

Н. А. Гуляев¹, А. И. Светоносов¹, И. А. Евдокименко^{1✉}, Д. Е. Легостаев¹, К. А. Филиппский¹

Экспериментальное исследование движения пузырей в вертикальном пучке стержней

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование динамики газового пузыря из цилиндра объемом 70 мл в вертикальном пучке стержней. Методом высокоскоростной видеосъемки (500 кадр/с) были изучены процессы формирования, подъема и дробления пузыря в межстержневом пространстве. Установлено, что пузырь приобретает сигарообразную форму и подвергается дроблению на участке 150 мм. Выявлены ключевые режимы взаимодействия с пучком стержней. Полученные данные важны для верификации CFD-моделей теплообменного оборудования.

Ключевые слова: газовый пузырь, пучок стержней, двухфазный поток, теневая съемка, гидродинамика

N. A. Gulyaev¹, A. I. Svetonosov¹, I. A. Evdokimenko^{1✉}, D. E. Legostaev¹, K. A. Filipitskiy¹

Experimental study of bubble motion in a vertical beam of rods

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Abstract. An experimental study of the dynamics of a gas bubble from a 70-mL cylinder in a vertical beam of rods has been carried out. The processes of formation, rise and crushing of the bubble in the interrod space have been studied by the method of high-speed video shooting (500 frames/second). It was found that the bubble acquires a cigar-like shape and undergoes crushing at the 150 mm section. The key modes of interaction with the rod bundle are identified. The obtained data are important for verification of CFD models of heat exchange equipment.

Keywords: gas bubble, rod bundle, two-phase flow, shadow imaging, hydrodynamics

Введение

Повышение эффективности и безопасности работы ядерных реакторов требует постоянного совершенствования расчетных кодов, описывающих теплогидравлические характеристики таких реакторов. Разработка и верификация расчетных кодов невозможны без экспериментальных данных о структуре течения в конструктивных элементах реакторов. Основным элементом активной зоны реактора является тепловыделяющая сборка, состоящая из пучка стержней – тепловыделяющих элементов. Преобладающим режимом течения в тепловыделяющей сборке является двухфазное (парожидкостное) течение. Структура двухфазного течения в каналах простой геометрии интенсивно изучается как теоретиче-

ски, так и экспериментально. Количество экспериментальных работ по структуре двухфазного течения в элементах тепловыделяющих сборок ограничено.

В последние годы проведен ряд экспериментальных работ, посвященных изучению движения пузырей в пучках стержней с использованием современных методов визуализации, таких как высокоскоростная видеосъемка, PIV (Particle Image Velocimetry) и ЛДА (лазерная доплеровская анемометрия). Эти исследования позволили выявить ключевые закономерности, такие как влияние межстержневого зазора на распределение пузырей по размерам [1, 2], особенности турбулентного взаимодействия жидкости и газовой фазы [3], а также зависимость режимов течения от расхода жидкости и газосодержания [4, 5]. Однако, несмотря на значительный прогресс, остаются не до конца изученными вопросы, связанные с коалесценцией и дроблением пузырей в условиях ограниченных каналов, а также влияние вибрации стержней на двухфазную динамику. Кроме того, большинство существующих корреляций для расчета скорости подъема пузырей разработаны для простых геометрий и требуют уточнения для пучков стержней [6, 7].

Целью данной работы является экспериментальное исследование распространения газовой фазы в поперечном сечении многостержневой сборки при внезапной инъекции газа в стационарную жидкость. Эксперименты проведены в цилиндрическом канале, в который были установлены $N=7 - 85$ вертикальных стержней с диаметром 10 мм.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

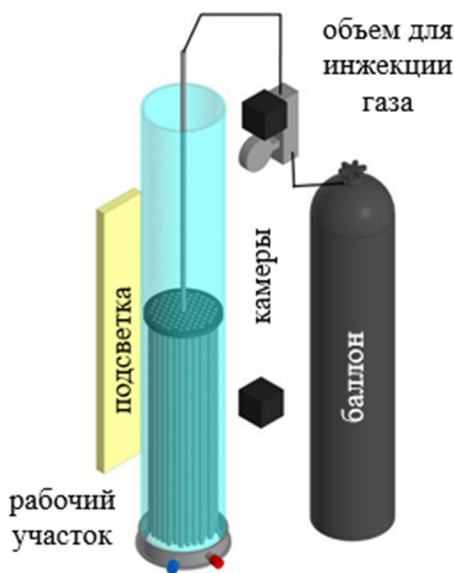


Рис. 1. Экспериментальная установка

Стенд представляет собой оргстеклянный цилиндр диаметром 150 мм и высотой 1000 мм, который был заполнен рабочей жидкостью (дистиллированная вода). В цилиндр устанавливались металлические стержни ($d=10$ мм) в количестве от 7 до 85 штук и закреплялись в канале при помощи фиксирующих колец. В центральный стержень инжестировался газ с различным давлением впрыска. Истечение газового пузыря происходило через отверстие в основании стержня. При помощи оптических зеркал, источника света и цифровой камеры проводилась теневая съемка динамики развития газового пузыря.

Результаты

На рис. 2 и 3 приведены фотографии эволюции газового пузыря при его внезапной инжекции при установке 7, 37 и 61 стержней.

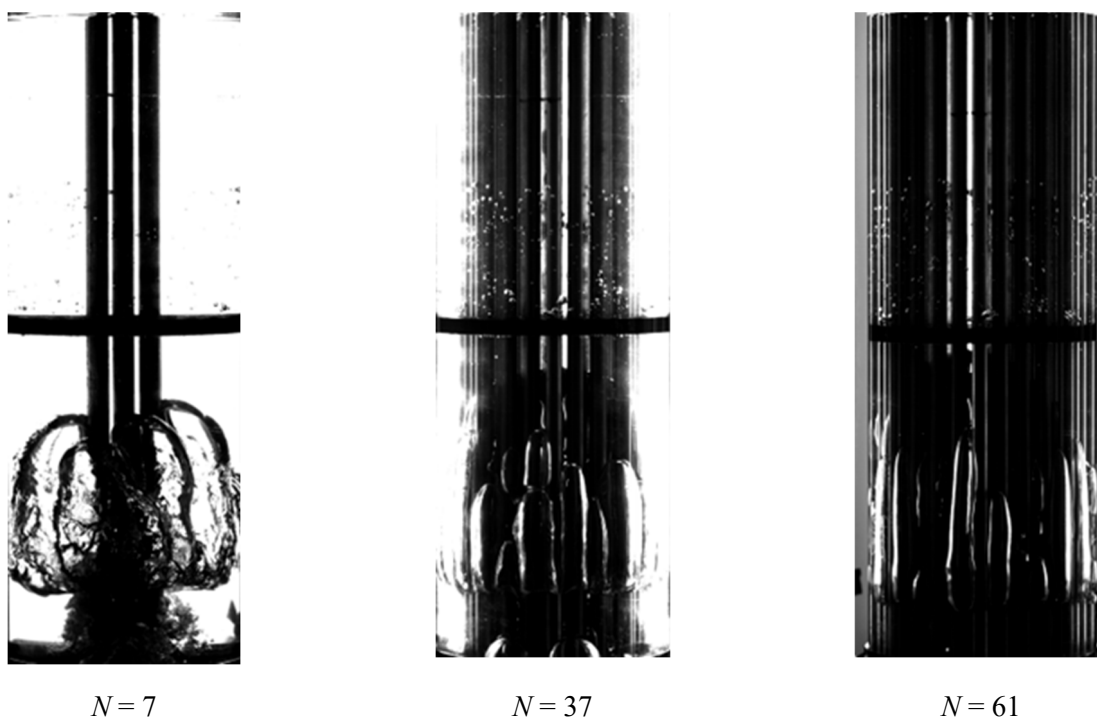
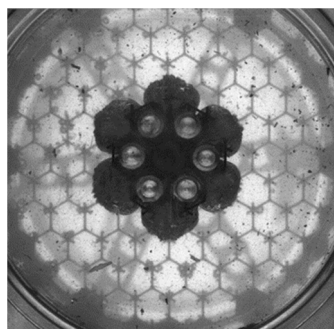


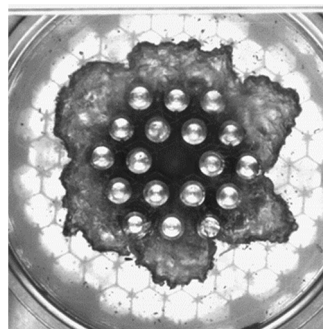
Рис. 2. Фронтальный вид

Обсуждение

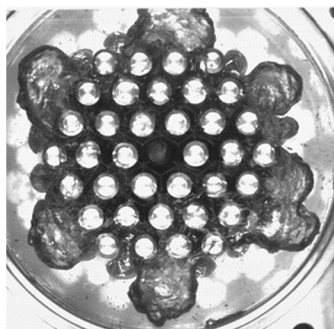
На начальной стадии формирования пузыря наблюдалась следующая последовательность процессов. В течение первых 50-100 мс происходило формирование первичного газового ядра у инжекционного отверстия. По достижении критического объема начиналась деформация пузыря с заполнением межстержневого пространства. Через 200-300 мс после начала инжекции основной объем газа (≈ 70 мл) принимал вытянутую форму. На участке высотой 150 мм происходило дробление пузыря. Также наблюдалось разделение потока газа на несколько параллельных каналов.



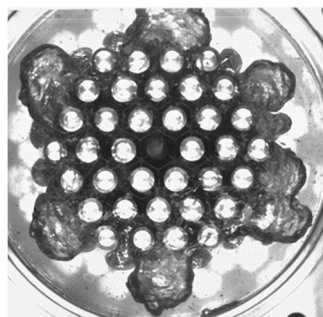
$N = 7$



$N = 19$



$N = 37$



$N = 61$

Рис. 3. Вид сверху

Были выяснено, что обтекание стержней происходит с периодическим сли-
янием и разделением пузырей. Особый интерес представляет наблюдаемый эф-
фект организации газового потока, когда после первоначального распределения
по нескольким каналам происходило спонтанное распределение газа по различ-
ным каналам. Это явление, по-видимому, связано с неравномерностью гидроди-
намического сопротивления в различных направлениях пучка стержней.

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование движения газовой фазы
при внезапном впрыске в вертикальный пучок стержней, которое позволило вы-
явить особенности возникновения и динамики дисперсных структур в сборках
вертикальных стержней. Полученные в результате выполненной работы данные
могут служить базой для верификации расчетных теплогидравлических кодов,
разрабатываемых в рамках выполнения программы работ по расчетно-экспери-
ментальному обоснованию тепловыделяющих сборок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Julia J.E., Ozar B., Brooks C.S. Experimental investigation of bubble behavior in vertical rod bundles under low flow conditions // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Vol. 330. – P. 340–352.

2. Shen X., Mishima K., Nakamura H. Bubble size and velocity measurements in vertical rod bundles under low pressure conditions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – Vol. 74. – P. 27–36.
3. Brooks C.S., Kim S., Hibiki T. PIV measurements of turbulent flow structures in a vertical rod bundle with two-phase flow // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2019. – Vol. 116. – P. 103–123.
4. Kim S., Paranjape S., Ishii M. High-speed visualization of bubble coalescence in vertical rod bundle geometry // *Nuclear Engineering and Design*. – 2020. – Vol. 360. – Art. 110678.
5. Paranjape S.S., Kim S., Kelly J.M. Flow regime identification in vertical rod bundles under high pressure conditions // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Vol. 312. – P. 45–58.
6. Ylönen M., Puustinen M., Räsänen A. Experimental study on bubble clustering in vertical rod bundles under varying void fraction conditions // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 128. – P. 12–25.
7. Zboray R., Prasser H.-M., Damsohn M. Experimental investigation of bubble rise velocities in complex geometries // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 53. – P. 156–167.
8. Manera A., Bousbia-Salah A., Petrov V. Validation of CFD models against high-resolution bubble tracking experiments in rod bundles // *Nuclear Engineering and Design*. – 2021. – Vol. 374. – Art. 111234.

© Н. А. Гуляев, А. И. Светоносков, И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025