

И. А. Евдокименко^{1}, П. Д. Лобанов¹, А. В. Чинак¹, Н. А. Прибатурин¹, А. И. Светоносов¹,
Л. С. Тимкин¹, Р. С. Горелик¹*

Подходы для исследования структуры двухфазного пузырькового потока в канале со ступенчатым расширением

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
*e-mail: evdokimenko96@ngs.ru

Аннотация. Использование двухфазных пузырьковых потоков позволяет контролировать интенсивность процессов переноса в промышленных установках и их отдельных элементах. В данной работе было проведено экспериментальное исследование гидродинамической структуры двухфазного пузырькового потока с помощью цифровой трассерной визуализации PIV/PLIF в прямоугольном канале (200x20x1000 мм) со ступенчатым расширением. Для проведения исследования применялись две конфигурации расположения лазерного ножа и цифровой камеры относительно канала. Были получены данные о распределении скорости жидкой фазы на разном расстоянии от уступа для однофазного и двухфазного потоков. Показано, что сразу за расширением существует зона обратного течения. Выяснено, что введение пузырей в поток позволяет уменьшить длину зоны рециркуляции, тем самым, смещая точку присоединения потока ближе к расширению.

Ключевые слова: пузырьковый поток, отрывное течение, цифровая трассерная визуализация

I. A. Evdokimenko^{1}, P. D. Lobanov¹, A. V. Chinak¹, N. A. Pribaturin¹, A. I. Svetonosov¹,
L. S. Timkin¹, R. S. Gorelik¹*

Investigation Approaches for the Structure of Two-Phase Bubble Flow in a Channel with Step Expansion

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: evdokimenko96@ngs.ru

Abstract. The application of two-phase bubble flows makes it possible to control the intensity of transfer processes in industrial facilities and their elements. In this work, an experimental study of the hydrodynamic structure of two-phase bubble flow was carried out using PIV/PLIF in a rectangular channel (200x20x1000 mm) with a step expansion. Two configurations of the laser knife and digital camera arrangement relative to the channel were used for the study. The data on liquid phase velocity distribution at different distances from the ledge for single- and two-phase flows were obtained. It was shown that there is a zone of reverse flow right after the expansion. It was found that the injection of bubbles into the flow allows reducing the length of the recirculation zone, thus moving the attachment point of the flow closer to the expansion.

Keywords: bubble flow, separation flow, partial image velocimetry

Введение

Оптимизация промышленных процессов с целью повышения эффективности производства является одной из системных задач, требующей комплексного подхода. В таких секторах промышленности, как химическая технология, био-

технология и энергетика для интенсификации процессов переноса активно применяются двухфазные системы газ-жидкость. Структура таких течений зависит от многих параметров, в том числе от ориентации канала, его формы, направления течения внутри него, а также скоростей самих фаз. Одним из режимов двухфазных течений являются пузырьковые потоки, в которых дисперсная фаза (газ) принимает форму пузырей [1].

Оптические лазерные методы широко применяются для диагностики двухфазных течений, таких как газ-жидкость. Метод цифровой трассерной визуализации (PIV/PLIF) позволяет получить информацию о скорости, направлении и распределении фаз в потоке [2, 3]. Такая информация помогает подробно исследовать механизмы многих процессов, а также играет важную роль при создании математических моделей для их описания.

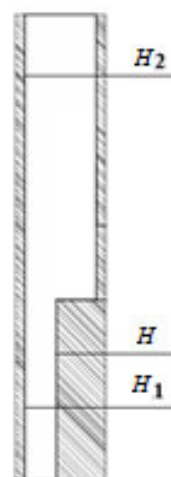
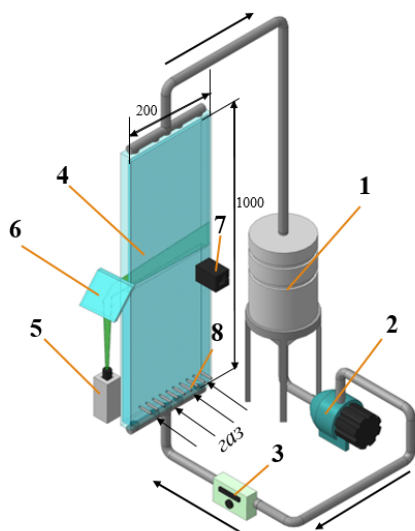
Тем не менее, несмотря на ряд очевидных преимуществ использования неинтрузивных оптических методов, также существуют ограничения их применений. В частности, для пузырьковых газожидкостных систем одной из известных сложностей является детектирование пузырей на исходном изображении с целью оптимизации работы определения вектора скорости для каждого трассера на изображении. Также важную роль играет и геометрия канала. Ввиду своей формы, для прямоугольных и квадратных каналов существует несколько вариантов расположений лазерного ножа и камеры.

Несмотря на многообразие работ по данной тематике, ряд вопросов о структуре пузырькового течения по-прежнему остается открытым, а количество работ о визуализации таких течений ограничено.

Целью данной работы является проведение экспериментального исследования гидродинамической структуры двухфазного пузырькового течения в прямоугольном канале со ступенчатым расширением при помощи современного оптического метода цифровой трассерной визуализации.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый контур (рис. 1), который включает в себя прямоугольный канал из оргстекла с размерами 200x1000x20 мм. Для создания ступенчатого расширения в канал вставляется пластина высотой 4 мм (H). Таким образом, высота канала до и после расширения (H_1 и H_2) составила 16 и 20 мм соответственно. Испытательный участок был вертикально закреплен на раме из алюминиевых профилей. Такая конструкция канала позволяет осуществить удобное крепление элементов стенда и оптической системы, с возможностью ее быстрой и точной перенастройки. Для измерения расхода испытуемой жидкости использовался ультразвуковой расходомер КАРАТ-520-32-0. Для подачи испытуемой жидкости использовался центробежный насос Grundfos CNI 4-40. Частота вращения насоса задается частотным преобразователем PumpMaster PM-P540. Расход жидкости в канал варьируется в диапазоне 0–5300 кг/ч, что соответствует числу Рейнольдса по жидкой фазе до 8000. Газовая фаза вводилась в поток через 9 капилляров, расположенных поперечно потоку на расстоянии 150 мм от входа жидкости и на 400 мм выше по течению от ступеньки.



| Обозначение | Размер, мм |
|-------------|------------|
| H | 16 |
| H_1 | 4 |
| H_2 | 20 |

Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – бак; 2 – центробежный насос; 3 – массовый расходомер; 4 – прямоугольный канал; 5 – лазер; 6 – оптическое зеркало; 7 – камера; 8 – газовые капилляры

Для построения полей скорости жидкой фазы в работе применялся PIV/PLIF метод, основанный на использовании зеленого лазера с постоянным свечением (длина волны 532 нм) полной мощностью 1 Вт и высокоскоростной камеры JET 19 (Kaya Instruments, Хайфа, Израиль) с частотой съемки 1000 к/с. В качестве флуоресцентных частиц использовались полиамидные частицы производства Dantec с размером 1–20 мкм.

Ввиду особенностей геометрии канала, использовались две различных конфигурации расположения лазерного ножа и камеры для проведения измерений (рис. 2). В первом случае (рис. 2 а) лазерный нож располагался перпендикулярно стенке канала, а цифровая камера – под углом 45°. При таком расположении оборудования газовые пузыри не перекрывают область исследования. Однако, в этом случае, требуется дополнительная калибровка линейных размеров из-за различия масштабов двух осей.

Во второй конфигурации (рис. 2 б) для проведения съемок лазерный нож устанавливался параллельно каналу на координатное перемещающее устройство, позволяя перемещать лазер по всей глубине канала. Для освещения измерительного участка размерами 105x55 мм на высоте уступа было установлено оптическое зеркало, перенаправляющее луч. Цифровая камера располагалась перпендикулярно области исследования. Таким образом, было возможно получать данные о распределении скорости жидкости по ширине канала на каждом участке его глубины.

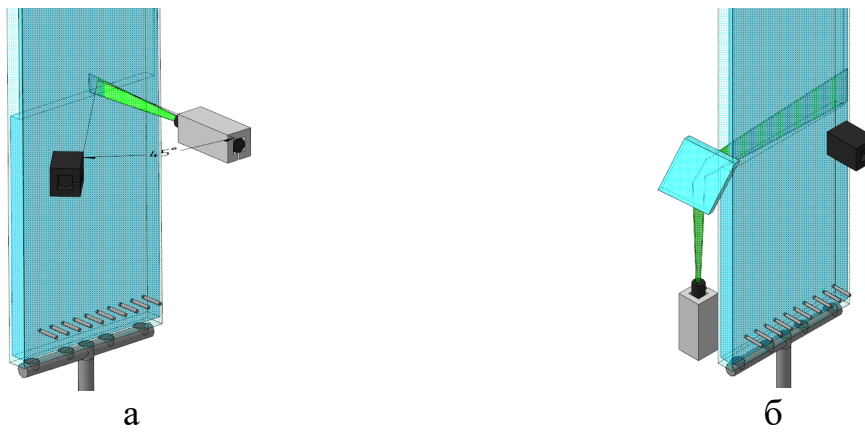


Рис. 2. Расположение PIV/PLIF оборудования для проведения измерений

Результаты

В работе были получены данные о распределении скорости жидкой фазы для однофазного и двухфазного потоков на различном расстоянии от расширения $Z/H=2,5 \dots 12,5$. (рис.3). Число Рейнольдса по жидкой фазе составляет 8000, расход рабочего газа для двухфазного потока равен 900 мл/мин.

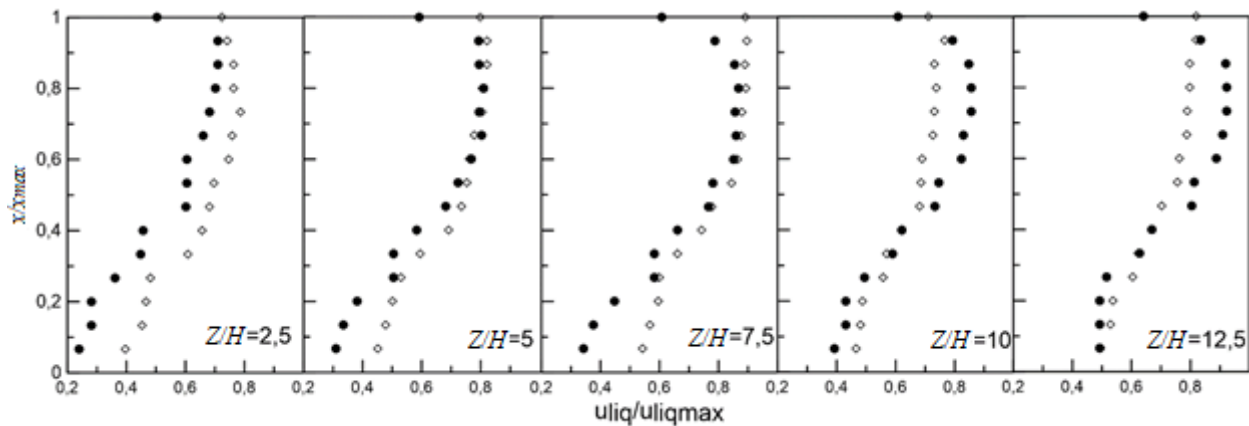


Рис. 3. Профили скорости жидкости для $Re_{liq}=8000$:
 круг – $Q_{газ} = 0$ мл/мин, ромб – $Q_{газ} = 900$ мл/мин

Обсуждение

Полученные профили скорости жидкости позволяют описать гидродинамическую структуру потока. Стоит отметить, что как для однофазного, так и для двухфазного течения сразу за уступом существует область, где скорости жидкости принимают малые значения. Это связано с изменением направления вектора скорости из-за наличия вихревых структур в зоне рециркуляции. Однако по мере удаления от уступа профиль скорости выравнивается. Это связано с ослаблением влияния вихря.

Также стоит отметить, что введение пузырей в поток позволяет уменьшить длину зоны рециркуляции по сравнению с однофазным потоком, сместив точку

присоединения потоков ближе к уступу (с $7H$ до $3H$, соответственно). Восстановления профиля скорости для однофазного потока происходит медленнее, чем для двухфазного. Вероятно, это связано со вкладом пузырей в турбулентность течения. Подобные результаты для однофазного потока для этой же степени расширения в прямоугольном канале ($e=H_2/H_1=1,25$) подтверждаются при помощи DNS моделирования [4].

Заключение

Было проведено исследование гидродинамической структуры газожидкостного пузырькового потока в прямоугольном канале со ступенчатым расширением ($e = 1,25$) при помощи современного оптического PIV/PLIF метода. Было показано, что применение PIV/PLIF метода позволяет получить достоверную информацию о распределении поля скорости жидкой фазы в потоке. Получены профили скорости жидкости для однофазного и двухфазного потоков при $Re_{liq}=8000$ и расходе газа от 0 до 900 мл/мин. Выяснено, что введение пузырей газа в поток позволяет уменьшить длину зоны рециркуляции по сравнению с однофазным потоком. Предполагается, что изменение длины зоны рециркуляции может оказывать влияние на процессы переноса в каналах с отрывными течениями, в том числе, со ступенчатыми расширениями и сужениями.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hewitt G. Flow Regime in Handbook of Multiphase Systems, edd. G. Hetstroni, Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
2. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet / Y. K. Akhmetbekov, S. V. Alekseenko, V. M. Dulin [et al.] // Exp. Fluids. – 2010. – Vol. 48. – P. 615–629.
3. Z. Liu, Y. Zheng, L. Jia, and Q. Zhang, “Study of bubble induced flow structure using PIV,” Chemical Engineering Science, 2005, vol. 60, no. 13, pp. 3537–3552.
4. T. Khamlaj, “Turbulent Flow Over A Backward Facing Step,” Oct. 05, 2018 [электронный ресурс]. – URL: <https://tariqkhamlaj.com/2018/10/04/backward-facing-step/> (дата обращения 22.04.2023).

© И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов, А. В. Чинак, Н. А. Прибатурин,
А. И. Светоносков, Л. С. Тимкин, Р. С. Горелик, 2023