

03

## **Динамика газовой фазы в имитаторе тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой**

© О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов,  
Н.А. Прибатурин, С.Е. Волков

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Топливная компания Росатома ТВЭЛ, Москва  
E-mail: kashinsky@itp.nsc.ru, lobanov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2013 г.

Проведено экспериментальное исследование двухфазного течения в модели тепловыделяющей сборки из 37 стержней в треугольной компоновке. Измерения выполнены при локальном вводе газовой фазы через одиночное сопло. Получены распределения локального газосодержания при различных значениях угловой координаты и расстояния от дистанционирующей решетки. Показано, что основная часть газовой фазы движется в пространстве, образованном стенками трех соседних стержней. В области течения за решеткой происходит существенное повышение концентрации газовой фазы.

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. Для поддержания расстояния между стержнями в сборке применяются дистанционирующие решетки. Данные элементы конструкции обладают большим гидравлическим сопротивлением и вносят существенное возмущение в структуру течения.

Преобладающим режимом течения в тепловыделяющей сборке является двухфазное (парожидкостное) течение. Структура двухфазного течения в каналах простой геометрии интенсивно изучается как теоре-

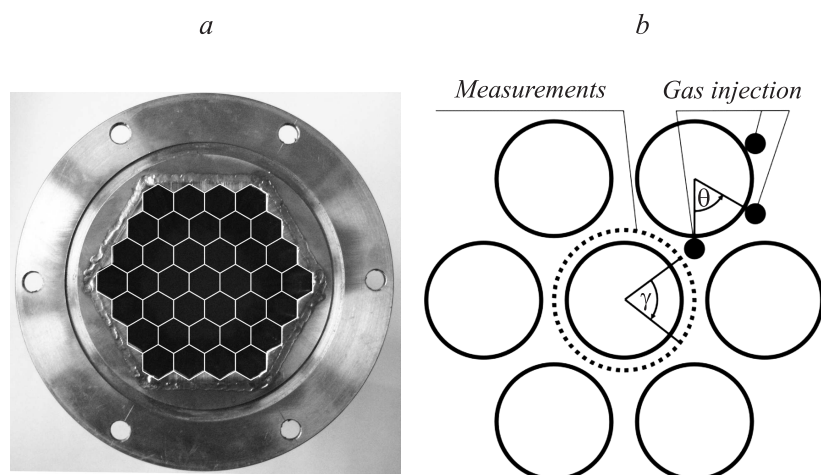
тически, так и экспериментально [1,2]. Количество экспериментальных работ по структуре двухфазного течения в элементах тепловыделяющих сборок ограничено [3,4].

Целью данной работы является экспериментальное исследование распространения газовой фазы в поперечном сечении 37-стержневой сборки и оценка влияния на этот процесс стандартной дистанционирующей решетки сборки АЭС 2006.

Работа выполнена на гидродинамическом стенде, представляющем собой замкнутый по жидкой фазе и разомкнутый по газовой фазе контур. Циркуляционным насосом жидкость из бака подавалась на вход вертикально установленного рабочего участка, в который устанавливалась модель — имитатор тепловыделяющей сборки. Расход жидкости через рабочий участок измерялся датчиком давления Метран-100-ДД, по перепаду давления на расходомерной диафрагме, которая была расположена на подводящем трубопроводе. Из рабочего участка жидкость по отводному трубопроводу попадала обратно в бак.

Модель сборки состояла из 37 стержней — имитаторов тепловыделяющих элементов. Общая длина модели 1,2 м. Две пары дистанционирующих решеток были расположены на расстояниях 50 и 250 мм от обоих торцов стержней и служили для позиционирования стержней. Исследуемая решетка устанавливалась посередине пучка стержней. Для выравнивания потока перед сборкой помещалась спрямляющая решетка. Для проведения фото- и видеосъемок в середине рабочего участка была установлена вставка из оргстекла.

При проведении прецизионных гидравлических измерений должны быть гарантированно исключены все возможные протечки жидкости как между соседними ячейками в многостержневой сборке, так и в зазорах между кассетами и возможных зазорах между дистанционирующей решеткой и стенкой канала. Анализ гидравлических нагрузок на тепловыделяющую сборку от потока теплоносителя должен учитывать максимально возможный перепад давления на используемых дистанционирующих решетках и исключать возможность протечек теплоносителя. В связи с этим измерения проводились в рабочем канале, имеющем в поперечном сечении форму, соответствующую форме 37-и сложенных вместе правильных шестиугольных ячеек с шагом размещения по их центрам, соответствующим расстоянию между центрами тепловыделяющих элементов в сборке АЭС-2006. В таком канале форма проходного сечения наиболее близко соответствует



**Рис. 1.** Экспериментальный канал: *a* — поперечное сечение рабочего канала; *b* — схема измерений.

форме 37-ячеистого фрагмента полноразмерной дистанционирующей решетки. В канал может быть установлена решетка любого типа и конструкции. Фотография поперечного сечения исследуемого канала приведена на рис. 1, *a*.

Результаты исследования структуры однофазного течения в сборке данной геометрии представлены в [5].

Для поддержания температуры рабочей жидкости  $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$  использовалась система термостатирования. В бак помещался термометр, изготовленный на основе терморезистора. Для охлаждения рабочей жидкости использовался теплообменник, в который подавалась холодная вода через электромагнитный клапан, управляемый электронной системой термостатирования.

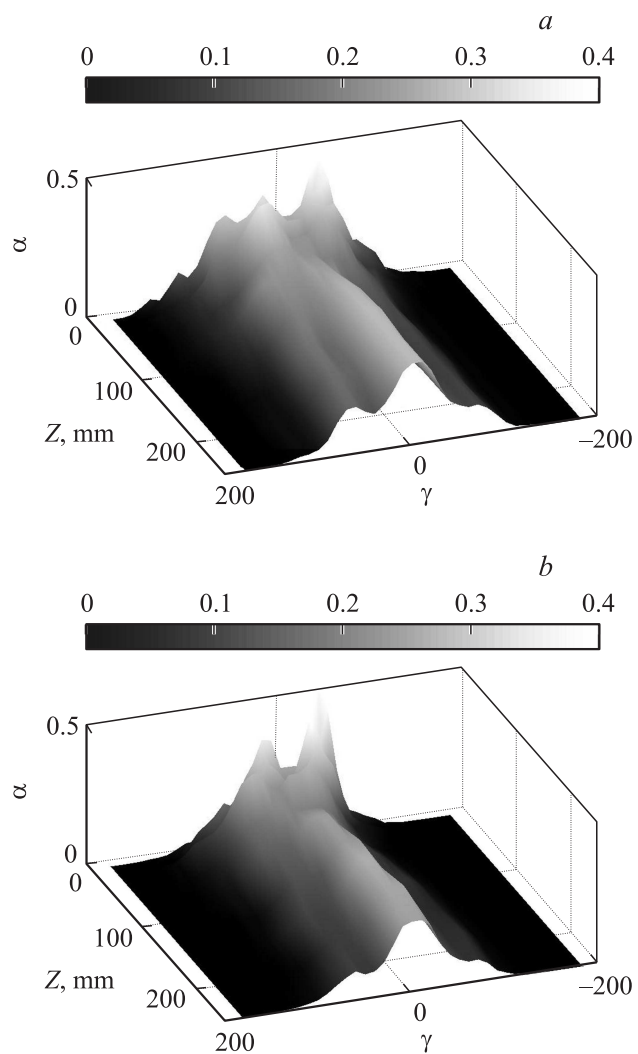
Измерения в двухфазном газожидкостном потоке проводились при помощи локального датчика электропроводности [2], установленного на центральном стержне сборки. В процессе измерений газосодержания производилось вращение центрального стержня вокруг оси и его перемещение по высоте. Позиционирование датчика относительно осевой и азимутальной координат производилось с использованием

шаговых электродвигателей. Управление двигателям осуществлялось при помощи программного комплекса, позволяющего одновременно управлять положением датчика и регистрировать его сигнал. Измерения проводились в области, расположенной непосредственно за исследуемой решеткой. Минимальные шаги между точками измерений составляли  $10^\circ$  по азимутальной координате и 5 mm по высоте модели. Последующая обработка записанных реализаций сигналов датчиков позволяла построить трехмерные распределения газовой фазы вокруг центрального стержня сборки. Измерения проводились при расходной скорости жидкости 3 m/s. Число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру, равнялось 37 000. Ввод газа производился через одиночное сопло, расположенное выше по потоку от исследуемой решетки.

Скоростная видеосъемка структуры двухфазного течения в ячейке за дистанционирующей решеткой показывает, что в потоке возможно движение как мелких пузырей газа, так и крупных удлиненных газовых образований, перекрывающих поперечное сечение свободного пространства. Основная часть газовой фазы движется в области, образованной стенками трех соседних стержней.

Проведены измерения азимутального распределения газосодержания вокруг центрального стержня по высоте канала в зависимости от положения точки ввода газа в поток. Схема измерений приведена на рис. 1, *b*. Пунктирной линией на рисунке показана траектория перемещения датчика газосодержания. Ввод газа осуществлялся на расстоянии 500 mm вверх по потоку от исследуемой решетки в трех различных позициях относительно центрального стержня, приведенных на рис. 1, *b*. Эти точки характеризуются значениями угла  $\theta$ , равным 0, 60 и  $120^\circ$  соответственно.

Распределение локального газосодержания вокруг центрального стержня сборки приведено на рис. 2. Здесь  $Z$  обозначает расстояние от чувствительного элемента измерительного датчика до решетки,  $\gamma$  — азимутальный угол. В случае ввода газа в область, окружающую центральный стержень (рис. 2, *a*), в секторе, соответствующем точке ввода газа в поток, наблюдаются большие значения локального содержания газовой фазы  $\alpha$ . При изменении угла  $\gamma$  наблюдается снижение значений  $\alpha$  вплоть до практически нулевых значений в противоположной точке ввода газа относительно оси центрального стержня (рис. 2, *c*). Такое распределение газовой фазы регистрируется для всех измеренных  $Z$ .



**Рис. 2.** Распределение локального газосодержания при различных положениях точки ввода газа:  $a - \theta = 0^\circ$ ,  $b - \theta = 60^\circ$ ,  $c - \theta = 120^\circ$ .

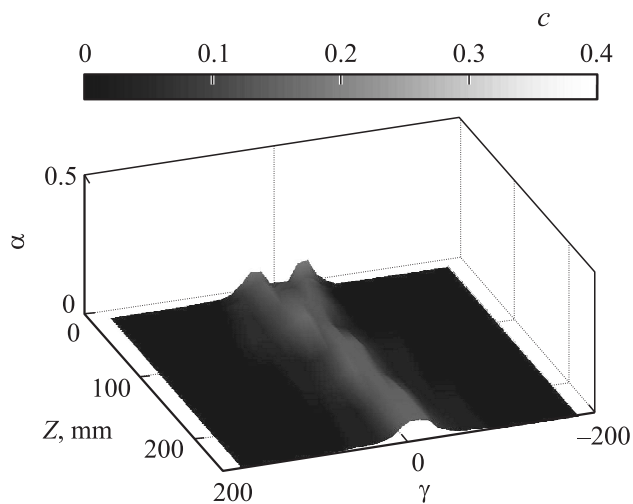
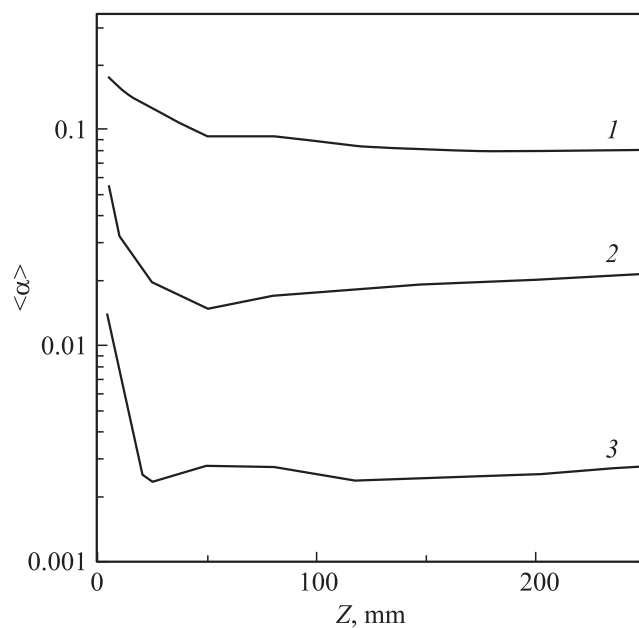


Рис. 2 (продолжение).

Таким образом, в потоке наблюдается слабое перемешивание газовой фазы в пространстве между смежными ячейками. Данное наблюдение подтверждается измерениями, проведенными при вводе газа в область, расположенную на противоположной стороне стержня, соседнего с центральным.

Осредненные по азимутальному углу значения газосодержания в зависимости от расстояния от дистанционирующей решетки приведены на рис. 3. Для различных положений точки ввода газа наблюдается повышенное газосодержание на расстоянии не более 50 mm от решетки. Это вызвано тем, что за решеткой формируется вихревое течение, которое захватывает пузырьки газа. При увеличении расстояния от решетки наблюдается равномерное распределение газовой фазы. Это свидетельствует о том, что в области за решеткой перемешивание между ячейками слабо выражено.

Полученные в результате выполненной работы данные могут служить базой для уточнения проектных гидравлических характеристик, верификации расчетных теплогидравлических кодов, разрабатываемых в рамках выполнения программы работ по расчетно-экспериментальному



**Рис. 3.** Зависимость усредненного по периметру газосодержания от расстояния от решетки: 1 —  $\theta = 0^\circ$ , 2 —  $\theta = 60^\circ$ , 3 —  $\theta = 120^\circ$ .

обоснованию выбора конструкции интенсификаторов теплообмена для тепловыделяющих сборок.

## Список литературы

- [1] Зайчик Л.И., Мукин Р.В., Мукина Л.С., Стрижов В.Ф. // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. В. 5. С. 665–675.
- [2] Kashinsky O.N., Lobanov P.D., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 3717–3727.
- [3] Zhang Z., Suzuki K., Hosokawa S., Tomiyama A. // J. Fluid Science and Technology. 2008. V. 3. P. 172–182.
- [4] Chen Sh.-W., Liu Y., Hibiki T., Ishii M., Yoshida Y., Kinoshita I., Murase M., Mishima K. // International J. Heat and Fluid Flow. 2012. V. 33. P. 168–181.
- [5] Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С., Волков С.Е. // Теплоэнергетика. 2013. В. 1. С. 63–67.