Strona 84: Zdanie „Na podstawie równania (4.2)” nie jest dokończone.
37. Strona 96: Wyrażenie „... oraz czas trwania ...” jest niepoprawne.
38. Strona 95: Warunek kończący działanie algorytmu iteracyjnego nazywa się warunkiem lub kryterium zbieżności. Nazwa „stop iterowania” nie jest poprawna.
39. Strona 97: Wyrażenie „Sformułowany model strat ciepła równania stabilizuje temperaturę strony gorącej ...” jest niejasne.
40. Strona 100: CFD to nie jest ani metoda, ani model.
41. Strona 101: Rozważania dotyczące koncepcji realizacji celów można by zacząć od omówienia i doboru oprogramowania. Autor od razu opisuje pakiet OpenFOAM, jakby nie było innych narzędzi obliczeniowych o podobnych możliwościach.
42. Strona 102: Wyrażenie „... które pełniły domknęły domenę ...” jest niepoprawne.
43. Strona 107: W pracy pojawiają się wzmianki o plikach STL. Warto by było wyjaśnić, dla Czytelników nie obeznanych z działaniem programu, że w OpenFOAM dostępne są dwie główne metody definiowania geometrii: za pomocą prostych obiektów geometrycznych, definiowanych bezpośrednio w odpowiednim słowniku, oraz poprzez import geometrii przygotowanej wcześniej w dowolnym programie typu CAD i zapisanej do jednego z kilku akceptowalnych formatów, np. plików STL.
44. Strona 110: Błąd w zdaniu „Ponadto w suplemencie S2 przedstawiono ponadto jej widok izometryczny.”
45. Strona 111: Przy opisie geometrii należałoby wyjaśnić dlaczego w układzie regionów nie zachowano symetrii osiowej (komentarz dotyczący tego wątku znajduje się dopiero na stronie 193).
46. Strona 112: Wyrażenie „... na granic faz ...” jest błędne.
47. Strona 112: Nie jest jasne na jakiej podstawie ustalono, że liczba cząstek powinna wynosić 1255?
48. Strona 113: W jaki sposób wygenerowano geometrię złoża porowatego widoczną na Rys. 6.5? Można domniemywać, że jest to to samo złożo co w Rozdziale 8, wygenerowane Metodą Elementów Dyskretnych w programie YADE.
49. Strona 113: Czy poszczególne cząstki złoża stykały się ze sobą w modelu czy też były odsunięte od siebie na pewną odległość (co sugeruje opis pod Rys. 6.5)?
50. Strona 113: Parametr nazwany przez Autora „rozwnięciem powierzchni” nazywany jest poprawnie powierzchnią właściwą. Istnieją dwie definicje powierzchni właściwej, w której za V przyjmuje się całą objętość próbki (jest to definicja Kozeny) lub tylko objętość części stałej (jest to definicja Carmana). Tu nie jest jasne, o który wariant chodzi (prawdopodobnie drugi).

Sabieł:

51. Strona 116: Tabela 6.5. wskazuje, że parametry złożeń zastępczych odbiegają istotnie od rzeczywistych parametrów złoża. Jaka jest zatem zasadność porównywania przypadków, w których takie kluczowe parametry jak masa gadolinu czy powierzchnia właściwa (powierzchnia wymiany ciepła) są tak różne?
52. Strona 116 (Q5): Nie jest jasne jak zmieniły się parametry złoża po zastosowaniu korekt geometrii przedstawionych na Rys. S7.
53. Strona 116: Opisany w załączniku algorytm łączenia zbyt blisko siebie leżących elementów istotnie zwiększa krętość ośrodka, a co za tym idzie zmienia pole przepływu płynu w przestrzeni porowej. Trudno uznać, że tak zmodyfikowana geometria nadal poprawnie reprezentuje złożo rzeczywiste. Przedstawione w załączniku komentarze wskazują, że sam Autor ma co do tego wątpliwości.
54. Strona 127: Autor stwierdza, że rozpatrywany w symulacji przepływ ma charakter laminarny. Warto by było umieścić tu informację, że dowód tego twierdzenia znajduje się dalej w pracy, a konkretnie w Tabeli 6.9.
55. Strona 130: Wyrażenie „... obliczana są ...” jest niepoprawne.
56. Strona 138: Sposób zapisu temperatur sprawia błędne wrażenie, jakoby temperatura po stronie zimnej była ujemna ($-17.03\text{ }^{\circ}\text{C}$).
57. Strona 145: Uwaga nr 1 wskazuje, że podstawowym warunkiem konwersji geometrii powinno być zachowanie masy gadolinu.
58. Strona 145: Powinno być „... dużą liczbę cząstek ...” a nie „... dużą ilość cząstek ...”.
59. Strona 145: Zdanie „Ze względu na dużą ilość cząstek tworzących złożo istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia takiej konfiguracji wzajemnych położenia cząstek, która zablokuje pewne obszary złoża i uniemożliwi jego pełne wykorzystanie w procesie wymiany ciepła” jest nieprawdziwe. W przestrzeni 3D zawsze istnieją kanały porowe wokół każdej sfery, szczególnie jeśli ich rozmiary są względnie podobne. Dlatego też nie można się zgodzić, że połączenia mostkujące poprawiają realizm złoża wirtualnego.
60. Strona 152/153: Niepoprawna konstrukcja językowa akapitu z punktami.
61. Strona 153: Nie jest jasne, dlaczego w tym modelu wybrano wariant a) geometrii, a nie wariant c), który poprzednio okazał się najlepszy.
62. Strona 154: W opisie pojawia się słowo „span”, które to wcześniej nie było używane i które to w pracy pisanej w języku polskim brzmi obco.
63. Strona 164: Nie jest jasne czym jest „wynik mieszaniny”.
64. Strona 167 (i dalsze): Nie jest jasne, dlaczego zaczęto stosować elementy wzmacniające wypowiedź, takie jak pogrubienie czy kursywa. Nie sprawia to dobrego wrażenia, sugerując że czytelnik prawdopodobnie nie zna takich metod czy koncepcji i powinien się porządnie skupić, aby zrozumieć zamierzenia Autora.
65. Strona 167 (Q6): Przyjęcie wartości współczynników DOE na poziomie 0.5 oraz 2.0 należy uznać za dyskusyjne. Podczas analizy wrażliwości układu powinno się przyjąć jednakową odchyłkę procentową dla każdego kierunku zmian. Wobec powyższego, współczynniki te powinny wynosić 0.5 i 1.5.
66. Strona 167 (Q7): Wartości współczynników DOE wydają się być błędnie oszacowane, dając nierealne wartości parametrów materiałowych. Przykładowo, jeżeli przyjąć że gęstość płynu – dla wygodnego liczenia – wynosi 1000 kg/m^3 , to wartość dolna w eksperymencie wyniesie 500 kg/m^3 , a wartość górna 2000 kg/m^3 (albo 1500 jeśli uwzględnić poprzednią uwagę). Jaki czynnik chłodniczy posiada aż tak dużą zmienność gęstości (tym bardziej, że w omawianych tu urządzeniach magnetokalorycznych uzyskiwane rozpiętości temperatur są niewielkie)? Dużo bardziej zasadne byłyby odchyłki na poziomie kilku czy, maksymalnie, kilkunastu procent. Poza tym, przyjmowanie tak odległych wartości skrajnych niesie ryzyko zaistnienia zjawisk bifurkacyjnych. Można sobie np. wyobrazić, że dla pewnych konfiguracji zmiennych ρ (gęstość) oraz μ (lepkość dynamiczna) liczba Reynoldsa wyniesie ponad 2300, co by znaczyło, że część punktów eksperymentu jest ulokowana w reżimie przepływu laminarnego, a część nie.
67. Strona 170: Wobec poprzednich uwag nie zgadzam się ze stwierdzeniem Autora, że wyniki z Tabeli 7.11 potwierdzają poprawność eksperymentu.
68. Strona 170/171: Sposób prezentacji wyników widoczny na Rys. 7.10 jest mało czytelny. Na osi x

Sobieski

powinna zostać umieszczona wartość danego parametru – najlepiej w postaci znormalizowanej względem wartości referencyjnej.

69. Strona 179: Wyniki widoczne w Tab. 7.13 wskazują, że być może należało przyjąć różne wartości współczynników DOE dla każdej zmiennej. Obecnie stan jest taki, że dla realnych danych współczynniki o wartości 0.5 i 2.0 są czasami mocno przeszacowane (szczególnie gęstość nie ulega większym zmianom), a czasami niedoszacowane (co odnosi się szczególnie do lepkości dynamicznej).
70. Strona 185: Nie jest jasne w jaki sposób wytypowano wspomnianą w przedostatnim punkcie podsumowania grupę potencjalnie najlepszych czynników chłodniczych.
71. Strona 192: Wyrażenie „... złoża porowatego pełniłoby ...” jest niepoprawne.
72. Strona 202: Zdanie „Zależności spadku ciśnienia oraz strumienia ciepła rozpatrywane niezależnie wskazują na rozbieżne wyboru optymalnego złoża porowatego tj. charakteryzującego się możliwie dużą intensywnością wymiany ciepła oraz możliwie niewielkim spadkiem ciśnienia przy przepływie” jest nieczytelne.
73. Strona 208: Badania związane z modelem 0D podsumowano w taki sposób, jakby to w całości było osiągnięcia Autora.

Przedstawione wyżej uwagi i komentarze nie obniżają istotnie jakości przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej. Moją intencją jest tu pomoc w dalszym rozwoju naukowym Autora i wskazanie wątków, które należałoby by w przyszłości ponownie przeanalizować lub przemyśleć. Ponieważ odpowiadanie na wszystkie uwagi i komentarze uważam za bezzasadne, proszę Autora o ustosunkowanie się jedynie do kilku z nich – tych oznaczonych symbolami od Q1 do Q7.

5. Opinia końcowa

Podsumowując przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską mgr. inż. Pawła Płuszki, pt. „Modelowanie numeryczne chłodziarki magnetokalorycznej – badanie wpływu właściwości termofizycznych płynu roboczego i struktury złoża regeneratora na przekazywanie ciepła”, stwierdzam, że w mojej opinii:

- uzyskane przez Doktoranta wyniki posiadają niewątpliwą wartość poznawczą i wnoszą oryginalne elementy do badań urządzeń magnetokalorycznych;
- tematyka badawcza lokuje się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka;
- jakość, sposób i zakres wykonanych prac dobrze świadczą o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata, a także o jego dużych umiejętnościach praktycznych, szczególnie w zakresie tworzenia złożonych modeli symulacyjnych (należy przy tym podkreślić, że oprócz Metody Objętości Skończonej, używanej w kluczowych fragmentach pracy, Autor wykazał się co najmniej podstawową wiedzą i umiejętnościami w zakresie stosowania Metody Elementów Dyskretnych) – całokształt wskazuje, że Doktorant jest dobrze przygotowany do dalszego, samodzielnego prowadzenia badań naukowych we wspomnianej wyżej dyscyplinie naukowej.

Wobec powyższego stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Płuszki pt. „Modelowanie numeryczne chłodziarki magnetokalorycznej – badanie wpływu właściwości termofizycznych płynu roboczego i struktury złoża regeneratora na przekazywanie ciepła” spełnia wymagania w sensie Art. 13. Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i **może stanowić podstawę do przeprowadzenia publicznej obrony**. Jednocześnie, ze względu na wysoką merytoryczną i edytorską jakość pracy oraz jej szeroki zakres, **wnioskuje o wyróżnienie** rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Płuszki.

Sobieski Wojciech

