HYDRODYNAMIC INVESTIGATIONS IN FORCED CONVECTIVE BOILING FLOWS

ASHUTOSH YADAV

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2018

HYDRODYNAMIC INVESTIGATIONS IN FORCED CONVECTIVE BOILING FLOWS

by

ASHUTOSH YADAV

Department of Chemical Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

MAY 2018

THESIS CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **‘Hydrodynamic investigations in forced convective boiling flows’** submitted by **Mr. Ashutosh Yadav** to the Indian Institute of Technology-Delhi for the award of degree of **Doctor of Philosophy** is a bona fide record of research work carried out by him under my supervision. The contents of this thesis have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Date:

IIT Delhi

Professor Shantanu Roy

Department of Chemical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi 110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my deep sense of gratitude to my advisor Prof. Shantanu Roy for his guidance, extensive support and effective criticism throughout my research. I have learned to gain perception and manage research problems systematically from him and gained invaluable experience working under his supervision. It was a pleasure to work with him, and he taught me a lot, much more than what is written in this thesis.

I would like to thank my SRC members: Prof. V. V. Buwa, Prof. Anjan Ray, and Dr. Jyoti Phirani, for their encouragement and useful comments. I take this opportunity to thank Dr. Manojkumar Ramteke for his valuable suggestions on implementation of the Genetic Algorithm, Prof. J. B. Joshi for his valuable discussion on Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) and Dr. H. J. Pant for his assistance and guidance in tracer particle making and residence time distribution studies. I would also thank Dr. Markus Schubert, Dr. Dinesh V. Kalaga and Salar Azizi for critical discussions on bubble columns.

I acknowledge our industrial partner Bhabha Atomic Research Centre (BARC) and Ministry of Human Resource Development (MHRD) for their financial support during my research period.

My time in IIT Delhi would not have been same without the inspiring exchanges and laughs provided by my friends and colleagues, including Tahmeed, Loveleen, Deepali, Meenakshi, Ravinder, Indranil, and Aakarsha. Special thanks to Puneet and Sangram for our regular fruitful discussions and all the fun memories. I am extremely grateful to Mr. Brahm Prakash for his assistance in setting up the experimental setups. Also, I would like to thank Naresh and Girish for their excellent assistance in the lab. I want to acknowledge my friends Pankaj, Rohit, Rachit, Avinash, and specially Dharmansh for weekend parties.

Above all, I express my very profound gratitude to my parents and sister for their support, courage, and love throughout my years of study. Thank you for your blessings and providing me a solid foundation to build my life on.

Ashutosh Yadav

ABSTRACT

The design, performance and safety analysis of nuclear reactors, in particular, Boiling Water Reactors (BWRs), require accurate and extensive information about the vapor-liquid water flow dynamics. Computational fluid dynamics (CFD) has evolved over the last several decades as an important tool for improving the safety and performance of the nuclear reactors. However, CFD results must be validated and verified by reliable experimental data (at multiple scales) to guarantee, with adequate confidence, the reliability and worth of the model predictions. Most of the experimental data available in the literature suffer from the limitations posed by conventional invasive techniques, which interfere with the flow itself. Their limitations are magnified in the context of flow boiling wherein bubble nucleation and vapor evolution is known to be a complex and multi-scale problem. Additionally, the experiments performed in the past are predominantly based on test sections which are single rod annular geometry or rectangular geometry. Also, most of the experimental data available in the past are based on systems operating at a very high pressure and high flow rates.

The present thesis focuses on investigating multiphase flow dynamics of convective boiling flows on two test sections. In this process, two non-invasive techniques i.e. γ-ray densitometry and Radioactive Particle Tracking (RPT) has been developed for performing experiments pertaining to boiling flows. The first test section is a vertical annular channel of single heater rod whereas the second experimental test section has the provision of holding different heater rods arrangements. For both experimental test sections, experiments were performed at the different inlet flow conditions, i.e., inlet flow rates and inlet liquid temperatures. In the case of the second experimental test section, experiments were also performed at various heater rods configuration. Radial and axial void fraction measurements were performed on these experimental test section using non-invasive γ-ray densitometry and Radioactive Particle Tracking (RPT), respectively. Non-invasive Radioactive Particle Tracking

(RPT) has been used for measuring liquid velocity field, mean flow patterns and "turbulent" kinetic energy. The unique aspect of this thesis lies in the fact that non-invasive radiation based techniques have been used for all experimental measurements.

Another aspect of the present thesis was to make RPT suitable for systems having large interrogation volumes and possessing internals such as in the present case. Two new reconstruction algorithms were developed in this thesis. First was the extension of classical Monte-Carlo (MC) technique known as "MC-RGA" technique, whereby the convergence and computational speed of the algorithm are enhanced using Real Coded Genetic Algorithm (RGA). This modification results in drastic reduction in computational time required for detector parameter estimation and altogether eliminates the need for the "distance-count map," which was earlier inherent to RPT experimentation. RPT application was limited to convective boiling flow experiments owing to the "shadow effect" caused by the solid heater rods. The "shadow effect" makes classical position reconstruction algorithm based on Monte Carlo (MC) technique futile. A novel tracer particle reconstruction algorithm based Support Vector Regression (SVR) and Relevance Vector Machine (RVM) has been applied in this study. The machine learning based reconstruction algorithms were very fast and accurate in terms of position reconstruction.

Apart from providing mean phase velocities and other "turbulence" quantities, RPT also provides the actual Lagrangian trajectory of the tracer particle mimicking liquid phase in the present study. Hence, it is an appropriate method for the detailed characterization of the complex liquid dynamics observed in boiling two-phase flows. The position time series of the radioactive tracer particle conveying information on the liquid motion were examined by Recurrence Plots (RP) and Recurrence Quantification Analysis (RQA). The Lagrangian trajectories were also quantified using mean displacement model. Eddy diffusivity was calculated in axial and radial direction for different experimental conditions.

सार

परमाणु रिएक्टरों के डिजाइन, प्रदर्शन और सुरक्षा विश्लेषण, विशेष रूप से, उबलते जल रिएक्टरों (बीडब्लूआर), को वाष्प-तरल जल प्रवाह गतिशीलता के बारे में सटीक और व्यापक जानकारी की आवश्यकता होती है। परमाणु रिएक्टरों की सुरक्षा और प्रदर्शन में सुधार के लिए पिछले कई दशकों में कम्प्यूटेशनल तरल गतिशीलता (सीएफडी) विकसित हुआ है। हालांकि, सीएफडी परिणामों को विश्वसनीय प्रयोगात्मक डेटा (एकाधिक पैमाने पर) द्वारा पर्याप्त आत्मविश्वास, विश्वसनीयता और मॉडल भविष्यवाणियों के मूल्य के साथ गारंटी के लिए सत्यापित और सत्यापित किया जाना चाहिए। साहित्य में उपलब्ध अधिकांश प्रयोगात्मक डेटा परंपरागत आक्रामक तकनीकों द्वारा उत्पन्न सीमाओं से ग्रस्त हैं, जो प्रवाह के साथ हस्तक्षेप करते हैं। उनकी सीमाओं को प्रवाह उबलते संदर्भ में बढ़ाया जाता है जिसमें बबल न्यूक्लियेशन और वाष्प विकास को जटिल और बहु-पैमाने की समस्या माना जाता है। इसके अतिरिक्त, अतीत में किए गए प्रयोग मुख्य रूप से परीक्षण खंडों पर आधारित होते हैं जो सिंगल रॉड क्युलर ज्यामिति या आयताकार ज्यामिति होते हैं। इसके अलावा, अतीत में उपलब्ध अधिकांश प्रयोगात्मक डेटा बहुत उच्च दबाव और उच्च प्रवाह दर पर चल रहे सिस्टम पर आधारित होते हैं।
वर्तमान थीसिस दो परीक्षण खंडों पर संवहनी उबलते प्रवाह की मल्टीफेस प्रवाह गतिशीलता की जांच पर केंद्रित है। इस प्रक्रिया में, दो गैर-आक्रामक तकनीकें यानी γ-ray densitometry और रेडियोधर्मी कण ट्रैकिंग (आरपीटी) उबलते प्रवाह से संबंधित प्रयोग करने के लिए विकसित की गई है। पहला परीक्षण खंड एकल हीटर रॉड का एक लंबवत कणिका चैनल है जबकि दूसरे प्रयोगात्मक परीक्षण खंड में विभिन्न हीटर रॉड व्यवस्था आयोजित करने का प्रावधान है। प्रयोगात्मक परीक्षण खंड दोनों के लिए, विभिन्न इनलेट प्रवाह स्थितियों, यानी इनलेट प्रवाह दर और इनलेट तरल तापमान पर प्रयोग किए जाते थे। दूसरे प्रयोगात्मक परीक्षण खंड के मामले में, विभिन्न हीटर रॉड विन्यास पर प्रयोग भी किए गए थे। क्रमशः गैर-आक्रामक γ-रे densitometry और रेडियोधर्मी कण ट्रैकिंग (आरपीटी) का उपयोग कर इन प्रयोगात्मक परीक्षण खंड पर रेडियल और अक्षीय शून्य अंश माप किया गया था। गैर-आक्रामक रेडियोधर्मी कण ट्रैकिंग (आरपीटी) का उपयोग तरल वेग क्षेत्र, माध्य प्रवाह पैटर्न और "अशांत" गतिशील ऊर्जा को मापने के लिए किया गया है। इस थीसिस का अनूठा पहलू इस तथ्य में निहित है कि सभी प्रयोगात्मक मापों के लिए गैर-आक्रामक विकिरण आधारित तकनीकों का उपयोग किया गया है।
वर्तमान थीसिस का एक अन्य पहलू आरपीटी को बड़े पूछताछ वाले सिस्टमों के लिए उपयुक्त बनाना था और वर्तमान मामले में आंतरिक जैसे पास रखना था। इस थीसिस में दो नए पुनर्निर्माण एल्गोरिदम विकसित किए गए थे। सबसे पहले शास्त्रीय मोंटे-कार्लो (एमसी) तकनीक का विस्तार "एमसी-आरजीए" तकनीक के रूप में जाना जाता था, जिससे एल्गोरिदम की अभिसरण और कम्प्यूटेशनल गति को वास्तविक कोडित जेनेटिक एल्गोरिदम (आरजीए) का उपयोग करके बढ़ाया जाता है। इस संशोधन के परिणामस्वरूप डिटेक्टर पैरामीटर अनुमान के लिए आवश्यक कम्प्यूटेशनल समय में भारी कमी आई है और पूरी तरह से "दूरी-गणना मानचित्र" की आवश्यकता को समाप्त कर देता है, जो पहले आरपीटी प्रयोग के लिए निहित था। आरपीटी आवेदन ठोस हीटर रॉड के कारण "छाया प्रभाव" के कारण संवहनी उबलते प्रवाह प्रयोगों तक ही सीमित था। "छाया प्रभाव" मोंटे कार्लो (एमसी) तकनीक व्यर्थ पर आधारित शास्त्रीय स्थिति पुनर्निर्माण एल्गोरिदम बनाता है। इस अध्ययन में एक उपन्यास ट्रैसर कण पुनर्निर्माण एल्गोरिदम आधारित समर्थन वेक्टर रिग्रेशन (एसवीआर) और प्रासंगिकता वेक्टर

मशीन (आरवीएम) लागू किया गया है। मशीन पुनर्निर्माण आधारित पुनर्निर्माण एल्गोरिदम स्थिति पुनर्निर्माण के मामले में बहुत तेज़ और सटीक थे।
औसत चरण वेग और अन्य "अशांति" मात्रा प्रदान करने के अलावा, आरपीटी वर्तमान अध्ययन में तरल चरण की नकल करने वाले ट्रैसर कण के वास्तविक लग्रांगियन प्रक्षेपवक्र को भी प्रदान करता है। इसलिए, उबलते दो चरण प्रवाह में देखी गई जटिल तरल गतिशीलता के विस्तृत लक्षण के लिए यह एक उचित विधि है। रेडियोधर्मी ट्रैसर कण की स्थिति समय श्रृंखला तरल गति पर जानकारी संदेश देने की पुनरावृत्ति प्लॉट्स (आरपी) और पुनरावृत्ति मात्रा विश्लेषण (आरक्यूए) द्वारा जांच की गई थी।

CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES