IMMERSED BOUNDARY BASED SIMULATIONS OF FLUID-PARTICLE INTERACTIONS: EFFECTS OF THE PARTICLE SHAPE AND COLLISIONS

GOVIND SHARMA

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

MARCH 2024

© **Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024**

IMMERSED BOUNDARY BASED SIMULATIONS OF FLUID-PARTICLE INTERACTIONS: EFFECTS OF THE PARTICLE SHAPE AND COLLISIONS

by

GOVIND SHARMA

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2024

I dedicate this work to my parents...

C E R T I F I C A T E

This is to certify that the thesis entitled **" Immersed Boundary Based Simulations of Fluid-Particle Interactions: effects of the particle shape and collisions"** being submitted by Mr. Govind Sharma to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of Doctor of Philosophy is a bonafide record of original research work carried out by him under my supervision in conformity with rules and regulations of the institute. The results presented in this thesis have not been submitted, in part or in full, to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Dr. Bahni Ray
Associate Professor
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology, Delhi

March, 2024

Acknowledgements

I would like to express my sincere gratitude to my supervisor, Dr. Bahni Ray, for her active interest in my work, participation in all stages of problem solving and overall guidance.

I also wish to thank my research committee members, Dr. P.M.V Subbarao, Dr. Debabrata Dasgupta and Dr. Vikram Singh for their valuable time and suggestions.

I appreciate the assistance given to me by my colleagues at the Computations Lab: Santosh Kushwaha, Rahul Sharma, and Gaurav Nath for always being helpful and reliable.

A heartful thanks to Abhishek Srivastav, Vishal Goyal, and Rohit Kumar for keeping me company during my stay here, along with the rest of my lab colleague.

I am forever indebted to my family members for their unwavering support.

Govind Sharma

ABSTRACT

Direct numerical simulations are carried out to analyze the fluid-particle interactions. This thesis relies on the customization of opensource C++ library —Immersed Boundary Method Adaptive Mesh Refinement (IBAMR)—to model the fluid-particle interactions. Numerical study considers the effect of geometric configuration of particles and particle collision on overall fluid-particle interaction process. The IBAMR is a dedicated Immersed Boundary based software to deal with fluid-structure interactions, and the feature *ConstraintIB* deals with the prescribed kinematic of rigid-body motion based on distributed-Lagrangian-multiplier (DLM) formalism. Utilizing this feature, settling behavior of different-shaped particles are discussed. The settling characteristics are analyzed in terms of Fast-Fourier-transform and phase-space plots.

To realize the effects of particle collision on fluid-particle interaction, a collision strategy is implemented in IBAMR framework. The proposed collision strategy is based on soft-sphere discrete element model; and particles' material properties determine the stiffness parameters. Adopted collision strategy is first validated against the benchmark case of drafting-kissing-tumbling for particle-particle collision. The simulations of varying particle-to-fluid density ratio are conducted using the presented collision model, and results are discussed. To show the efficacy of propossed collision strategy to model the particle-wall interaction, bouncing of a spherical-particle on the rigid wall is studied from viscous to inertial flow-regime. Near wall fluid-particle interactions show the effects of viscous-dissipation on particle rebounding, and particle comes to rest in subsequent rebounds after loosing kinetic energy.

The final part of thesis focuses on the interaction between a single-particle and the cluster to mimic the situation of dense and dilute clusters. A statistical observation is presented for cluster sedimentation and its interaction with the single-particle at different Reynolds numbers. The interaction of a single-particle with the cluster reduces the formation of smaller sub-clusters, as the sedimentation is accompanied by horizontal displacement. Vorticity field of cluster evolution shows how a single-particle affects the sedimentation process. This interaction and sedimentation behavior are further analyzed in the context of polydispersity and varying cluster-size.

अमूर्त

द्रव-कण अंतःक्रियाओं का विश्लेषण करने के लिए प्रत्यक्ष संख्यात्मक सिमुलेशन किए जाते हैं। यह थीसिस द्रव-कण इंटरैक्शन को मॉडल करने के लिए ओपनसोर्स सी ++ लाइब्रेरी - इमर्सड बाउंड्री मेथड एडेप्टिव मेश रिफाइनमेंट (आईबीएएमआर) के अनुकूलन पर निर्भर करती है। संख्यात्मक अध्ययन समग्र द्रव-कण संपर्क प्रक्रिया पर कणों के ज्यामितीय विन्यास और कण टकराव के प्रभाव पर विचार करता है। आईबीएएमआर द्रव-संरचना अंतःक्रियाओं से निपटने के लिए एक समर्पित विसर्जित सीमा आधारित सॉफ्टवेयर है, और कॉन्स्ट्रेन्टिआईबी सुविधा वितरित-लैग्रेंजियन-मल्टीप्लायर (डीएलएम) औपचारिकता के आधार पर कठोर-शरीर गति की निर्धारित गतिज से संबंधित है। इस सुविधा का उपयोग करते हुए, विभिन्न आकार के कणों के निपटान व्यवहार पर चर्चा की जाती है। निपटान विशेषताओं का विश्लेषण फास्ट-फूरियर-परिवर्तन और चरण-स्थान भूखंडों के संदर्भ में किया जाता है।

द्रव-कण संपर्क पर कण टकराव के प्रभावों का एहसास करने के लिए, आईबीएएमआर ढांचे में एक टकराव रणनीति लागू की गई है। प्रस्तावित टकराव की रणनीति नरम-क्षेत्र असतत तत्व मॉडल पर आधारित है; और कणों के भौतिक गुण कठोरता मापदंडों को निर्धारित करते हैं। अपनाई गई टकराव की रणनीति को सबसे पहले कण-कण टकराव के लिए ड्राफ्टिंग-किसिंग-टंबलिंग के बेंचमार्क मामले के खिलाफ मान्य किया गया है। प्रस्तुत टकराव मॉडल का उपयोग करके अलग-अलग कण-से-द्रव घनत्व अनुपात का सिमुलेशन आयोजित किया जाता है, और परिणामों पर चर्चा की जाती है। कण-दीवार अंतःक्रिया को मॉडल करने के लिए प्रस्तावित टकराव रणनीति की प्रभावकारिता दिखाने के लिए, कठोर दीवार पर एक गोलाकार कण के चिपचिपे से जड़त्वीय प्रवाह-शासन तक उछलने का अध्ययन किया जाता है। दीवार के पास द्रव-कण अंतःक्रिया कण रिबाउंडिंग पर चिपचिपापन-अपव्यय के प्रभाव को दर्शाती है, और कण गतिज ऊर्जा खोने के बाद बाद के रिबाउंड में आराम करने के लिए आता है।

थीसिस का अंतिम भाग घने और पतले समूहों की स्थिति की नकल करने के लिए एकल-कण और क्लस्टर के बीच बातचीत पर केंद्रित है। क्लस्टर अवसादन और विभिन्न रेनॉल्ड्स संख्याओं पर एकल-कण के साथ इसकी बातचीत के लिए एक सांख्यिकीय अवलोकन प्रस्तुत किया गया है। के साथ एकल-कण की अंतःक्रिया क्लस्टर छोटे उप-समूहों के गठन को कम करता है, क्योंकि अवसादन क्षैतिज विस्थापन के साथ होता है। क्लस्टर विकास का वर्टिसिटी क्षेत्र दिखाता है कि एक एकल कण अवसादन प्रक्रिया को कैसे प्रभावित करता है। इस अंतःक्रिया और अवसादन व्यवहार का आगे बहुविक्षेपण और भिन्नता के संदर्भ में विश्लेषण किया गया है समूह का आकार।

Contents

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

ν	Kinematic viscosity
μ	Dynamic viscosity
ρ_{r}	Particle-to-fluid density ratio
$\boldsymbol{u}$	Eulerian velocity field
$\boldsymbol{f}$	Eulerian constraint force
$\boldsymbol{g}$	Gravitational acceleration
p	Pressure
$\boldsymbol{F}$	Lagrangian constraint force
$\boldsymbol{X}$	Lagrangian coordinate position
$\boldsymbol{x}$	Eulerian coordinate position
ϕ	Angle
D	Diameter
W	Domain width
$\mathrm{A}_{\mathrm{FFT}}$	Fast Fourier transform amplitude
f_{FFT}	Fast Fourier transform frequency
$\boldsymbol{U}$	Particle velocity field
Re	Reynolds number
Re_{P}	Particle Reynolds number
H	Domain Height
V_{c}	Convective velocity
C_{d}	Drag coefficient
ρ_{f}	Fluid density
ρ_{p}	Particle density

Abbreviations

IB	Immersed boundary
LES	Large eddy simulations
IBM	Immersed boundary method
DLM	Distributed Lagrangian multiplier
ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
DNS	Direct numerical simulation
AMR	Adaptive mesh refinement
IBAMR	Immersed boundary adaptive mesh refinement
FEM	Finite element method
DKT	Drafting-kissing-tumbling
DEM	Discrete element method
FBM	Fictitious boundary method
FFT	Fast Fourier transform
IBAMR	mmersed Boundary Method Adaptive Mesh Refinement

r	Position vector
ω	Angular velocity
δ	Delta function
d	Distance function
t	Time
D_{k}	Distance matrix
$\boldsymbol{U}_l$	Lagrangian velocity field
Re_{t}	Reynolds number based on terminal velocity
Re_{c}	Reynolds number based on convective velocity