

STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa doktorska poświęcona jest analizie procesu przepływu ciepła i masy przez złoża materiałów granularnych. Szczególną uwagę poświęcono opracowaniu i weryfikacji metody symulacji przepływu ciepła i masy przez tego typu złoża. W pracy wykorzystano zaawansowane metody numeryczne pozwalające na wnikliwą analizę wpływu rodzaju granulatu, jego parametrów oraz rozmieszczenia na parametry przepływu. Przedstawiony został obecny stan wiedzy w zakresie przepływu ciepła i masy przez złoża materiałów granularnych ze szczególnym naciskiem na fizykę procesu przepływu oraz metody badawcze. Szczegółowo opisano model matematyczny oraz algorytm obliczeniowy, który posłużył do przeprowadzenia symulacji numerycznych. Weryfikację zaproponowanej metody przeprowadzono przy użyciu programu ANSYS Fluent, dostępnych danych literaturowych oraz danych uzyskanych z samodzielnie przeprowadzonego eksperymentu laboratoryjnego. Kluczowym zadaniem eksperymentu było zbadanie wpływu zmian temperatury zewnętrznej na rozkład temperatury we wnętrzu warstw w zależności od ich struktury i właściwości fizycznych. Otrzymane wyniki wskazały na bardzo złożony przepływ i wymianę ciepła wewnątrz warstw. Wykazano, że temperatura wewnątrz warstw może być skutecznie zmieniana i kontrolowana przez parametry przepływającego przez nie powietrza.

W pracy przedstawiono nowatorski algorytm obliczeniowy do modelowania procesów wymiany ciepła i masy wokół pojedynczych elementów oraz wewnątrz warstw granularnych. Złożone struktury warstw były modelowane techniką Immersed Boundary (IB), która pozwala na zastosowanie siatek kartezjańskich dla obiektów o bardzo skomplikowanych kształtach i w dowolnej formie kontaktu (punkt-punkt, punkt-powierzchnia itp.). Dyskretyzację przestrzenną przeprowadzono metodą różnic kompaktowych wyższego rzędu oraz stosując schemat WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) na siatkach obliczeniowych, w których położenia węzłów przechowujących wartości prędkości, gęstości i temperatury były częściowo przesunięte względem położenia węzłów ciśnienia. W porównaniu z konwencjonalnym układem węzłów, obecne podejście działa stabilizująco, co jest bardzo pożądane w przypadku nagłej zmiany geometrii wewnątrz siatek obliczeniowych, zwłaszcza przy zastosowaniu dyskretyzacji wysokiego rzędu. Słabością metod wyższego rzędu jest bowiem to, że stają się one niestabilne, gdy pole przepływu charakteryzuje się dużymi gradientami prędkości i temperatur lub nieciągłościami w dziedzinie rozwiązań. W przypadku warstw granularnych takie nieciągłości są spowodowane przez stałe elementy granularne osadzone w obszarach obliczeniowych przepływu. W niniejszej rozprawie pokazano, że proponowana metoda bazująca na technice *immersed boundary*, (IB) jest stabilna i może być stosowana do rozwiązywania problemów przepływowych w rzeczywistych konfiguracjach. Według najlepszej wiedzy autora, połączenie metody dyskretyzacji wysokiego rzędu z metodą IB jest nowatorskie i może być zaimplementowane w dowolnym kodzie numerycznym.

Część badawcza pracy podzielona została na trzy części. W części pierwszej uwaga poświęcona została analizie procesu przepływu wokół pojedynczych elementów. Jako przypadki testowe wybrano stosunkowo proste konfiguracje przepływu wokół pojedynczych elementów w celu weryfikacji wybranej metody obliczeniowej. Uzyskane za jej pomocą wyniki okazały się prawie identyczne z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu programu ANSYS Fluent z siatkami dopasowanymi do elementów i dostępnymi danymi zaczerpniętymi z literatury.

W drugiej części pracy skupiono się na zagadnieniach przepływu ciepła i masy przez złoża materiałów granularnych. Zachowanie przepływu analizowano dla złożeń wyidealizowanych o założonej strukturze, składających się z kul ułożonych symetrycznie oraz dla rzeczywistych

złóż z losowo umieszczonymi kulami, cylindrami i pierścieniami Raschiga, które są powszechnie stosowane w przemyśle. Analiza pokazała, że zachowanie się przepływu, zarówno w warstwie materiału granularnego, jak i za nią w różnym stopniu zależą od parametrów takich, jak ułożenie granulatu, jego wielkość, temperatura, prędkość przepływu. Wykazano, że poprzez zmianę parametrów złoża można sterować procesem przepływu ciepła i masy przez złoża materiałów granularnych oraz istotnie wpływać na rozkłady i maksymalne wartości parametrów takich jak np. temperatura, prędkość, czy wirowość. Pokazano, że przepływy w złożach materiałów granularnych charakteryzują się bardzo złożoną strukturą (obszary recyrkulacji i stagnacji), a konfiguracja warstw granularnych znacząco wpływa na efektywność mieszania i wymiany ciepła. Między innymi stwierdzono, że zastosowanie mniejszych kulek i ich naprzemienne rozmieszczenie w kolejnych warstwach złóż strukturalnych sprzyja wymianie ciepła pomiędzy złożem granularnym i przepływem. Natomiast elementy cylindryczne w złożach 'losowych' wprowadzały największe wartości wirowości i wielkości składowych prędkości za warstwą granulatu, ale także największe wartości spadku ciśnienia. Wykazano istnienie różnej wielkości obszarów recyrkulacji rozwijających się za elementami złóż. Ich identyfikacja jest niezwykle ważna, ponieważ determinują one proces wymiany ciepła między fazą stałą i przepływającym medium.

Ze względu na fakt, iż granulaty są często wykorzystywane do zwiększania powierzchni ścian w celu lepszej wymiany ciepła, dodatkowo w trzeciej części pracy, skupiono się na wykorzystaniu materiału granularnego do formowania powierzchni. Analizie poddane zostały prostopadłościennie kanały, w których jedna ściana posiadała pofalowanie lub chropowatość (naniesione obiekty sferyczne, kule) w różnych konfiguracjach ułożenia. Zbadano wpływ różnych topologii powierzchni (dwu- i trójwymiarowych – 2D i 3D) na przepływ. Stwierdzono, że im wyższa amplituda falistej powierzchni, tym większa produkcja intensywność turbulencji. Zaobserwowano, że w konfiguracji 3D, występował mniejszy wzrost wszystkich składowych fluktuacji prędkości oraz mniejszy wzrost prędkości w stosunku do przypadku 2D przy porównywalnej amplitudzie pofalowania ściany. Dla przypadków z chropowatością stwierdzono, że zwiększenie średnicy kul powoduje większą siłę oporu, co przypisuje się większemu zablokowaniu przekroju poprzecznego kanału i występowaniu recyrkulacji pomiędzy kulami o dużej średnicy. Profile prędkości w sąsiedztwie kul były w dużej mierze zależne od ich średnicy i wraz z wzrostem rosły lokalne wartości prędkości. Stwierdzono, że rozmieszczenie kul odgrywa ważną rolę tylko wtedy, gdy kule są duże, a powstałe za nimi strefy recyrkulacji charakteryzują się różną intensywnością i wielkością. W takich przypadkach rozkład kul można traktować jako parametr kontrolny mający wpływ na lokalne tarcie powierzchniowe, a tym samym siłę oporu występującą na powierzchni kul i intensywność turbulencji.