

MAREK JASZCZUR

Numerical modeling of the fluid-particle interaction in non-isothermal turbulent channel flow with dispersed phase

Summary

Flow with small solid particles or droplets has recently received considerable attention for its relevance to numerous industrial processes, engineering applications and environmental flows. However, researchers have focused mainly on isothermal particle-laden flows. Experiments and numerical computations using Direct Numerical Simulations demonstrate that isothermal shear flow has a very complex effect on particle behavior. Due to particle-turbulence interaction, the distribution of particles and their properties (e.g., velocity) can be highly non-uniform. This non-uniformity can have very important consequences on the process – for example, affecting the efficiency of the chemical reaction or the properties of the mixtures.

This work thoroughly investigates the dynamics of small heavy inertial particles in non-isothermal turbulent fully developed channel flow. The cases presented are representative of a large family of phenomena known in the literature as multiphase flows, which contain both continuous phase and dispersed phase.

Chapter One presents an overview of multiphase flows given with the major stress being placed on the dispersed flow. The state of the art in isothermal and non-isothermal flows is provided. The basic definition and parameters which quantify particle parameters are introduced. Next, the key interactions between the fluid and particles are described and the equations for mass momentum and energy transfer between phases is provided. Equations for particle motion and particle energy – the paper's key equations – are derived for small and heavy particles, and the limitations and possible assumptions are discussed. Finally, sets of fundamental equations for heated particle-laden channel flow are developed. The model equations are presented as differential equations in non-dimensional form. Model equations for continuous phase and for dispersed phase together with the numerical procedures described here are used to perform computer simulations for the non-isothermal turbulent flow laden with a large number of inertial particles. Key results for flow field and thermal field are presented. Verification against the data available in the literature is done to show the adequacy of the models and numerical procedures used in this work. The most important results for research currently being conducted for particle dispersed in turbulence are shown in the final chapter.

The work presented provides considerable information and results that cover a wide spectrum of particle dispersed flows and is an important source of information. The Direct Numerical Simulations data presented here contain large amounts of important information and can be used as benchmark results for flow field and thermal field (testing turbulence models, LES) as well as for the analysis of the particles. Results also shed light on the physics

of turbulence-particle interaction, which is one of the most complex and important issues in a large number of other phenomena.

Fully-developed particle-laden non-isothermal turbulent channel flow is investigated using Direct Numerical Simulation (DNS) combined with the Lagrangian particle tracking technique, which is used to track a large number of individual particles, using the point-particle approach.

In the configuration presented here, small solid dense particles carried by the fluid forces are influenced by the turbulent flow. The simulations are performed without gravity at shear Reynolds number $Re_\tau = 150, 395$ and for a molecular Prandtl number equal to one. The effect of the particle diameter and density as well as the Reynolds number on the statistical quantities is considered. The key issue is to examine, on the basis of statistics, particle dispersion with reference to the particle hydrodynamic and thermal relaxation times as well as the fluid Reynolds number. The focus is on the particle-turbulence interactions and their effect on the temperature of the particles and its correlation with the surrounding fluid.

Since the primary goal is to induce turbulence-particle interaction, the properties of dilute suspensions – the volume fraction of the dispersed phase – are considered to be small enough to assume that particles have no influence on the flow field and inter-particle collisions can be neglected. With this assumption, the computation became one-way coupling for the momentum transfer and the thermal energy transfer. The fluid and particles' balance equations are solved considering the influence of the turbulence on the particle velocity and temperature – but not the opposite. Further, temperature has no effect on either the fluid or particle velocity.

Flow domain is represented by a channel bounded by two infinite flat parallel walls and within which the flow is driven by an imposed pressure gradient. For each of the two different shear Reynolds number values considered, the more than one million particles required to obtain sufficiently accurate statistical information everywhere in the channel were introduced into the flow. Particle sets are characterized by very different thermal and momentum inertia, which are well described by the Stokes numbers St and thermal Stokes number St_T , ranges from 0.1 up to 250.

The results for the continuous fluid phase – mean fluid velocity, mean temperature and correlations obtained for different grid resolution and for different domain sizes are compared with the data available in the literature. Two-point velocity and temperature correlation and energy spectra were used as the main criteria to obtain periodically unconstrained flow structures. Two point correlation also allows the size and distance of velocity and thermal streaks in the turbulence flow to be determined. All results for the flow and thermal field show good agreement with the Direct Numerical Simulation results provided by the top research groups.

The qualitative analysis of the turbulence and particle structures shows streaky patterns for the hydrodynamics and indicates how these patterns are associated with the patterns for the temperature. These large-scale turbulence structures significantly influence particle behavior. Particles tend to be highly concentrated in the region close to the wall and in low speed streaks. As the Reynolds number is increased, concentrations of particles in the region close to the wall do not increase.

Detailed results for thermal particles are shown here for the first time. A particle temperature distribution and its fluctuation as well as turbulent heat flux are all presented for small and large response particles in both the hydrodynamic and thermal sense. It has been

found that low momentum inertia particles have a mean temperature similar to the fluid temperature; this effect is almost independent of particle thermal inertia. For particles with larger momentum, the inertia thermal effect is more complex, but, generally speaking, particle temperature in the near-wall and buffer region is significantly lower than the fluid temperature. The difference between the fluid mean temperature and particle mean temperature increases along with the momentum response time. In most of the other channel regions, even if the particle responds thermally very quickly to the fluid temperature changes, the inertial particles will never become, on average, the same as the fluid temperature. The particles that have neglected small thermal response time but not inertia are not generally able to have the same mean temperature as the fluid. This is a very important conclusion, one which may have serious consequences on the chemical reactions, technological processes and accuracy of measurement techniques based on seeding particle (PIV, LIF). Note also that many if not most of the inertial particles are located in the near-wall region, a fact which will affect the overall mean particle temperature.

This enormous difference in temperatures (as well as velocity and the consequences of other quantities) is a result of the particle's unique sampling of the fluid. It also influences the particle temperature fluctuation, which became significantly different from the temperature fluctuation for the fluid. To be more precise, this effect is caused by the particle position being not fully representative of the fluid (not fully random) and not by the delay in information sampling on the particle path, where particle temperature may be even identical to the fluid.

MAREK JASZCZUR

Modelowanie numeryczne oddziaływania plyn-cząstka w turbulentnym nieizotermicznym przepływie z fazą dyspersyjną

Streszczenie

Wielofazowe przepływy turbulenty, w których poza fazą ciągłą występuje również faza stała w formie małych cząstek, skupiają ostatnio znaczną uwagę ośrodków naukowych, ponieważ przepływy te występują powszechnie zarówno w procesach technologicznych, jak i w przyrodzie. Wobec złożoności zjawisk zachodzących w takich przepływach do niedawna większość badań nad przepływami wielofazowymi dotyczyła przepływów izotermicznych.

Jak pokazują prowadzone badania eksperymentalne, jak również symulacje komputerowe z wykorzystaniem techniki *Direct Numerical Simulation* (DNS) dotyczące przepływów izotermicznych, przepływ turbulentny oddziałuje na cząstki w sposób złożony. W wyniku działania różnorodnych sił położenie cząstek w przepływie, a także rozkład prędkości tworzą pola niejednorodne i dalece odbiegające od rozkładu normalnego. Taka nierównomierność rozmieszczenia cząstek w przepływie może mieć znaczący wpływ na przebieg oraz efektywność procesów.

W przedstawionej pracy analizowany jest dwufazowy w pełni rozwinięty hydrodynamicznie i termicznie przepływ turbulentny. Analizowane przypadki są reprezentatywne dla dużej kategorii przepływów sklasyfikowanych w literaturze jako przepływy dwufazowe z fazą dyspersyjną.

W pierwszym rozdziale pracy dokonano klasyfikacji przepływów wielofazowych z fazą dyspersyjną. Przegląd stanu literatury zagadnienia pozwala stwierdzić, że brak jest prac analizujących oddziaływanie nieizotermicznego przepływu turbulentnego na temperaturę i ruch cząstek. W rozdziale tym podano również podstawowe definicje i parametry stosowane w opisie przepływów dyspersyjnych oraz opisano podstawowe oddziaływania występujące pomiędzy fazą ciągłą i dyskretną zarówno pod względem hydrodynamicznym, jak i termicznym. Analiza wyprowadzonych w rozdziale 2 równań ruchu i energii cząstek pozwoliła na określenie składników dominujących w opisie zachowania cząstek stałych, których, rozmiary są niewielkie, a wartości gęstości w stosunku do gęstości płynu znaczące. W rozdziale 3 zestawiono układ równań różniczkowych stanowiących opis matematyczny turbulentnego przepływu nieizotermicznego fazy ciągłej, który wraz z równaniami fazy dyspersyjnej stanowi model matematyczny przepływu dwufazowego. Równania różniczkowe zapisano w formie bezwymiarowej dla periodycznego kanału z termicznym warunkiem brzegowym drugiego rodzaju. Model matematyczny wraz z procedurami numerycznymi opisanymi w rozdziale 4 posłużył do opracowania algorytmu numerycznego wykorzystanego do symulacji oddziaływań turbulencja-cząstki. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki obliczeń fazy ciągłej, które porównano z dostępnymi w literaturze wynikami dla turbulentnego przepływu jednofazo-

wego. Rozdział 6 przedstawia wyniki obliczeń nieizotermicznego przepływu turbulentnego z fazą dyspersyjną, ich analizę, jak również interpretację fizyczną zachodzących zjawisk.

Prezentowane w pracy rozkłady prędkości i temperatury płynu, ich fluktuacje oraz korelacje zarówno dla fazy ciągłej, jak i dyspersyjnej – mogą być wykorzystane jako wyniki typu *benchmark* służące do testowania modeli turbulencji w szczególności weryfikacji wyników uzyskanych metodą *Large Eddy Simulation* (LES). Obliczenia układów dwufazowych wykonano z zastosowaniem metody *Direct Numerical Simulation*, którą połączono z metodą Lagrange’a śledzenia cząstek stałych. Pozwoliło to na szczegółową analizę zagadnienia. W obliczeniach wymiana pędu i energii pomiędzy płynem a cząstkami traktowanymi jako punktowe była określana na podstawie rozkładów prędkości i temperatury cząstek oraz otaczającego płynu. Taki sposób postępowania jest zasadny, jeśli rozmiary cząstek są znacząco mniejsze niż najmniejsze skale przepływu oraz liczba Biot’a jest mała – te przypadki analizowano w niniejszej pracy. Model punktowy wraz z metodą śledzenia cząstki Eulera–Lagrange’a zastosowany w prezentowanej analizie jest od wielu lat wykorzystywany do badania wzajemnych oddziaływań płyn–cząstka oraz cząstka–płyn w przepływach izotermicznych. Ponieważ głównym celem była analiza oddziaływania przepływu turbulentnego na cząstki, udział objętościowy cząstek był na tyle mały, aby można było przyjąć, że cząstki nie wpływają w sposób znaczący na ruch płynu i jego temperaturę oraz że oddziaływania pomiędzy cząstkami mogą być pominięte. Powyższe założenia stanowią podstawę do rozpatrywania analizowanego w niniejszej pracy przepływu dwufazowego jako sprzężonego jednokierunkowo (*one-way coupling*), i to zarówno pod względem hydrodynamicznym, jak i termicznym.

Obliczenia DNS przeprowadzono w kanale, w którym małe cząstki o dużej gęstości są poddane działaniom sił wynikającym z oddziaływania turbulencja–cząstka. Obliczenia wykonywano, pomijając wpływ siły grawitacji dla liczb Reynoldsa $Re_\tau = 150, 395$ oraz liczby Prandla $Pr = 1,0$. Analizowano, jaki wpływ na wielkości statystyczne opisujące ruch cząstki ma ich średnica i gęstość oraz wartość liczby Reynoldsa. Podstawowym zadaniem było zbadanie wpływu czasu relaksacji hydrodynamicznej oraz termicznej, które w pracy reprezentowane są przez liczby kryterialne Stokesa St oraz St_τ , na zachowanie się cząstek. Rozpatrywanie liczby Stokesa w zakresie od 0,1 do 250 pozwoliło na analizę zachowania cząstek zarówno o małej bezwładności, jak i tych charakteryzujących się dużą bezwładnością na zmiany pędu i temperatury. W celu uzyskania statystycznie dokładnych korelacji i wielkości średnich dla cząstek niezbędne było analizowanie dużej ich liczby. Miało to szczególne znaczenie wobec faktu, że w wielu analizowanych przypadkach występował silnie niejednorodny rozkład koncentracji cząstek w przestrzeni.

Wyniki obliczeń fazy ciągłej – średnia prędkość płynu, średnia temperatura i korelacje uzyskane dla różnych rozdzielczości siatek obliczeniowych, oraz różnych wielkości obszaru obliczeniowego – porównano z wynikami obliczeń dostępnymi w literaturze. Przedstawione korelacje dwupunktowe prędkości i temperatury oraz rozkłady energii stanowiły podstawę do ustalenia ograniczeń numerycznych zapewniających zbieżność rozwiązania.

Przeprowadzona jakościowa analiza przepływu turbulentnego pozwoliła na określenie rozmiarów powstałych wieloskalowych struktur i ich wizualizację, a także na ich skorelowanie z rozkładem temperatury oraz rozkładem cząstek w przestrzeni. Wykazano, że największe struktury wieloskalowe zaobserwowane w przepływie mają podstawowe znaczenie w rozkładzie przestrzennym cząstek. Cząstki pozostają silnie skoncentrowane w rejonach

przyściennych oraz preferują charakterystyczne dla nich rozmieszczenie w strukturach przepływu turbulentnego.

Wyniki analiz cząstek posiadających poza bezwładnością masową dodatkowo bezwładność termiczną są przedstawione po raz pierwszy. O ile w przypadku cząstek o małej bezwładności masowej niezależnie od bezwładności termicznej obserwowano podobne wartości średniej temperatury płynu i cząstek, o tyle w przypadku cząstek o znacznej bezwładności masowej zjawisko staje się bardzo złożone, a efekt końcowy zaskakujący. Jak wykazały wyniki obliczeń dotyczących cząstek, których inercja związana z masą nie była pomijalnie mała niezależnie od bezwładności termicznej, średnie wartości temperatury cząstek i płynu znacznie się od siebie różniły, i to zarówno w obszarze przyściennym, jak i w innych częściach kanału. Cząstki, których czas odpowiedzi termicznej był pomijalnie mały, a czas odpowiedzi hydrodynamicznej znaczący, charakteryzowały się statystycznie innym rozkładem temperatury niż przepływ, w którym się znajdowały.

Przedstawione w pracy różnice pomiędzy średnimi wartościami temperatury cząstek i płynu (podobne efekty zaobserwowano również w odniesieniu do prędkości i innych wielkości) są między innymi wynikiem niejednorodnego „próbkowania” płynu przez cząstki. Oddziaływanie przepływu turbulentnego-cząstki sprawiają, że cząstki rozmieszczone są w przepływie w charakterystyczny dla siebie sposób, który nie jest statystycznie poprawny i może nie być w żaden sposób reprezentatywny dla płynu (nie jest „losowy”).

Zaobserwowane zjawisko może istotnie wpływać na przebieg reakcji chemicznych oraz dokładność metod pomiarowych opartych na cząstkach znacznikowych (PIV, LIF). Warto również zaznaczyć, że większość cząstek posiadających znaczną bezwładność masową nie jest rozproszona w przepływie turbulentnym, lecz jest silnie skoncentrowana w obszarach przyściennych, co dodatkowo może wpływać na wyznaczane statystyki, w tym wartości średnie.