

С. М. Волков¹✉, Н. А. Гуляев¹, Д. Е. Легостаев¹, К. А. Филиппский¹

Динамика газовых пузырей в кольцевом канале малого сечения

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: volkov.semyon.m@gmail.com

Аннотация. Исследование всплытия газовых пузырьков в кольцевом канале малого сечения представляет значительный интерес для моделирования двухфазных течений в активной зоне ядерных реакторов, особенно в аварийных режимах. В данной работе экспериментально изучено поведение пузырьков в кольцевом канале (внешний диаметр – 20 мм, внутренний – 11 мм), заполненном дистиллированной водой. Инжекция газа осуществлялась через капилляры разного диаметра (0,2 и 0,4 мм), расположенные в нижней части центральной трубы. Для минимизации оптических искажений использовался иммерсионный блок, а регистрация движения пузырьков проводилась методом теневой высокоскоростной съемки с применением системы зеркал, позволяющей фиксировать две проекции на одном изображении. Обработка данных выполнялась с помощью алгоритма на Python, включающего бинаризацию, сегментацию и расчет координат, скорости и эквивалентного диаметра пузырьков. Установлено, что увеличение диаметра капилляра приводит к росту отрывного и среднего диаметров пузырьков (4,1 мм против 3,3 мм), а также снижает частоту их колебаний при всплытии. Полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных моделей двухфазных потоков в сложных геометрических конфигурациях.

Ключевые слова: кольцевой канал, двухфазный поток, всплытие пузырьков, теневая визуализация, оптическая диагностика, обработка изображений

S. M. Volkov¹✉, N. A. Gulyaev¹, D. E. Legostaev¹, K. A. Filipitskiy¹

Dynamics of gas bubbles in an annular channel of small cross section

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: volkov.semyon.m@gmail.com

Abstract. The study of the ascent of gas bubbles in an annular channel of small cross-section is of considerable interest for modeling two-phase flows in the core of nuclear reactors, especially in emergency modes. In this paper, the behavior of bubbles in an annular channel (outer diameter – 20 mm, inner – 11 mm) filled with distilled water is experimentally studied. The gas was injected through capillaries of different diameters (0.2 and 0.4 mm) located in the lower part of the central pipe. To minimize optical distortion, an immersion unit was used, and the bubble movement was recorded using high-speed shadow photography using a mirror system that allows two projections to be fixed on one image. Data processing was performed using a Python algorithm that includes binarization, segmentation, and calculation of coordinates, velocity, and equivalent bubble diameter. It was found that an increase in the capillary diameter leads to an increase in the tear-off and average bubble diameters (4.1 mm versus 3.3 mm), and also reduces the frequency of their oscillations during ascent. The results obtained can be used to verify computational models of two-phase flows in complex geometric configurations.

Keywords: annular channel, two-phase flow, bubble popping, shadow visualization, optical diagnostics, image processing

Введение

Кольцевые каналы являются неотъемлемой частью различных технических устройств как в промышленности, так и в энергетической отрасли [1,2]. В частности, кольцевой канал малого сечения может выступать в качестве первого приближения моделирования обтекания пучка стержней – тепловыделяющих элементов в активной зоне реактора атомной электростанции. Исследования однофазных течений в кольцевых каналах широко представлены большим количеством работ. Течения двухфазных потоков напротив – изучены недостаточно. При этом исследование двухфазного потока в активной зоне реакторов типа ВВР особенно актуально в контексте моделирования аварийной ситуации. Особый интерес представляет изучение процесса инжекции пузырька с последующим всплытием. В данной работе проведено исследование всплытия пузырьков в кольцевом канале с внешним диаметром 20 мм и внутренним диаметром 11 мм.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляет собой непосредственно кольцевой канал, заполненный дистиллированной водой, в котором, при помощи капилляров разного диаметра, осуществляется инжекция газа (капилляр располагается внизу центральной трубки кольцевого канала) (рис. 1). Данный кольцевой канал помещен в иммерсионный блок с целью нивелирования искажения изображения вследствие преломления световых лучей на поверхности трубки. В качестве метода исследования использовалась теневая высокоскоростная съемка (использована видеокамера JET-19) с последующей компьютерной обработкой изображений. С целью восстановления трехмерной траектории движения пузырьков газа осуществлялась регистрации двух проекций пузырьков на одном изображении, при помощи оптической системы зеркал. Данный аспект позволяет провести измерения, используя лишь одну камеру вместо двух, и избавляет экспериментатора от необходимости дополнительной синхронизации изображений.

Автоматическая обработка изображений осуществлялась с помощью алгоритма на языке Python. Алгоритм обработки выглядел следующим образом. Сначала происходило чтение изображения, затем выбор порога яркости с последующей бинаризацией, после чего уже на бинарных изображениях происходила сегментация исследуемых объектов – пузырьков газа. Затем осуществлялось вычисление координат центров пузырьков, и как итог обработки – вычисление локальной скорости и эквивалентного диаметра. Выбор порога яркости при этом играет ключевую роль в определении границ пузырька. На рис. 2 приведена диаграмма яркости изображения одиночного пузырька.

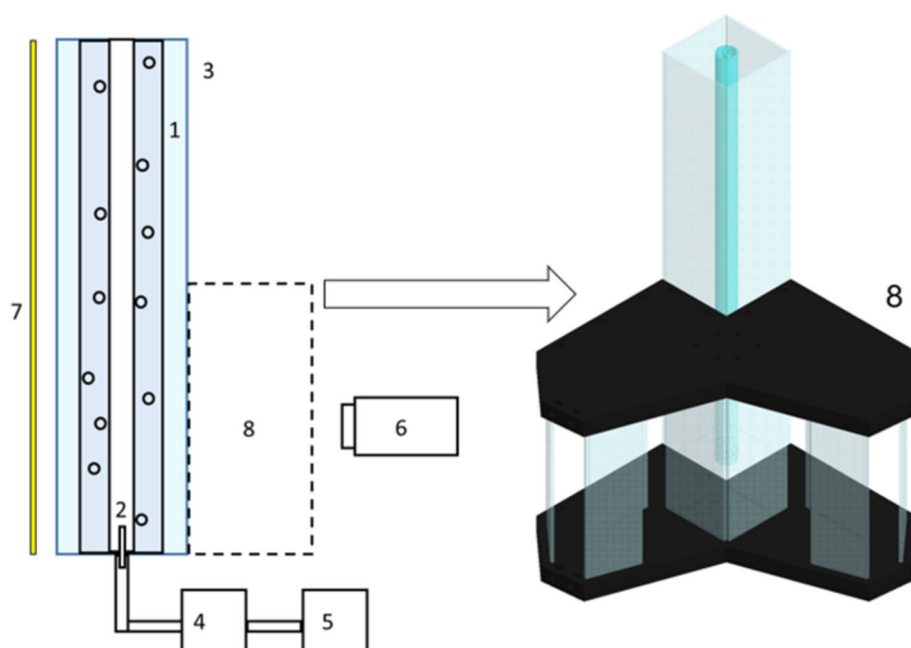


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – рабочий участок; 2 – капилляр; 3 – иммерсионный блок; 4 – расходомер; 5 – компрессор; 6 – видеокамера; 7 – LED-матрица; 8 – оптическая система зеркал

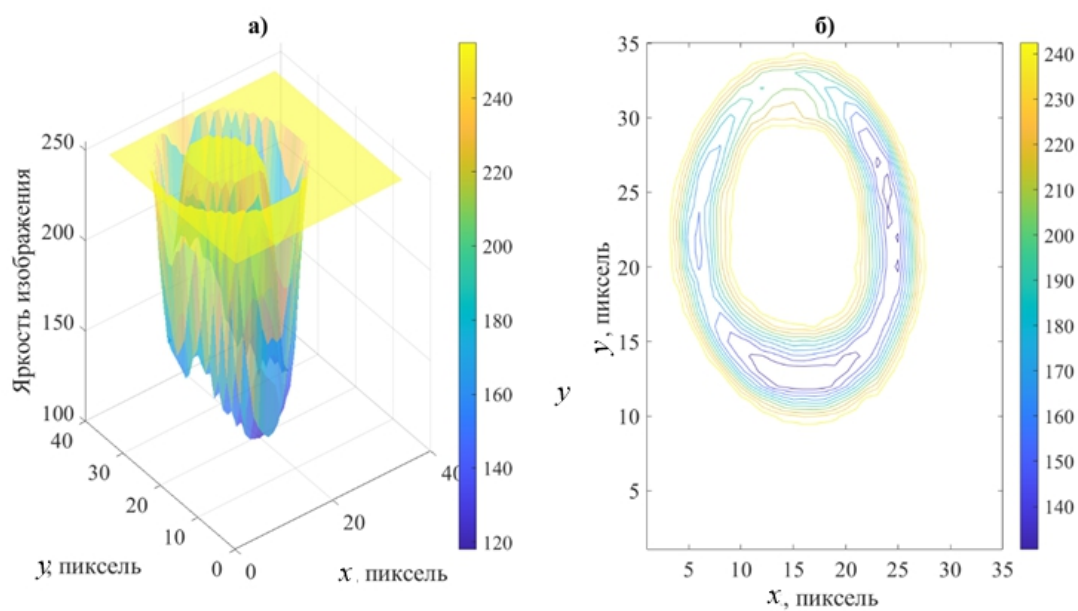


Рис. 2. Обработка изображений

Результаты

Измерения проводились при двух различных значениях относительного газосодержания $\beta_1=0,05$ и $\beta_2=0,07$ и двух значениях диаметра капилляра $d_1=0,2$ мм и $d_2=0,4$ мм. На рис. 3 представлены теневые изображения пузырьков газа при инъекции из капилляров разного диаметра.

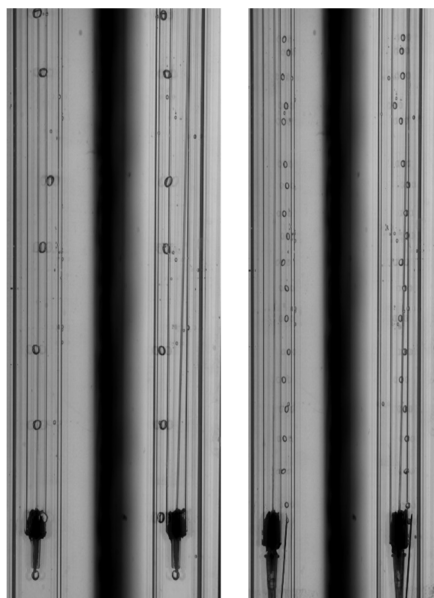


Рис. 3. Теневые изображения всплывающих пузырьков: слева – $d_2=0,4$ мм, справа – $d_1=0,2$ мм, $\beta_1=0,05$

На рис. 4 представлены траектории всплывающего одиночного пузырька при инъекции из капилляров разного диаметра.

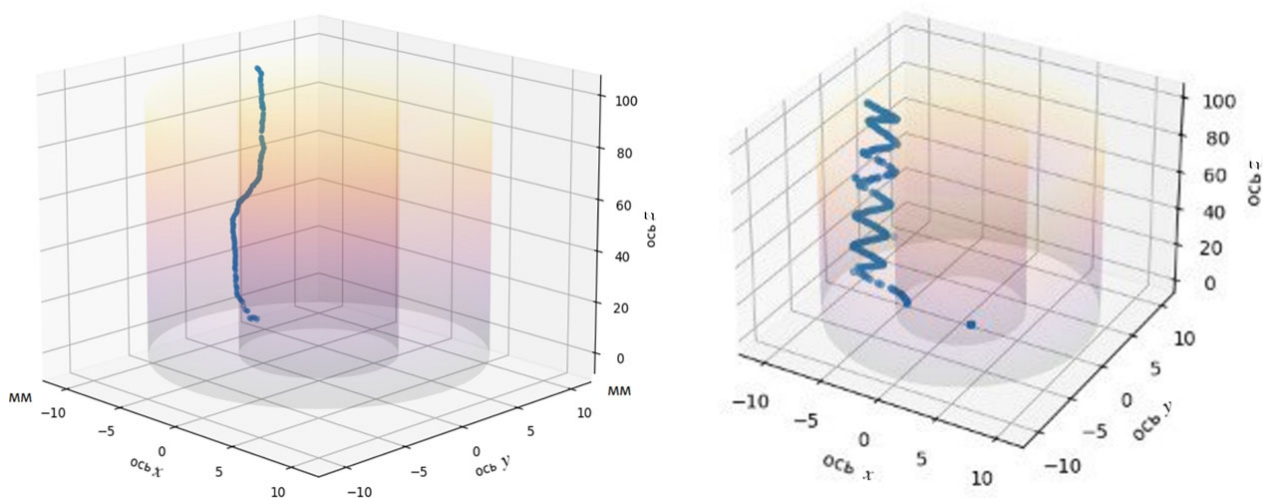


Рис. 4. Траектории всплывающего одиночного пузырька: слева – $d_2=0,4$ мм, справа – $d_1=0,2$ мм, $\beta_1=0,05$

Обсуждение

При увеличении диаметра капилляра значительным образом увеличивается как отрывной диаметр пузырька, так и средний диаметр пузырьков по выборке изображений, зафиксированных за 2 минуты. Средние диаметры для двух исследуемых случаев равны, соответственно, $D_1=4,1$ мм, $D_2=3,3$ мм. Помимо этого, при инъекции с более мелким капилляром наблюдается большая частота колебаний всплывающего пузырька по длине канала.

Заключение

Разработана оптическая система зеркал, позволяющая регистрировать две перпендикулярные проекции исследуемого объекта на одном изображении. Полученные в результате выполненной работы данные могут служить базой для верификации расчетных кодов, описывающих движение двухфазных потоков в условиях сложной геометрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / СПб.: Политехника, 2004.
2. Акатов А. А., Коряковский Ю. С. Будущее ядерной энергетики. Реакторы на быстрых нейтронах. Информационные центры по атомной энергии. Москва, 2012. – 36 с.

© С. М. Волков, Н. А. Гуляев, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025