

УДК 621.039.4

Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой

О.Н. Кашинский¹, Д.В. Куликов¹, П.Д. Лобанов¹, Н.А. Прибатурин^{1,2},
А.И. Светоносков¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский филиал Института проблем
безопасного развития атомной энергетики РАН

E-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Проведены измерения распределения скорости жидкости и ее пульсаций в межствольном пространстве 7-ствольной экспериментальной модели тепловыделяющей сборки АЭС при числах Рейнольдса 8000, 1600, 24000. Определено влияние дистанционирующей решетки на распределение осевой компоненты скорости жидкости. Показано, что относительные значения скорости жидкости и ее пульсаций не зависят от числа Рейнольдса и определяются расстоянием от дистанционирующей решетки.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, эксперимент, профили скорости.

Введение

Для увеличения энергоэффективности и безопасности работы энергоблоков атомных станций требуется детальная информация о распределении локальных характеристик течения теплоносителя и коэффициентов теплообмена. Особое внимание необходимо уделять взаимодействию теплоносителя с дистанционирующими элементами топливных сборок, так как их присутствие приводит к существенному возмущению потока теплоносителя и отклонению закономерностей теплообмена от стационарного течения в пучке стержней [1]. В связи с этим проводятся работы для определения влияния дистанционирующих элементов на локальные характеристики потока и теплообмен. Измерение профилей скорости в межствольном пространстве сборки стержней в гексагональной компоновке проводилось в работе [2] как в гладком пучке стержней, так и в экспериментальной модели, содержащей дистанционирующую решетку. Для проведения измерений использовалась трубка Пито. Были приведены данные о восстановлении профилей скорости после взаимодействия с решеткой.

Данные о перепаде давления, распределениях напряжения трения на стенке и скорости жидкости в экспериментальной модели, содержащей дистанционирующую решетку, приведены в работе [3]. Для определения профилей скорости жидкости была использована трубка Пито, приводимая в движение с помощью координатного устройства.

© Кашинский О.Н., Куликов Д.В., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносков А.И., 2018

Исследование полей скорости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки (ТВС) с масштабным коэффициентом около 4,2 проводилось в работах [4, 5] с помощью трубки Прандтля. В качестве модельного теплоносителя использовался воздух. В работах были приведены данные о распределении локальных гидродинамических и массообменных характеристик течения.

Однако для получения подробной картины потоков и замыкающих соотношений, необходимых для верификации теплогидравлических кодов, требуется проведение исследований с помощью современных бесконтактных методов. В настоящее время преимущественно используются оптические методы, к которым относится, например, метод, основанный на измерениях лазерным доплеровским измерителем скорости (ЛДИС), и метод цифровой трассерной анемометрии (PIV). Проведение экспериментальных исследований в квадратной упаковке твэлов проще, чем в гексагональной. В последние годы появилось несколько работ, в которых рассматривается влияние дистанционирующих решеток с перемешивающими поток дефлекторами. В работе [6] информация о структуре потока в сборке стержней 5×5 получена с помощью системы ЛДИС. Представленная здесь база данных содержит информацию о распределении скоростей жидкости и пульсационных характеристик. В качестве рабочей жидкости применялась вода, масштабный фактор экспериментальной модели составлял 2,6. Цифровая трассерная анемометрия использовалась для определения структуры потока в работах [7, 8]. Размеры экспериментальной модели соответствовали натурным. Были разработаны решения для преодоления оптических проблем и получены данные о распределении скорости жидкости.

Можно сделать вывод, что применение бесконтактных методов исследования позволяет получать ценную информацию для замыкающих соотношений современных теплогидравлических кодов. В то же время, для гексагональныхборок количество подобной информации ограничено, особенно для моделей с натурными размерами твэлов и расстояний между ними. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка рабочего участка для определения скорости модельного теплоносителя с помощью системы ЛДИС и исследования распределения осредненной и пульсационной осевой скоростей в 7-стержневой экспериментальной модели.

Описание эксперимента

В качестве модельного теплоносителя в эксперименте использовалась дистиллированная вода. Температура жидкости поддерживалась в пределах 24,8÷25,2 °С с помощью автоматической системы термостабилизации. Расход теплоносителя регулировался с помощью центробежного насоса и контролировался частотным преобразователем. Конструкция экспериментальной модели представляет собой вертикальную 7-стержневую модель ТВС. Поперечное сечение обечайки изготовлено таким образом, что имитирует дополнительный пояс твэлов. Диаметр стержней-имитаторов — 9 мм, длина — 890 мм, расстояние между центрами — 12,6 мм, относительный шаг — 1,4.

Имитаторы твэлов позиционируются в рабочем участке посредством семи ячеистых элементов дистанционирующих решеток. Толщина материала из которого выполнены элементы составляет 0,3 мм, высота решеток — 30 мм. По высоте рабочего участка расположены 3 пояса позиционирования стержней. На входе и выходе экспериментальной модели установлены соответственно две решетки. Положение центральной решетки варьировалось относительно положения оптически прозрачного измерительного блока. Ее верхняя кромка устанавливалась на расстояниях 383 и 421 мм от входа в модель ТВС. На входе в экспериментальную модель были установлены уравнивающие решетки для стабилизации потока.

Оптическая схема измерений приведена на рис. 1а. Измерение локальных скоростей жидкости выполняется в области, ограниченной штриховой линией. При этом используются плоскопараллельные оптически прозрачные стенки рабочего участка,

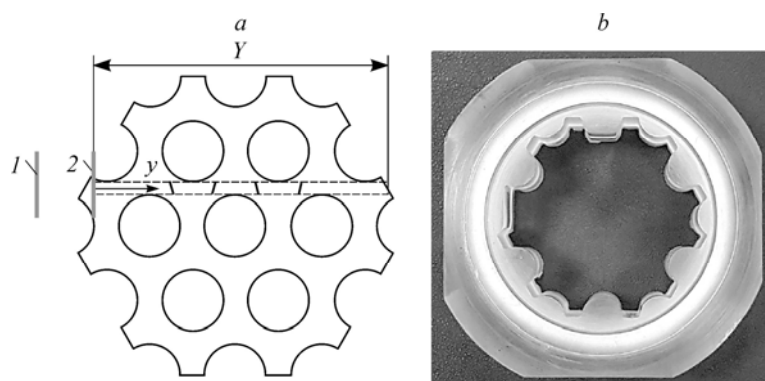


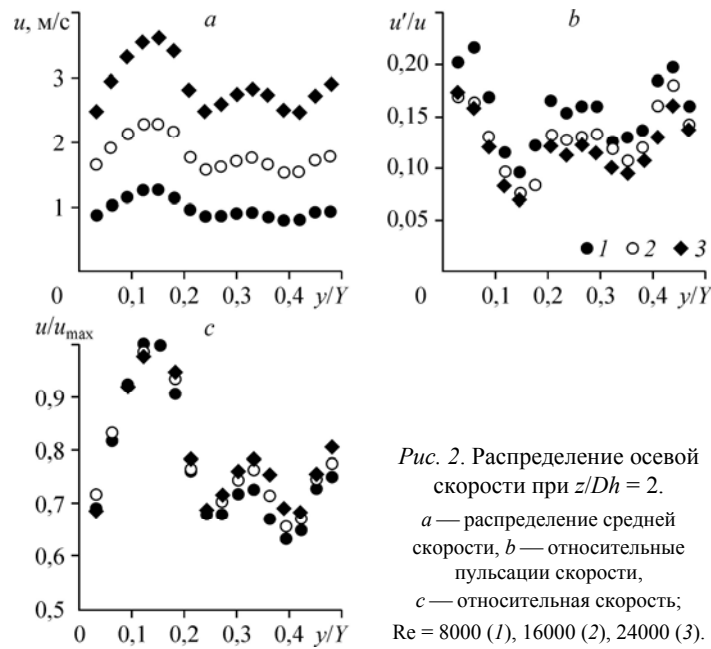
Рис. 1. Оптическая схема проведения эксперимента (а) и фотография экспериментального блока (b).
1, 2 — оптически прозрачные стенки рабочего участка.

расположенные с внешней (1) и внутренней (2) сторон корпуса экспериментальной модели, которые показаны на рисунке вертикальными линиями. Расположение элементов сотовой конструкции дистанционирующей решетки, попадающих в измерительную область и вносящих возмущение в поток, изображены в виде наклонных линий. Фотография сегмента рабочего канала из оргстекла высотой 20 мм с плоскими гранями для прохождения лазерного луча представлена на рис. 1b.

Результаты эксперимента

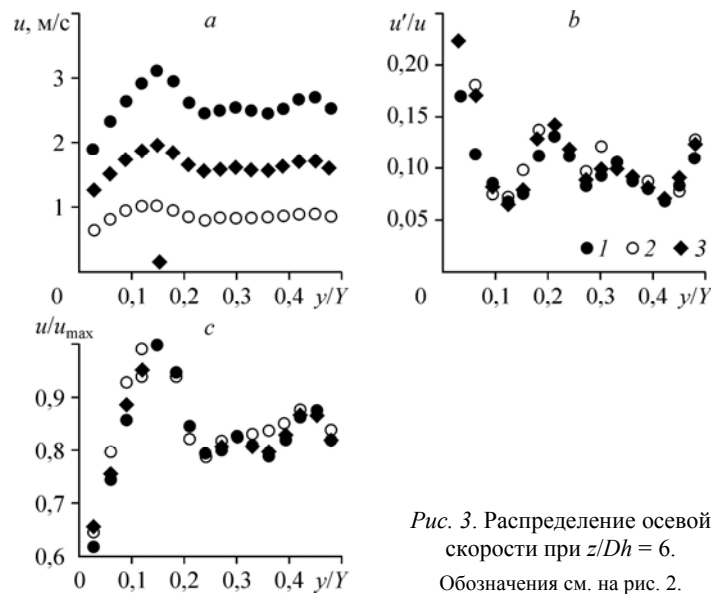
В результате измерений, проведенных в межканальном промежутке на расстоянии 440 мм от входа в модель ТВС, определены профили вертикальной компоненты скорости течения жидкости u , включая пульсационные значения u' . Измерения распределений выполнены с использованием лазер-доплеровского измерителя скорости ЛАД-03. ЛДИС позволяет регистрировать две компоненты вектора скорости потока в измерительном объеме с частотой измерения до 30000 отсчетов в секунду. Прибор был установлен и закреплен на координатном устройстве. Шаг пространственного сканирования координатного механизма составлял 0,025 мм, что позволяло выполнять сканирование в межканальных областях экспериментальной модели ТВС с высоким пространственным разрешением. Неопределенность измерения вертикальной компоненты скорости составляла порядка 4 %. Результаты измерений приведены в виде зависимостей измеряемой величины от относительной координаты на рис. 2, 3. Здесь u_{\max} — максимальное значение измеренной скорости для каждого из профилей. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса потока $Re = 8000, 16000$ и 24000 . Отсчет координат ведется от начала перемещения измерительного лазерного прибора вглубь сборки (см. рис. 1a).

Непосредственно за решеткой ($z/Dh = 2$ — отношение расстояния от верхней кромки дистанционирующей решетки до области измерений к гидравлическому диаметру) наблюдается большое возмущение структуры потока, что выражается в высокой степени неоднородности распределения скорости жидкости и ее пульсаций вдоль линии измерения (рис. 2). Варьирование Re в три раза не приводит к существенному изменению относительных величин (рис. 2b, 2c). Таким образом, можно отметить, что наблюдается хорошая масштабируемость характеристик потока с изменением Re . Данное наблюдение подтверждает выводы работ [1–3], где подобные результаты были получены для распределения напряжения трения на стенке, коэффициента теплообмена и вертикальной компоненты скорости жидкости. Наибольшее значение скорости наблюдается вблизи



стенку канала, а в центральной области скорость несколько ниже. Это вызвано сменой направления тока жидкости в сторону не затененного решеткой периферийного сечения экспериментальной модели. Расположение локальных максимумов скорости соответствует расположению конструктивных элементов решетки. Поведение пульсационных характеристик аналогично. Из-за возмущения потока наблюдается достаточно высокий уровень турбулентности. Среднее значение относительных пульсаций скорости жидкости u'/u составляет около 0,15.

Для проведения второй серии экспериментов расстояние от решетки до линии проведения измерений было увеличено ($z/Dh = 6$). Выбор расстояния осуществлялся на основе результатов работ [1, 3], в которых было показано, что на таком расстоянии влияние дистанционирующей решетки на напряжение трения на стенке и теплообмен практически прекращается. По сравнению с предыдущим случаем увеличение расстояния от решетки



приводит к выполаживанию профиля скорости жидкости, при этом значительно уменьшается амплитуда пиковой скорости. Однако наибольшая скорость регистрируется вблизи стенки. Это является особенностью 7-стержневой сборки. Возмущение потока при наличии стержней падает и степень его турбулентности снижается. Уровень пульсаций скорости жидкости уменьшается, среднее значение u'/u составляет около 0,1.

Заключение

Проведена разработка рабочего участка для измерений скорости жидкости в 7-стержневой экспериментальной модели ТВС с размерами в поперечном сечении и компоновкой, характерными для отечественных энергоблоков. Выполнено исследование влияния дистанционирующей решетки на распределение скорости модельного потока теплоносителя. Эксперименты проведены при числах Рейнольдса 8000, 1600, 24000. Показано, что относительные значения осредненной и пульсационной скоростей зависят от расположения измерительной точки в межканальном пространстве, но не зависят от числа Рейнольдса. Предложенный метод исследования может быть использован для экспериментальных моделей с более высоким количеством стержней и при более высоких скоростях потока. Для получения более представительных данных желательны использование экспериментальных моделей с большим количеством стержней.

Список литературы

1. Holloway M.V., Conner M.E., McClusky H.L., Beasley D.E. The effect of support grid features on local, single-phase heat transfer measurements in rod bundles // J. Heat Transfer. 2004. Vol. 126, No. 1. P. 43–53.
2. Rehme K., Trippe G. Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids // Nuclear Engng and Design. 1980. Vol. 62, No. 1–3. P. 349–359.
3. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С., Волков С.Е. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67.
4. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСа ВВЭР // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 252–256.
5. Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Исследования гидродинамических характеристик и особенностей течения теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 3. С. 385–394.
6. Chang S.K., Moon S.K., Baek W.P., Choi Y.D. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices // Nuclear Engng and Design. 2008. Vol. 238, No. 3. P. 600–609.
7. Dominguez-Ontiveros E.E., Hassan Y.A., Conner M.E., Karoutas Z. Experimental benchmark data for PWR rod bundle with spacer-grids // Nuclear Engng and Design. 2012. Vol. 253. P. 396–405.
8. Dominguez-Ontiveros E.E., Hassan Y.A. Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 5×5 rod bundle with spacer grids using PIV and MIR // Nuclear Engng and Design. 2009. Vol. 239, No. 5. P. 888–898.

*Статья поступила в редакцию 29 ноября 2017 г.,
после доработки — 17 января 2018 г.*