

Dr hab. inż. Rafał KOBYLECKI, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
42-201 Częstochowa, ul. Dąbrowskiego 73
E-mail: rafal.kobylecki@pcz.pl

Częstochowa, 2024.01.22

Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Agaty WIDUCH

WPROWADZENIE

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja RUSINA, nr RIE-BD.512.79.2023 z dnia 6.XI.2023 oraz stosowną do niego umowę o dzieło nr UMC/3629/2023.

ZAKRES ROZPRAWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agaty WIDUCH nosi tytuł „Development Novel Approaches for Modeling Dense Granular Flows”. Pracę, napisaną po angielsku, stanowią łącznie 133 strony maszynopisu formatu B5, na których rozmieszczono 59 rysunków i 8 tabel. Manuskrypt oparty jest na 148 pozycjach bibliograficznych i adresach stron internetowych, w przeważającej większości anglojęzycznych. Rozprawa została podzielona na 7 głównych rozdziałów, a uzupełnia ją dodatkowo wykaz użytych w pracy skrótów oraz streszczenia w języku angielskim i polskim.

Zakres rozprawy dotyczy ważnego problemu, związanego z modelowaniem numerycznym przepływów dwufazowych z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz metod uczenia maszynowego. Prace naukowe w tym zakresie są intensywnie rozwijane na świecie – przede wszystkim z powodu znaczącego (w porównaniu do badań eksperymentalnych) zredukowania kosztów i możliwości stosunkowo prostego i nisko kosztowego zbadania wpływu wielu czynników i parametrów na dany wybrany proces i urządzenie przemysłowe w stosunkowo krótkim czasie. Potencjalne zyski takiego podejścia są szczególnie widoczne w przypadku porównania do konieczności realizacji np. badań przemysłowych na obiektach w dużej skali technicznej.

Zakres merytoryczny pracy jest niewątpliwie aktualny i wpisuje się w realizowane na świecie badania ukierunkowane na poprawę jakości predykcji i efektywności oraz warunków pracy różnego rodzaju układów przepływowych typu gaz – ziarna materiału sypkiego. Proponowane w recenzowanej rozprawie wykorzystanie metod uczenia maszynowego i sieci neuronowych w tego typu układach jest niewątpliwie nowatorskie, wpisując się w bieżące trendy światowe, związane z implementacją podejścia cyfrowego i IoT (tzw. Internet Rzeczy) do modelowania, kontroli oraz predykcji różnych maszyn i urządzeń oraz współpracy między nimi. W świetle powyższego,

podkreślić więc należy, że tematyka badawcza podjęta przez Autorkę recenzowanej rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej aktualna.

Odnosząc się do struktury rozprawy, zawiera ona 7 głównych rozdziałów, z których pierwszy poświęcony jest krótkiemu opisowi zjawiska fluidyzacji oraz scharakteryzowaniu różnych jego reżimów i typowej dla nich hydrodynamiki przepływów typu gaz – materiał sypki. Konsekwencją przedstawionych i omówionych w tym rozdziale zagadnień jest sformułowanie celu i powodów realizacji przez Autorkę przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej (podrozdziały 1.2-1.3).

W rozdziale drugim omówiono wybrane podstawowe sposoby podejścia do problematyki obliczeń i symulacji numerycznych oraz krótko scharakteryzowano wybrane modele matematyczne wykorzystywane w obliczeniach i symulacjach numerycznych ze szczególnym uwzględnieniem ich możliwego zastosowania do modelowania przepływów wielofazowych – w tym fluidalnych, zawierających ziarna fazy stałej. Zawarty w tym rozdziale opis poświęcono modelom obliczeniowym w których zastosowano podejście typu Euler-Euler, Euler-Lagrange oraz metodę elementów skończonych (DEM).

Kolejny rozdział (trzeci) poświęcony jest przedstawieniu i omówieniu problematyki uczenia maszynowego oraz zagadnień sieci neuronowych. Szerszą uwagę poświęcono kwestiom modelowania przepływu informacji, podejmowania decyzji przez sieć, a także problematyce analizy uzyskanych wyników i ich wykorzystania w procesie uczenia sieci neuronowych.

Rozdział 4 zawiera opis stanowiska badawczego oraz omówienie jego konfiguracji dla potrzeb zbadania zjawiska wzajemnych zderzeń ziaren w opadającym strumieniu gazu i ziaren fazy stałej. W badaniach wykorzystano dwie strugi zawierające cząsteczki mikrosfer wykonanych z polietylenu. W badaniach użyto dwóch populacji ziaren mikrosfer o średnicach zastępczych d_{50} odpowiednio 315 μm i 475 μm . Szczególną uwagę poświęcono analizie trajektorii ziaren w celu obliczenia ich prędkości w opadającej strudze. W rozdziale tym przedstawiono także procedurę analizy obrazów i szacowania niepewności pomiarowych.

Opis problematyki podejścia do modelowania zderzeń ziaren z wykorzystaniem wyników uzyskanych w ramach realizacji prac eksperymentalnych opisanych w rozdziale 4 zawarto w rozdziale 5. Obejmują one m.in. opis metodologii wykorzystanej do obliczania prędkości ziaren (rys. 5.2) oraz wizualizację możliwych konfiguracji kolizji ziaren (rys. 5.3). Porównano wyniki uzyskane z wykorzystaniem trzech sposobów modelowania, tj. HEL (Hybrid Euler-Lagrange), HELSCM (Hybrid Euler-Lagrange Surrogate Collision Model) oraz DEM (Discrete Element Method – metoda elementów skończonych). Dla potrzeb realizacji obliczeń stworzono model numeryczny układu obliczeniowego (rys. 5.9) zbliżony do stanowiska eksperymentalnego opisanego w rozdziale 4 (rys. 4.1). Pokazano także wyniki obliczeń przepływu dwóch strug ziaren obliczone z wykorzystaniem wybranych modeli (rys. 5.16). W rozdziale tym podjęto również próbę porównania wyników obliczeń map rozkładów ciśnienia, koncentracji oraz prędkości ziaren z wykorzystaniem

modeli HEL i HELSCM w wirtualnym uproszczonym mikromodelu geometrycznym kotła CFB (por. rys. 5.23 oraz rys. 5.25-5.27). W tej części pracy Autorka zaprezentowała także porównanie czasu niezbędnego dla wykonania wybranych obliczeń symulacyjnych w zależności od założonego kroku czasowego – wyniki przedstawiono na rys. 5.11 oraz 5.21

W kolejnym rozdziale, szóstym, przedstawiono schemat kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną dużej mocy (large-scale CFB), stanowiącego element bloku energetycznego 460 MW_e oraz wykonano obliczenia hydrodynamiki przepływu ziaren i gazu w takim obiekcie z wykorzystaniem różnego rodzaju modeli numerycznych – w tym używanych przez firmy komercyjne projektujące i wykonujące tego typu obiekty. W swoich obliczeniach, zrealizowanych dla dwóch wydajności kotła (około 64% i 98%) Autorka wykorzystwała m.in. zależności bilansowe dla bilansu masy i energii w wybranych elementach obiektu, jak również użyła stosowane w praktyce inżynierskiej oprogramowanie wykorzystujące zarówno jedno-, jak i trójwymiarowy model układu kotła CFB. Istotnym wkładem Doktorantki jest zwłaszcza wykorzystanie do predykcji hydrodynamiki kotła modelowania i modelu opartego na wykorzystaniu sieci neuronowych (ELROM). Jako wyniki pracy mgr inż. Agaty WIDUCH w rozdziale tym przedstawiono dla dwóch założonych obciążeń kotła m.in. wybrane mapy rozkładów w komorze paleniskowej składowej prędkości (rys. 6.11) oraz koncentracji ziaren fazy stałej (rys. 6.12) dla symulacji wykonanych z wykorzystaniem modelu EL3D oraz dwóch wersji modelu ELROM. Przedstawiono także wybrane mapy rozkładów pionowej prędkości ziaren w różnych przekrojach komory paleniskowej kotła CFB (rys. 6.13-6.14) dla obliczeń w których wykorzystano również trzy inne modele obliczeniowe, tj. CFD oraz dwa kody komercyjne, tj. SFW3D bez modyfikacji i SFW3D zmodyfikowany.

Wnioski z pracy zawarto w rozdziale 7, w którym dodatkowo wyodrębniono podrozdział 7.0.1, traktujący o planach dalszych prac do zrealizowania przez Autorkę.

OCENA ROZPRAWY

Tematyka podjęta i przedstawiona w recenzowanej rozprawie jest niewątpliwie bardzo interesująca – obecnie wciąż z naukowego punktu widzenia, lecz szersze zaimplementowanie tego typu wyników w praktyce przemysłowej jest moim zdaniem jedynie kwestią czasu – wymaga przede wszystkim doprecyzowania metodologii uczenia się dla konkretnego obiektu przemysłowego oraz uszczegółowienia modelowania z wykorzystaniem sieci neuronowych i sztucznej inteligencji. Należy podkreślić, że w ostatnich latach obserwuje się lawinowy wzrost nakładów oraz publikacji traktujących o szeroko rozumianej sztucznej inteligencji i badaniach w zakresie tzw. internetu rzeczy (IoT). W tym ujęciu istotną wartość dodaną zawartą w pracy i innowacyjny element naukowy stanowi niewątpliwie wykorzystanie przez Autorkę zmodyfikowanej techniki analizy obrazów do określania prędkości ziaren w przepływie dwufazowym oraz porównanie wyników obliczeń z wykorzystaniem różnych modeli omówionych w pracy (wyniki zestawiono w rozdziałach 5-6). Cenne jest także nabyte przez doktorantkę doświadczenie praktyczne oraz porównanie wyników dla różnych kodów komercyjnych. Moim zdaniem dobrze opisane są także kwestie w rozdziale 2

(Mathematical Models). Biorąc powyższe pod uwagę, podjęcie próby nowatorskiego podejścia do modelowania przepływów typu gaz-ziarna materiału sypkiego stanowi niewątpliwie wartość dodaną pracy, a wyniki uzyskane mogą być istotnym uzupełnieniem dotychczasowej wiedzy, stanowiąc dodatkowo istotny materiał poznawczy i bazowy dla tworzenia nowych modeli obliczeniowych oraz ich praktycznego zastosowania.

UWAGI KRYTYCZNE

Mimo niewątpliwie interesującej treści merytorycznej lektura recenzowanej rozprawy budzi także – co jednak zrozumiałe – również pytania i uwagi. Najważniejsze z nich to:

1. Przyjęty układ prezentacji spisu treści jest słabo czytelny, zwłaszcza w odniesieniu do kolejności podrozdziałów rozdziału 1 (Introduction). Ponadto, w spisie treści pracy brak jest numeracji głównych rozdziałów – zawiera je dopiero tekst główny manuskryptu. Brak jest również jasno sformułowanych tez pracy – moim zdaniem sformułowanie celu, tez oraz zakresu pracy powinno być ujęte w odrębnym rozdziale. Brak jest też listy parametrów używanych w równaniach podanych w pracy – niewątpliwie ułatwiłoby to lekturę.
2. Spis literatury – zwłaszcza w odniesieniu do prac z zakresu fluidyzacji – budzi uwagi. Czym kierowała się autorka w takim doborze publikacji? Prace dotyczące kotłów fluidalnych nie rozpoczęły się przecież w drugiej dekadzie XXI wieku, jak można by wnioskować ze spisu przytoczonej literatury. W tym zakresie godne polecenia są m.in. prace publikowane i prezentowane podczas branżowych konferencji kotłowych organizowanych przez Politechnikę Śląską – zwłaszcza w latach 1990-2010. W aspekcie modelowania (np. str. 15 pracy) – szkoda, że nie wspomniano o kodzie Barracuda (komercyjnym, opracowanym przez PSRI) oraz o pracach z zakresu DEM, które opublikowano pod koniec ubiegłego wieku. Dlaczego?
3. Co autorka rozumie przez „tradycyjne konstrukcje kotłów” (str. 7). Ponadto (tamże) nieprecyzyjne jest stwierdzenie, jakoby korzystny zakres temperatur w warstwach fluidalnych (800-950°C) był utrzymywany z powodu konieczności obniżania emisji NO_x – główny powód takiego zakresu temperatur jest inny (ten sam zarzut dotyczy tekstu na str. 10 i 11).
4. Termin 'loop seal' i 'drain section' na rys. 1.4 są moim zdaniem niepoprawne.
5. O jakiej gęstości mówimy odnośnie terminu ρ_p (równ. 1.2)?
6. Co oznacza „u_s” w równ. (2.19)?
7. Brak podania orientacyjnych wymiarów stanowiska pokazanego na rys. 4.1.
8. Co oznacza termin 'ln/min' w opisie w podrozdziale 4.1?
9. Zamiast danych w Tabeli 4.1 lepiej byłoby pokazać wartości albo przebieg dystrybucy rozkładów ziarnowych mikrosfer z polietylenu. Brak sprecyzowania co to za gęstość 1000 kg/m³?
10. Str. 52: W jaki sposób zdefiniowano maksymalny dystans jaki może przebyć ziarno na obrazie analizowanym. Co autorka rozumie pod pojęciami „manual analysis of several images” oraz „fluctuate over time a bit”?

11. Podpis pod rys. 5.22 jest niewłaściwy – chodzi chyba o liczbę zderzeń, a nie o ich kinetykę?
12. Czym kierowała się Autorka przyjmując geometrię układu pokazaną na rys. 5.23. W tym ujęciu sformułowanie, że jest to „geometria kotła CFB” jest chyba nieco na wyrost. Czy efekty brzegowe i ich ewentualny wpływ na wynik można pominąć dla przyjętej geometrii?
13. Brak wyjaśnienia (rys. 5.24) w jaki sposób „rekalibrowano” model oraz jak określano „exact velocities”?
14. Na rys. 5.25 brak jest opisu i pokazania lokalizacji osi przyjętego układu współrzędnych.
15. Na str. 86 powołano się na tabelę 6.3 mając chyba na myśli tabelę 5.2. Dla wygody czytelnika w Tabeli 5.2 należałoby też raczej podać konkretne równania, a nie tylko literaturę – tym bardziej, że dla części parametrów podano wartości liczbowe. Ta sama uwaga dotyczy Tabeli 6.1.
16. Dla wyników zestawionych na rys. 5.25 nie podano jednostek. Czy są to wyniki obliczeń dla modelu pokazanego na rys. 5.23? Czy zmiany ciśnienia (tekst na str. 87 oraz rys. 5.25) wzdłuż wysokości zmieniają się liniowo? Jak to się ma do danych rzeczywistych? Czy należy rozumieć, że w kotłach CFB rozkład koncentracji ziaren materiału sypkiego w przekroju poprzecznym jest równomierny?
17. Brak – choćby krótkiego – komentarza z czego wynika niesymetria pokazana na ostatnim wykresie na rys. 5.26 oraz różnice dla wartości ciśnienia na rys. 5.27.
18. Moim zdaniem informacje o wartości opałowej paliwa oraz wilgoci, itp. (rozdz. 6.2) to chyba dane wejściowe do obliczeń a nie ich wyniki jak pisze w tekście Autorka.
19. Odnośnie treści zawartej w podrozdziale 6.3, brak informacji jakich korelacji użyto dla obliczeń rozkładu materiału sypkiego wzdłuż wysokości złoża oraz w jaki sposób określano strumień cyrkulującego materiału sypkiego?
20. Co oznacza – według informacji zawartych w Tabeli 6.2 – że „numer of inlets” wynosi 1? Czy należy rozumieć, że skrzynia powietrzna w tym kotle jest jednostrefowa?
21. W Tabeli 6.4 zakres błędu dla „submodel 5” jest chyba zapisany niepoprawnie.
22. Opis pod rys. 6.10 jest nieprecyzyjny, a wyniki zestawione na rys. 6.10 nie są spójne z opisem w Tabeli 6.3. Czy – jak wynika z Tabeli 6.3 – „field #8” to aby na pewno „solid diameter averaged...”?
23. Czy mapy rozkładów prędkości zestawione na rys. 6.11 dotyczą prędkości średnich? Brak ponadto informacji dla jakiego czasu wykonywano obliczenia. Szkoda, że w pracy nie pokazano również wyników obliczeń dla płaszczyzn pionowych równoległych do przedniej ściany paleniska kotła – niewątpliwie przyczyniłoby się to do lepszego zobrazowania hydrodynamiki fluidyzacji złoża. Podobna uwaga dotyczy wyników zestawionych na rys. 6.12. Czy otrzymane wyniki były porównywane z danymi z rzeczywistego obiektu?
24. Zdaniem recenzenta, podrozdział 7.0.1 powinien być włączony do rozdz. 7 – pisanie o przyszłych planach wykracza chyba poza zakres treści rozprawy doktorskiej.

Ponadto podczas lektury widoczne są także pewne niedoskonałości natury edycyjno-stylistycznej, zwłaszcza w zakresie tłumaczenia na angielski oraz stylistyki zdań (np. „transforming fossil fuels into forms of high energy”) i użytego słownictwa (m.in. „fresh methods” – por. str. 14, i inne, a także tzw. literówek (np. w tytule rozdziału 6 – CFD), co utrudnia lekturę rozprawy. Uwagi te w większości mają jednak charakter głównie porządkowy.

WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agaty WIDUCH p.t. „Development Novel Approaches for Modeling Dense Granular Flows” stanowi oryginalny wkład w rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego zagadnień modelowania przepływów dwufazowych typu gaz – materiał sypki. Uzyskane i zestawione oraz opisane w pracy modele i wyniki mogą zostać wykorzystane w praktyce – zarówno do pełniejszego i bardziej dokładnego modelowania procesów przepływowych, jak i do optymalizacji zagadnień transportu pneumatycznego i suszenia, w których problematyka wzajemnych zderzeń ziaren fazy stałej jest istotna, chociażby z punktu widzenia erozji i rozdrabniania strumieniowego.

W opinii końcowej chcę podkreślić, że przedstawiając do recenzji swoją rozprawę doktorską mgr inż. Agata WIDUCH wykazała się wystarczającą wiedzą i umiejętnościami – zwłaszcza w zakresie realizacji zagadnień modelowania numerycznego. Kompozycja rozprawy tworzy spójną całość, a poziom merytoryczny spełnia niezbędne wymagania stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i **wobec powyższego wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Podpisał Rafał Kobyłecki

Częstochowa, 2024.01.22