

Doctoral Thesis ETH No. 16206

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BUBBLY JETS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Rade Ž. Milenković

Master of Technical Sciences
Graduate Mechanical Engineer

Faculty of Mechanical Engineering,
University of Belgrade

born 24.06.1970

citizen of
Serbia and Montenegro

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. George Yadigaroglu, examiner
Prof. Dr. Konstantin Boulouchos, co-examiner
Prof. Dr. Michel Lance, co-examiner
Dr. Beat Sigg, co-examiner

2005

Abstract

The main motivation for undertaking the present study was an apparent lack of understanding of bubble trapping in eddies in free turbulent shear flows and of the interactions between the fields of bubbles and liquid velocity.

The experiments have been carried out with liquid and bubbly jet flows generated by a gas/liquid injector. Bubbly jet flows are formed by a vertical water jet containing bubbles of various well-controlled sizes and volume fraction. The jet is injected into a water volume contained in a large Plexiglas tank to minimize wall effects. Such flows, with constant inlet flow rate of liquid and gas are called here naturally-developing jets. If the jet flow is periodically excited with controllable frequency and amplitude, it is called triggered jet. The excitation is achieved by periodically modulating the jet shear layer by means of a coaxial water layer injected close to the jet exit through a separate annular nozzle. Two-camera Particle Image Velocimetry (PIV), Double Optical Sensor (DOS) and Laser-Induced Fluorescence (LIF) were the main experimental techniques used. A variety of flow conditions defined by non-dimensional parameters such as the Jet Reynolds number, the Froude number, the Trapping parameter, the Jet Richardson number, bubble size distribution, void fraction, triggering frequency and amplitude etc. can be adjusted.

The main goal of these investigations is to show the characteristics of large coherent structures in turbulent periodically-excited jets and those of naturally-developing bubbly jets. Periodical excitation of the jet with frequencies in the neighborhood those of natural instabilities is applied to systematically create large coherent structures and to demonstrate their importance. When bubbles enter vortex rings, they can be trapped if certain conditions are fulfilled. A clear indication of bubble trapping is the generation of a bubble ring that travels with the same velocity as the confining vortex. In order to study trapping phenomena, simultaneous two-phase PIV and shadowgraphy were applied for tracking the large vortices and bubble structures.

In addition, the bubbly jet experiments aim at the understanding of the influence of the void fraction on shear-layer spreading (velocity, bubble concentration and passive or active scalars), bubble dispersion, turbulent properties and entrainment. In the region of inertia-dominated flow, the effect of the bubbles on the mixing processes is much less pronounced than in the transition region. Integration of the liquid flow in the jet shows that bubbles affect entrainment in the inertial region of the jet. Turbulence produced in the injector also enhances entrainment, particularly in case of smaller Reynolds jet number.

Experiments with periodically excited jets were carried out because information on size and development of the large-eddy structures is very difficult to obtain in case of naturally-developing flows. In order to quantify the interaction between bubbles and the large vortices that are formed in the shear layer, the following phase-averaged quantities were determined by PIV: azimuthal liquid vorticity field, vertical velocity of liquid and bubbles, vertical velocity of both vortex ring and bubble ring. The azimuthal liquid-vorticity field provides information on intensity, size, shape and position of large vortices in the flow field. These data are used to calculate the Vortex Trapping parameter and the Vortex Froude number needed for checking if the condition for bubble trapping is fulfilled. Furthermore, data at different phases within the triggering periods are acquired and analyzed, in order to show how flow properties vary in the flow field.

The DOS results indicate clustering of the bubbles in coherent vortex structures, with a periodic variation of void fraction during the excitation period. Results also show a time-dependence of the bubble velocity during an excitation period. Sequential measurements at a number of different positions in the jet enable determining the coherent part of the bubble field properties.

Keywords: Bubbly jet, Excited jet, Coherent structures, Jet forcing, Particle Image Velocimetry, Optical probes, Phase averaging, Space and time filtering, Simultaneous PIV and shadowgraphy.

Kurzfassung

Wichtigste Beweggründe für die Inangriffnahme der vorliegenden experimentellen Arbeit waren das ungenügende Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Blasen und Flüssigkeitgeschwindigkeitsfeld in blasenhaltigen freien Scherströmungen im allgemeinen und des Blaseneinfangs in Wirbeln im besonderen.

Die Experimente wurden in einphasigen, flüssigen sowie zweiphasigen, blasenhaltigen axialsymmetrischen Jetströmungen durchgeführt, welche in einem Gas-Flüssigkeitsinjektor erzeugt wurden. Ein spezielles Ziel war dabei, Blasen mit möglichst uniformer Grösse zu erzeugen und den Blasengehalt gut unter Kontrolle zu halten. Der Jet wurde in einem grossen, wassergefüllten Plexiglastank durch vertikales Einschiessen durch den Tankboden gebildet. Die Grösse des Tanks war ausreichend, um den Wandeffekt zu minimieren. Bei gleichmässiger, ungestörter Einströmung entstand ein sogenannter natürlicher Jet und bei periodischer Modulation der Strömung ein angeregter Jet. Die Anregung wurde durch eine dünne Schichtströmung erzeugt, die direkt ausserhalb der Düse und koaxial dazu injiziert und dabei mit wählbarer Amplitude und Frequenz moduliert wurde. Für beide Jettypen konnten eine Reihe von Strömungsparametern variiert werden, welche die dimensionslosen Parameter Jet-Reynoldszahl, Froudezahl, Trappingparameter und Jet-Richardsonzahl sowie Grösse und Volumenanteil der Blasen und die Anregungscharakteristiken bestimmten.

Zur Analyse der Wechselwirkungen von Blasen und Flüssigkeitsströmung war es nötig, die Eigenschaften von Geschwindigkeits- und Blasenfeldern in natürlichen Jets und insbesondere jene der kohärenten Strukturen, welche bei angeregten Jets entstehen, möglichst genau zu untersuchen. Gut ausgebildete kohärente Strukturen bilden sich, wenn die Anregungsfrequenz in der Nähe einer natürlichen Instabilität liegt. Wenn auf diese Weise genügend grosse und stabile Wirbel erzeugt wurden, liess sich beobachten, dass Blasen in diesen Wirbeln gefangen wurden. Ein klares Anzeichen für den Blaseneinfang ist die Bildung von Blasenringen um den Jet, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die grossen Wirbelringe fortbewegen. Solche Einfangphänomene konnten mittels simultaner Zweiphasen-PIV und Schattenphotographie sichtbar gemacht werden. Neben der Visualisierung von Wirbel- und Blasenfeldstrukturen zielten die Versuche auch darauf ab, den Einfluss des Blasenanteils und anderer Jeteinlassbedingungen auf die Ausbreitung des Jets (Verteilung von Geschwindigkeit, Blasenkonzentration und passive Skalare) zu bestimmen. Im Gebiet der trägheitsdominierten Strömung war der Effekt der Blasen auf Mischprozesse weniger ausgeprägt als in der Übergangsregion zur auftriebsdominierten Strömung. Zunehmende Blasenkonzentration hatte eine Vergrösserung des Flüssigkeitsentrainments, das durch Integration der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung bestimmt wurde, zur Folge. Auch die vom Injektor produzierte Turbulenz beeinflusste die Jetausbreitung, besonders für kleine Reynoldszahlen.

Experimente mit periodisch angeregten Jets und synchronisierter Datenerfassung wurden insbesondere deswegen durchgeführt, weil sie im Gegensatz zu natürlichen Jets erlauben, quantitativ genaue, reproduzierbare Information über die Entwicklung grosser Wirbelstrukturen zu erhalten. Ausserdem lässt sich dabei die Methode der Phasenmittelung einsetzen, mit deren Hilfe sich der kohärente Anteil der Geschwindigkeitsfeldschwankungen leicht ermitteln lässt. Die Methode wurde in Zusammenhang mit PIV (Bestimmung der zweidimensionalen Verteilungen von Vortizität und Geschwindigkeit von Flüssigkeit und Blasen), Photographie (Visualisierung von Blasenfeldern und Ringen) sowie mit der DOS (Lokaler Blasenanteil und Blasen- geschwindigkeit) eingesetzt. Die Messungen erlauben, die Wechselwirkung zwischen Blasen und Flüssigkeit zu quantifizieren, da die Messung der Vortizitätsverteilung in einer Schnittebene durch die Jetsymmetrieachse gestattet, Intensität, Grösse und Lage der Wirbel zu ermitteln, womit dann der Trappingparameter und die Wirbel-Froudezahl, welche das Einfangen von Blasen charakterisieren, berechnet werden können. Synchronisation der Datenerfassung mit der Jetanregung sowie Phasenmittelung ermöglichten relativ detaillierte Daten über die periodischen, kohärenten Teile der Geschwindigkeits- und Blasenfelder zu bestimmen, um so die Entwicklung der Felder aufzuzeigen. Mit der DOS Technik liess sich so punktuell die periodische Variation von Blasendichte und Geschwindigkeit bestimmen, so dass durch Ausmessen der Blasencharakteristiken an verschiedenen Punkten ein Schnittbild des kohärenten Teils der Blasenfeldeigenschaften resultiert.

Schlüsselwörter: Blasenhaltiger Jet (Freistrah), angeregter Jet, kohärente Strukturen, Particle Image Velocimetry (PIV), Doppelte Optische Sonde (DOS), Phasenmittelung, Simultane PIV und Schattenphotographie.