

dr hab. inż. Sylwia Polesek-Karczewska, prof. IMP PAN

Instytut Maszyn Przepływowych
im. R. Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, Gdańsk 80-231

Gdańsk, 17.01.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Agaty Widuch
pt.: „Development novel approaches for modeling dense granular flows”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo nr RIE-BD.512.79.2023 Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, z dnia 6 listopada 2023 r. wraz z dołączoną rozprawą doktorską pt. „Development novel approaches for modeling dense granular flows” Pani mgr inż. Agaty Widuch.

Opiniowana praca powstała w Katedrze Techniki Ciepłej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, i jest efektem badań przeprowadzonych w ramach projektu NCN pt. „A novel approach for modeling of complex granular flows” oraz w ramach projektu NCBiR pt. “Development and demonstration of a computer system for controlling operation and managing the availability and reliability of industrial infrastructure based on artificial intelligence algorithms”.

2. Zawartość i ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do opiniowania rozprawa doktorska autorstwa Pani mgr inż. Agaty Widuch pt.: „*Development novel approaches for modeling dense granular flows*”, napisana jest w języku angielskim. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Wojciech Adamczyk.

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia numerycznego modelowania przepływów granularnych w odniesieniu do zjawiska fluidyzacji w kotłach energetycznych. Zaletą kotłów fluidalnych jest ich elastyczność w zastosowaniu różnego typu paliw, przede wszystkim tych o dużej zawartości wilgoci, oraz niska emisja NOx i wysoka sprawność procesu. W perspektywie najbliższych 20-30 lat, zapewnienie stabilności wytwarzania i dostaw energii wymagać będzie wykorzystania paliw stałych, w tym paliw odpadowych, jako uzupełnienia dla intensywnie rozwijających się, ale niestabilnych, systemów energetyki wiatrowej i słonecznej. Zastosowanie technologii kotłów fluidalnych wpisuje się w obecne trendy, zmierzające do zrównoważonego rozwoju, który uwzględnia wykorzystanie dostępnych surowców i konieczność redukcji emisji szkodliwych związków do atmosfery. Modelowanie numeryczne jako komplementarne do kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych, jest podstawowym wsparciem w zakresie projektowania i optymalizacji nowych jednostek, oraz

dostosowywania istniejących do nowych, alternatywnych, paliw. Większe możliwości dają niewątpliwie bardziej zaawansowane modele matematyczne, jednak dla usprawnienia procesu projektowo- optymalizacyjnego kluczowe pozostaje znalezienie kompromisu pomiędzy stopniem uszczegółowienia modelu a kosztem obliczeń.

W tym kontekście, tematykę podjętą przez mgr inż. Agatę Widuch w opiniowanej rozprawie uważam za aktualną i celową, a rozważany w pracy problem istotny z punktu widzenia badawczego, jak i aplikacyjnego.

3. Zawartość i treść rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje łącznie 133 strony. Została podzielona na 7 rozdziałów, z czego zasadnicza merytoryczna część pracy zawiera się w Rozdziałach od 2 do 6 (łącznie 110 stron), poprzedzonej wprowadzeniem (Rozdział 1), a zakończonej, kolejno, podsumowaniem i wnioskami (Rozdział 7), wykazem skrótów, bibliografią oraz krótkimi streszczeniami w języku angielskim i polskim.

Struktura pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jest logiczna i przejrzysta.

W **Rozdziale 1** (*Introduction*), stanowiącym wprowadzenie do tematyki rozprawy, Autorka przedstawia charakterystykę zjawiska fluidyzacji, odnosząc się jednocześnie do spalania w złożu fluidalnym ze wskazaniem jego podstawowych parametrów i zalet. Autorka opisuje m.in. poszczególne etapy fluidyzacji przy przejściu od złoża stałego (*fixed bed*) do cyrkulującego złoża fluidalnego (*circulating fluidized bed*), oraz strefy przepływu w komorze kotła fluidalnego. Przedstawiając krótką charakterystykę przepływu w kotle z warstwą pęcherzykową i cyrkulującą, oraz hydrodynamikę cząstki w przepływie, wskazuje na znaczenie oddziaływań cząstka-płyn w modelowaniu przepływów wielofazowych. Podkreślając złożoność opisu procesu fluidyzacji, która musi uwzględniać zmienne i wieloskalowe zjawiska chemiczne, oddziaływania fizyczne pomiędzy samymi cząstkami oraz cząstkami a przepływem, jak również rozpad i aglomerację cząstek, Autorka zwraca uwagę na wyzwania jakie stanowi modelowanie tego procesu. Odnosi się jednocześnie do kwestii potrzeby opracowania wiarygodnego, stabilnego i cechującego się dużym stopniem dokładności, numerycznego modelu zderzeń cząstek w ośrodkach o dużym udziale objętościowym cząstek stałych, a zarazem zapewniającego rozsądny czas obliczeń. Doktorantka dokonała przeglądu modeli obliczeniowych stosowanych do symulacji przepływów wielofazowych w systemach ze złożem fluidalnym, wskazując na ich podstawowe ograniczenia. Na tym tle wyjaśnia motywację do podjęcia tematyki oraz przedstawia zakres i zarysowuje cele pracy, które można określić następująco:

- *zintegrowanie dokładnego modelu kolizji (cząstek), bazującego na metodzie elementów skończonych (DEM) z uproszczonym hybrydowym modelem eulerowsko-lagranżowskim (HEL) przy wykorzystaniu algorytmów uczenia maszynowego, celem redukcji wymaganego czasu symulacji przy zachowaniu istotnego poziomu dokładności przewidywań modelu,*
- *wykorzystanie proponowanego zmodyfikowanego podejścia hybrydowego do predykcji parametrów kotła rzeczywistego z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym, w modelu obliczeniowym współpracującym z systemem kontroli i pracy kotła.*

Rozdział kończy krótka charakterystyka poszczególnych części rozprawy, dostarczająca informacji o jej strukturze.

Rozdział 2 (*Mathematical models*) zawiera opis podstawowych modeli numerycznych, stosowanych do opisu przepływów granularnych, tj. standardowego podejścia w ujęciu eulerowskim (*Euler-Euler* (EE)), hybrydowego podejścia eulerowsko-lagranżowskiego (*Hybrid Euler-Lagrange* (HEL)) oraz metody elementów dyskretnych (*Discrete Element Method* (DEM)). Opis obejmuje podstawowe równania bilansowe i korelacje oraz cechy rozważanych modeli.

Kolejny **Rozdział 3** (*Machine learning and neural networks*) poświęcony jest algorytmom uczenia maszynowego i sieciom neuronowym, które zostały wykorzystane w analizie zagadnienia zderzenia cząstek w przepływach granularnych, stanowiącej przedmiot rozprawy. W tym rozdziale Autorka przedstawiła m.in. koncepcje tworzenia drzew decyzyjnych oraz algorytmów optymalizacyjnych dla trenowania modeli uczenia maszynowego i sieci neuronowych, jak również wskaźniki oceny dokładności tych modeli (np. średni błąd bezwzględny (MAE), błąd średniokwadratowy (MSE), współczynniki określające wariancję zmiennych).

W krótkim **Rozdziale 4** (*Experimental test-rig for tracking particle collisions*) Doktorantka szczegółowo opisuje stanowisko pomiarowe, opracowane i zbudowane w laboratorium Katedry Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej dla potrzeb analizy ruchu zderzających się w przepływie cząstek oraz walidacji opracowanego nowego modelu służącego symulacji przepływu granularnego. W opisie, Doktorantka przedstawia kluczowe elementy stanowiska wraz z urządzeniami pomiarowymi i ich podstawowymi parametrami oraz procedurę pomiarową. Podaje również szczegóły programu komputerowego i metodyki analizy obrazu, które zostały zastosowane do identyfikacji położenia grupy cząstek śledzonych w przepływie oraz określania ich średniej prędkości, wraz z przeprowadzoną analizą błędów pomiarowych.

Kolejne dwa, bardziej obszerne rozdziały (5 i 6) stanowią kluczowe części rozprawy. W **Rozdziale 5** (*Development of simplified collision approach*) Doktorantka proponuje nowe podejście do opisu przepływu granularnego uwzględniającego zderzenia cząstek, nazwane zastępczym zderzeniowym hybrydowym modelem eulerowsko-lagranżowskim (Hybrid Euler-Lagrange Surrogate Collision Model (HELSCM)). Koncepcja opiera się na sprzężeniu modeli HEL i DEM poprzez uproszczony model wykorzystujący algorytm uczenia maszynowego (algorytm ML), pozwalający na szybką predykcję sił wynikających ze zderzeń cząstek, i w efekcie na skrócenie czasu obliczeń. Ta część pracy zawiera opis procedury generacji zbioru danych dotyczących zderzeń w drodze przeprowadzonych symulacji z podejściem DEM. Dane obejmowały prędkości cząstek, na podstawie których określono ich położenie oraz możliwe konfiguracje zderzeń; generacja danych została zautomatyzowana przy wykorzystaniu opracowanego do tego celu kodu Python, a do zapisywania ostatecznych informacji po zderzeniach zaimplementowano opracowaną w pakiecie ANSYS Fluent funkcję użytkownika (User Defined Function (UDF)). W dalszej części rozdziału Doktorantka przedstawia szczegóły dotyczące opracowania modelu zastępczego (Surrogate Model), obejmujące m.in. standaryzację zgromadzonych danych, poszukiwanie tzw. hiperparametrów oraz dobór takiej ich konfiguracji, która zapewni poprawę dokładności przewidywanych prędkości cząstek, jak

również koncepcję integracji modelu z kodem CFD. Przechodząc do opisu testów poprawności opracowanego modelu HELSCM i jego weryfikacji eksperymentalnej, Doktorantka podaje charakterystykę siatki numerycznej 3D dla geometrii odpowiadającej stanowisku pomiarowemu, warunki brzegowe i opisuje zastosowane metody rozwiązania zagadnienia. Następnie przedstawia porównanie wyników symulacji zderzających się strumieni granulanych przeprowadzonych przy zastosowaniu podejścia DEM i HEL, wskazując na ich różnice jakościowe, jak również na znaczące różnice w czasach obliczeń tymi metodami. Na tym tle uzasadnia potrzebę opracowania i implementacji alternatywnego modelu, który wykorzysta zalety obydwu modeli. W celu zbadania poprawności opracowanego modelu HELSCM, Doktorantka przeprowadziła symulacje dla dwóch grup zderzających się cząstek, wykorzystując trzy rozważane podejścia, tj. DEM, HEL i opracowany nowy model. Porównując uzyskane rezultaty wskazała na różnice w detekcji zderzeń pomiędzy modelami. Porównanie wyników symulacji odzwierciedlających konfigurację eksperymentalnego stanowiska badawczego, przeprowadzonych z zastosowaniem DEM i opracowanego modelu HELSCM, z wynikami pomiarów, pozwoliło Doktorantce wykazać wiarygodność zaproponowanego modelu pod kątem detekcji zderzeń i jego zalety w stosunku do podejścia DEM. Zwalidowany model HELSCM oraz model HEL, zostały w dalszym kroku wykorzystane do symulacji zjawiska fluidyzacji w kotle energetycznym o uproszczonej geometrii, których wyniki posłużyły wskazaniu różnic w przewidywanych modelami rozkładach prędkości, ciśnienia i udziału fazy stałej w rozważanej geometrii.

Podejście hybrydowe, wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji zostało także zastosowane do symulacji pracy wielkoskalowego kotła fluidalnego na przykładzie bloku elektrowni Łagisza (Będzin) o mocy elektrycznej 460 MW, czemu poświęcony jest kolejny, **Rozdział 6**, rozprawy (*Hybrid approach for modeling large scale CFD boiler*). W tym przypadku, opracowany model ML bazujący na wynikach obliczeń CFD posłużył predykcji pól parametrów w kotle dla potrzeb systemu monitoringu pracy urządzenia. W tej części pracy, Autorka przedstawia strukturę modułu obliczeniowego kotła i szczegółowo opisuje pięć numerycznych modeli składowych systemu, a mianowicie: i) ogólny model bilansowy kotła (MEBal), ii) jednowymiarowy model strefowy kotła (SFW1D) do obliczeń wymiany ciepła, składu fizykochemicznego złoża i rozkładu ziarnowego, iii) model trójwymiarowy typu Euler-Euler (SFW3D) do symulacji wymiany ciepła i masy pomiędzy fazami, iv) trójwymiarowy model hybrydowy typu eulerowsko-lagranżowskiego (EL3D) do opisu toru ruchu cząstek i hydrodynamiki złoża fluidalnego oraz v) model, bazujący na sieci neuronowej (ELROM). Przedstawiony opis zawiera także omówienie schematu przekazywania danych pomiędzy sprzężonymi modelami. Integracja i współpraca modeli wymagała stworzenia bazy danych, do czego wykorzystany został aplikacyjny interfejs programistyczny API. Podejście, polegające na inicjacji modelu SFW3D przy wykorzystaniu danych pochodzących z modeli EL3D lub ELROM, jak stwierdza Doktorantka, pozwoliło uzyskać wyniki o większej dokładności.

Podsumowanie, zawarte w **Rozdziale 7** (*Summary and conclusions*) jest syntetycznym opisem zrealizowanych przez Doktorantkę badań, przedstawiającym najważniejsze elementy pracy oraz potencjalne kierunki badań na przyszłość.

Wykaz literatury, zamieszczony po rozdziale 7, obejmuje łącznie 148 pozycji, w tym, poza pozycjami książkowymi, 55 prac związanych z poruszaną tematyką opublikowanych

w renomowanych czasopismach w ostatnim dziesięcioleciu. Należy zauważyć, że 12 z nich stanowią prace związane z najbliższym środowiskiem badawczym Doktorantki, w tym 4 to prace, których współautorem jest Doktorantka, opublikowane w ostatnich latach (2021 i 2023) w uznanych czasopismach, jak Energy oraz International Journal of Multiphase Flow.

4. Ocena merytoryczna i istotne osiągnięcia rozprawy

Opiniowana praca Pani mgr inż. Agaty Widuch poświęcona jest tematowi aktualnemu badawczo i o istotnym znaczeniu aplikacyjnym. Metodyka przeprowadzonych badań, obejmująca: i) przegląd stanu dotychczasowej wiedzy dotyczącej podjętej problematyki, w tym ii) przegląd dostępnych modeli numerycznych służących symulacji przepływów wielofazowych pod kątem ich stosowalności, iii) sformułowanie wyzwań i celu prowadzonych badań, a następnie iv) zaproponowanie i implementację nowych podejść do rozwiązania problemu badawczego, v) testy ich użyteczności i poprawności, oraz v) weryfikację eksperymentalną, świadczy o usystematyzowanej wiedzy Doktorantki w obszarze poruszanych zagadnień oraz jej dojrzałości naukowej.

Praca obejmuje szeroki zakres prac. Wnioski, wynikające z przeprowadzonych badań i analiz są zasadniczo logiczne, i przejrzyste.

Podsumowując stronę merytoryczną opiniowanej rozprawy, należy podkreślić jej oryginalność i dużą wartość poznawczą, na które składają się:

- weryfikacja i porównanie przydatności różnych modeli numerycznych (DEM, HEL) w zastosowaniu do symulacji przepływów ziarnistych o dużym udziale frakcji stałej,
- wykorzystanie techniki uczenia maszynowego do identyfikacji kolizji cząstek i przewidywania ich zachowania w przepływie, oraz sprzężenie opracowanego algorytmu z istniejącymi modelami CFD,
- zastosowanie zaawansowanych technik kontrolno-pomiarowych (z wykorzystaniem szybkiej kamery) oraz metod obróbki i analizy danych (analiza obrazu) w zakresie identyfikacji i analizy zderzeń cząstek stałych w przepływie granularnym,
- zastosowanie narzędzi i technik do tworzenia baz danych oraz zarządzania danymi w strukturze zintegrowanych modeli (Python, interfejs programistyczny API).

Zaprezentowane w rozprawie nowe podejście do modelowania zagadnienia gęstych przepływów granularnych w kotłach fluidalnych, z wykorzystaniem techniki uczenia maszynowego stanowi niewątpliwie osiągnięcie naukowe Doktorantki. Na uwagę zasługuje istotna **wartość użyteczna** uzyskanych rezultatów, do której można zaliczyć, jako najważniejsze:

- opracowanie modelu numerycznego dla gęstego przepływu granularnego z uwzględnieniem oddziaływań cząstka-cząstka, znacznie usprawniającego symulację procesu przy zachowaniu dużego stopnia dokładności uzyskiwanych rezultatów, a tym samym o dużym potencjale zastosowania w projektowaniu i optymalizacji urządzeń w skali rzeczywistej,
- zastosowanie metody sieci neuronowych w zaawansowanym modelu numerycznym wielkoskalowego kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, służącym do predykcji pól

jego parametrów w ramach zintegrowanego systemu monitorowania i inteligentnego sterowania kotłem.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Pod względem merytorycznym opiniowaną pracę oceniam pozytywnie. Pozwolę sobie jednak na sformułowanie kilku uwag i pytań, które nasunęły się w trakcie lektury rozprawy:

- 1) Cele (lub cele szczegółowe) pracy nie zostały dostatecznie uwypuklone. Główny cel badań wskazany jest w rozdziale 1.3, choć nie jest on wyraźnie sformułowany; Doktorantka przytacza go ponownie, w innych słowach, w rozdz. 2 (str. 23, drugi akapit). To wprowadza pewien chaos i utrudnia lekturę.
- 2) Spis oznaczeń zawiera jedynie stosowane w pracy skróty; brak jest zestawienia wielkości (i ich jednostek) występujących w równaniach, co zdecydowanie ułatwiłoby analizę przedstawionych zagadnień.
- 3) Na str. 11 Autorka wspomina o zastosowaniu kotłów CFB do spalania paliw o wysokiej zawartości wilgoci; wskazane byłoby podać, o jakim poziomie zawartości wilgoci mowa. Odnosi się także do roli tychże urządzeń w termicznej utylizacji odpadów – można byłoby się pokusić o przytoczenie paru konkretnych przykładów instalacji. Ponadto, w mojej opinii, w przeglądzie stanu wiedzy (rozdz. 1.4) zabrakło szerszego tła dotyczącego przydatności proponowanych w literaturze modeli kolizji cząstek i skwantyfikowania wpływu ich zastosowania, nie tylko pod kątem czasu obliczeń (pojęcia typu „znacząco” są mało precyzyjne), ale także ze wskazaniem wpływu na uzyskane rozwiązanie.
- 4) Str. 26 – szerszego wyjaśnienia wymaga przejście od równania (2.16) do (2.17); jak należy rozumieć wspomniane „niestabilności w równaniu (2.16)”? Autorka wspomina o pominięciu członu konwekcyjnego, co z pozostałymi członami równania? Pierwszy człon prawej strony równania (2.16) wymaga pełniejszej definicji, podobnie jak definicja k_{θ} . Funkcją jakich parametrów jest k_{θ} ?
- 5) Str. 26, 30 – brak konsekwencji w zapisie wielkości wektorowych, np. błędny zapis prędkości w wyjaśnieniu członu dyssypacji w tekście (inny niż w równaniu (2.16)) oraz sił w równaniu (2.31).
- 6) Str. 29 – ostatni człon równania (2.26), podobnie jak pozostałe, powinien mieć wymiar przyspieszenia; w opisie został on określony jako „prędkość i położenie cząstki, określone na podstawie udziału fazy stałej w komórce obliczeniowej”. Jak to rozumieć?
- 7) Str. 35, równanie (3.4) - brak wyjaśnienia parametrów y i n .
- 8) Str. 45, równanie (3.18) – błędy w równaniu i opisie do równania.
- 9) Str. 61 – Autorka pracy wymienia cztery metody poszukiwania najlepszych hiperparametrów, przy czym dwie z nich, choć różniące się schematem działania, określone są tym samym pojęciem „grid search”. Czy to zasadne?
- 10) W procesie tworzenia modelu zastępczego (SM) oddziaływania cząstek, 5% wygenerowanych danych przeznaczono do testowania modelu, a spośród pozostałych, 25% do walidacji i 75% do procesu uczenia (str. 61, rozdz. 5.2). Skąd wynika taki

podział? Jak na dokładność (wiarygodność) modelu mógłby wpłynąć inny podział zbioru danych?

- 11) Wyniki uzyskane dla uproszczonej geometrii kotła wskazały na znaczące różnice w rozkładach analizowanych parametrów (Rys. 5.25). Dla oceny poprawności zaproponowanego modelu, wskazane byłoby odniesienie się do rzeczywistych rozkładów parametrów.
- 12) W przypadku symulacji procesu fluidyzacji w kotle laboratoryjnym (rozdz. 5.6.3) uwzględniono współczynniki odbicia cząstek od ściany na poziomie 0.8 (Tab. 5.2). Z kolei, w symulacjach dla kotła wielkoskalowego przyjęto wartości 0.8 i 0.5 (Tab. 6.1), odpowiednio, dla kierunku normalnego i stycznego (przypuszczalnie, bo w tabeli prawdopodobnie wkraść się błąd edytorski). Dlaczego przyjęto takie wartości? Parametr ten nie był uwzględniony w obliczeniach dla przypadku uproszczonej geometrii (Tab. 5.1), dlaczego?
- 13) Str. 64 – wspominając o zaproponowanej modyfikacji modelu HEL do HELSCM, Autorka powołuje się na Rozdział 3, w którym przedstawiono charakterystykę zastosowanych algorytmów uczenia maszynowego i sieci neuronowych. Sformułowanie to wymagałoby wyjaśnienia/doprecyzowania.
- 14) W dyskusji wyników brak jest odwołania do Rys. 5.13 i 5.14 (str. 72); podobnie jest w przypadku Rys. 5.22 (str. 81-82),
- 15) W rozdziale 5.6.2 brak jest odniesienia do Rys. 5.24; zamiast tego Autorka odnosi się do Rys. 5.6., analogicznego co do trendu, ale dotyczącego przypadków testowych.
- 16) Rys. 5.23B – sądząc po skali, wymiary kotła podane na rysunku są błędne (np. wlot i wylot nie mogą być tego samego rozmiaru, itp.).

6. Uwagi natury redakcyjnej

Skład rozprawy jest estetyczny, rysunki i schematy stanowiące ilustracje do rozważanych zagadnień, prezentowania i dyskusji uzyskanych wyników są czytelne i wyczerpująco opisane. Praca jest napisana w języku angielskim, sformułowania są zasadniczo poprawne. Zastrzeżenia budzi jednak strona językowa i redakcyjna pracy; zawiera ona liczne błędy (językowe, interpunkcyjne), nieścisłości, powtórzenia oraz usterki redakcyjne, których przykłady wskazuję poniżej:

- str. 13 – dwukrotnie zdefiniowana wielkość H , po równaniu (1.1), jak i (1.2),
- Rys. 1.5 (str. 16) – brak tytułu osi pionowej,
- str. 22 – do czego odnosi się “...as detailed in the paper”?; podobnie na str. 92 (pierwsze zdanie).
- str. 24, 25, 27, 29-31 - brak nawiasów przy odniesieniach w tekście do równań (2.5), (2.6), (2.7), (2.19), (2.20), (2.26), (2.32),
- str. 29-30 – w równaniu (2.30) pojawia się f zamiast g ; w opisie do równania niepotrzebnie powtórzono definicje wielkości, podanych w opisie do równań (2.1) – (2.4) (str. 24),
- str. 31, równanie (2.36) – inne oznaczenie dla współczynnika tarcia w równaniu i opisie,
- str. 35, rozdz. 3.1.2 – błędny zapis wielkości „Entropy”, w tekście i w równaniach,

- str. 38, równanie (3.5) – błędne wyrażenie pod znakiem sumy, powinno być f_i ,
- str. 40 – Zdanie “The simplest neural...” jest zbędne (jest powtórzeniem informacji podanej w 1. zdaniu rozdz. 3.2 (str. 39)),
- rozdz. 3.2 - skrót RELu powinien być wyjaśniony w tekście (str. 40-41); Rys. 3.6 – brak oznaczeń osi poziomych i definicji funkcji $g(z)$, jak ma się postać pochodnej funkcji RELu do jej wykresu?; brak jest odniesień do równania (3.8) oraz rysunków 3.7 i 3.8. Dla jasności wywodu, w opisie schematów powinny się znaleźć także odniesienia do oznaczeń na rysunkach,
- str. 43 - w opisie do równania (3.10) mowa jest o indeksach „new” i „old”, które nie występują w równaniu; ponadto, oznaczenie funkcji kosztu (J) nie koresponduje z oznaczeniem na Rys. 3.9B,
- str. 50 – Tabela 4.1, brak oznaczenia wielkości występujących w wierszu 1 (np. fraction, range)
- str. 54 – równanie (4.5); czy pod pierwiastkiem nie powinny się w nim pojawić ostatnie dwa człony występujące po prawej stronie równania (4.4)?,
- str. 56 – we wstępie Rozdz. 5, Autorka odwołuje się do równania (2.26) w kontekście sprzężenia modelu SM z modelem HEL. Czy nie chodzi raczej o równanie (2.31)?,
- str. 61 – zdanie “Here, its is...and test sets” powinno znaleźć się w opisie po równaniu (5.2),
- str. 70, Rys. 5.11 – błąd w zapisie wartości kroku czasowego (powinno być 7.14×10^{-5}); podobnie na Rys. 21 (str. 81),
- str. 72 – błędne odniesienie do rysunku ilustrującego obszar obliczeniowy (powinno być Rys. 5.9 zamiast Rys. 5.3); podobnie, w tekście i w podpisie Rys. 5.13-5.16,
- str. 74, Rys. 5.14 – w podpisie rysunku podano liczbę 88 elementów, podczas gdy w opisie na str. 72 mowa jest o 85 elementach,
- str. 78 – przywołany człon opisujący przyspieszenie cząstki z równania (2.26) jest niepoprawny; siła zderzenia występuje w równaniu (2.31); niepoprawne zdanie „Comparison the experimental... along the channel”,
- str. 88, Rys. 5.25 – nieodpowiednia skala dla rozkładu udziału frakcji stałej (niewystarczająca liczba cyfr znaczących na skali), brak układu współrzędnych i jednostek wielkości,
- str. 89, ostatnie zdanie przed Rys. 5.26 – dotyczy raczej modelu HEL,
- niekonsekwencja w oznaczeniach składowych prędkości („y-velocity” na Rys. 5.25 i 5.26, „v-velocity” np. na Rys. 5.24),
- str. 94, rozdział 6.1 – drugi akapit jest w zasadzie, w całości, powtórzeniem pierwszego,
- str. 107 – równanie (6.1) jest powtórzeniem równania (5.2),
- błędy gramatyczne i literowe:
 - str. 9 – niepoprawna konstrukcja zdania „...particles is so small, therefore...”
 - str. 11 – powinno być “**in** Figure 1.4”,
 - niefortunne sformułowania: „**fresh** methods” (str. 14), „**measure**” (w odniesieniu do wyników symulacji, str. 89)
 - str. 19 – powinno być “which allow to introduce user’s (lub users’)",
 - str. 20 - “**The** another article...”

- str. 21 – powinno być “reduced” zamiast “reducing”;
- str. 22 - “The comparison...**are** included...”
- str. 26 – “solif”; “determied”; “omiiing”; brak “for” w zdaniu “is determined each solid...”; brak “be” we frazie “It can understood as...”,
- str. 28 – “ot”; niejasne zdanie “In the continuous phase...”
- błędna forma “on the Figure...” zamiast „in Figure...” – w kilku miejscach,
- str. 30 – „**stabilization** problems” (poprawniej: „stability problems”)
- str. 31 – ”is calculates as”,
- str. 37 – ”ense**bm**le”,
- str. 49 – ”overview **od** the test-rig” w podpisie Rys. 4.1,
- Rozdz. 6.4 - błąd w tytule (“Steady-**sate**”),
- Str. 68 – “does not precisely detects”,
- Str. 83 – brak ”in” w zdaniu ”In addition, Figure 5.23A, the volume...”,
- Str. 99 – ”..are models by black-box...”,
- Str. 100 – ” of **an** real scale”, ”oxydixer”,
- Str.101 – “Instead of returning particles **do** specific cells...”
- Abstrakt – „wielowfazowe”, „Zjawisto **te**”, „użuyciem”, „Podejście **te**”, „kotłem **z** znajdującym się”
- str. 18 – podobne sformułowania w kolejnych zdaniach, tj. ”... has its drawbacks.” oraz “...they all have their drawbacks”; “To be more precise” (ostatni akapit),
- str. 116 – błędna numeracja podrozdziału (7.**0**.1),
- niejasne/niepełne zdania:
 - str. 18 – zdanie (ostatni akapit) „In the first part ...”,
 - str. 20 – Zdania: “As the result...”, “As variables determining ...”
 - str. 21 – ”To gather the data ...”,
 - str. 23 –“Starting with mass...” (brak dalszego ciągu zdania),
 - str. 48 – ”Figure 4.1A, with...”
 - str. 56-57– „To not introduce too many...for future application”,
 - Str. 66 – niepoprawne zdanie ”Since the air flow fed by the side arm”,
 - Str. 68 – niejasne zdanie “To model the collision...”, (powtórzone na str. 86)
- Spis literatury:
 - nietypowy format (tzn. nazwy czasopism w cudzośliwie)
 - brak wielkich liter w nazwach własnych i skrótach (np. [9], [16], [19], [21], [24], [28], itp.),
 - niepełne dane bibliograficzne (np. prace [17], [22], [31], [48], [79], [93], [107], [127], itp.),
 - brak tłumaczenia tytułów prac polskojęzycznych.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne i wątpliwości, jak i uwagi dotyczące usterek redakcyjnych, nie umniejszają mojej ogólnie pozytywnej oceny pracy.

7. Wniosek końcowy

Podsumowując recenzję opiniowanej pracy Pani mgr inż. Agaty Widuch stwierdzam, że przedmiotowa rozprawa jest interesującą i wartościową pracą naukową, a zawarte w niej badania i ich analiza stanowią oryginalne rozwiązanie problemu badawczego.

Opiniowana rozprawa stanowi istotny wkład w badania w obszarze zagadnień związanych z modelowaniem gęstych przepływów granularnych i zaowocowała publikacjami w renomowanych czasopismach naukowych. W trakcie jej przygotowania Doktorantka wykazała się obszerną wiedzą z zakresu zagadnień związanych z metodami numerycznego modelowania i analizy przepływów w kotłach fluidalnych, mieszczących się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Realizując zamierzone cele, Doktorantka dowiodła, że posiada umiejętności wykorzystania dostępnych narzędzi i zaawansowanych technik obliczeniowych do symulacji przepływów wielofazowych, tworzenia własnych modeli, jak również realizacji badań eksperymentalnych w tym obszarze, co potwierdza jej przygotowanie do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że:

rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Widuch spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim wynikające ze stosownych, aktualnie obowiązujących przepisów. Na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Doktorantki do jej publicznej obrony.

