

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

Instytut Maszyn Przepływowych
im. R. Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszer 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 Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki 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 NO_x 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 granularnych 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. Zweryfikowany 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 stosowności, 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 technik 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 $k\theta$. Funkcją jakich parametrów jest $k\theta$?
- 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 wkradł 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 wyводу, 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”; “omijing”; 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 – “enseble”,
- 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”, „uzyciem”, „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 cudzysłowie)
 - 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.

Podpisała Sylwia Polesek-Karczewska