

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, И.В. Каратушина, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВСА РЕАКТОРОВ ВВЭР И ВБЭР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию поля скорости потока теплоносителя за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» для ТВСА реакторов ВВЭР–1000 и ВБЭР–300.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая решетка.

Введение

В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработана ТВСА с улучшенными характеристиками для использования в активных зонах как действующих ВВЭР–1000, так и для разрабатываемой реакторной установки ВБЭР–300.

Для повышения критического теплового потока в конструкции ТВС применяют перемешивающие решетки (ПР) типа «порядная прогонка», интенсифицирующие процессы теплообмена как в пределах одной кассеты, так и между соседними сборками [1].

Для обоснования теплотехнической надежности активной зоны реакторов при постановке ТВСА с данным типом перемешивающих решеток необходимо определить влияние её конструкции на гидродинамику и массообмен потока теплоносителя [2].

Для решения данной задачи в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева был проведен комплекс экспериментальных исследований на аэродинамическом стенде.

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1) [3,4].

В состав экспериментального стенда входят:

- экспериментальная модель (ЭМ);
- вентилятор высокого давления;
- расходомерное устройство с участками стабилизации потока;
- измерительный комплекс.

Экспериментальная модель, представляющая собой фрагмент ТВСА (рис. 2), выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$, имеет длину $L=3$ м и состоит:

- из шестигранного чехла;
- 61 цилиндрического твэла-имитатора с описанными диаметрами $40^{\pm 0,5}$ мм;
- устройства фиксации датчика;
- двух поясов дистанционирующих решеток;
- пояса перемешивающей решетки.

Исследуемый пояс перемешивающей решетки представлен на рис. 2. Высота ячеек перемешивающей решетки составляет 66 мм (что соответствует 15 мм натурной ПР). Перемешивающая решетка имеет турбулизирующие дефлекторы, которые улучшают перемешивание потока теплоносителя. Величина угла отгиба турбулизирующего дефлектора составляла 35° , а высота – 19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора).

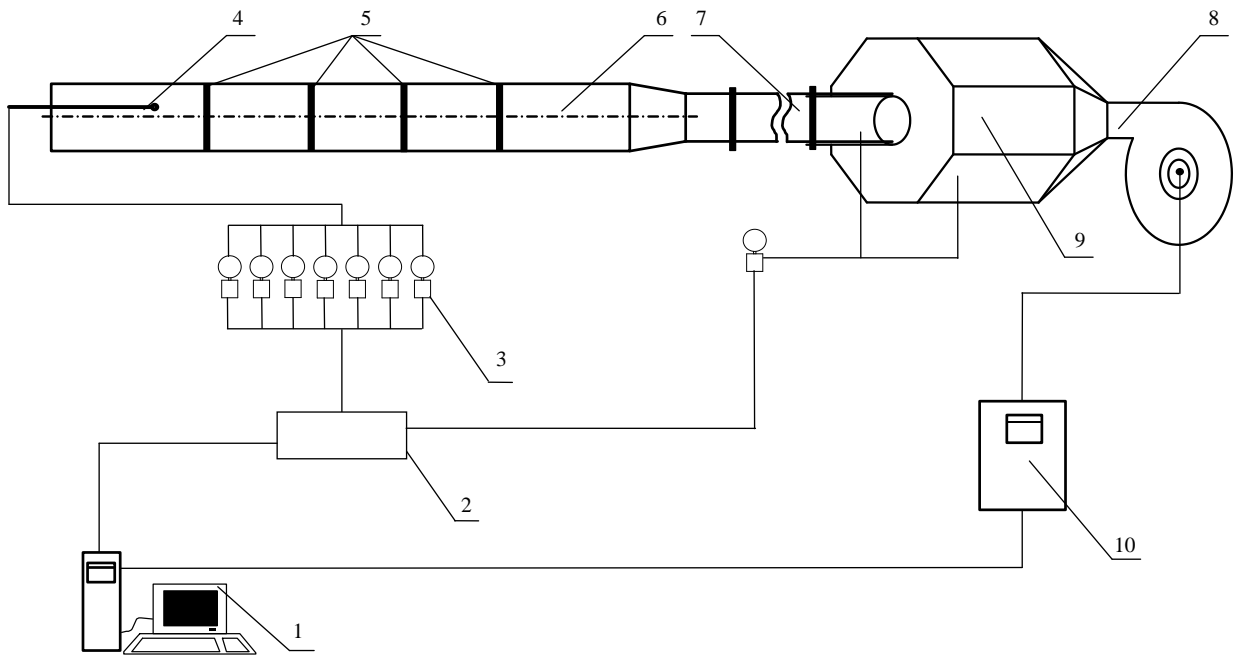
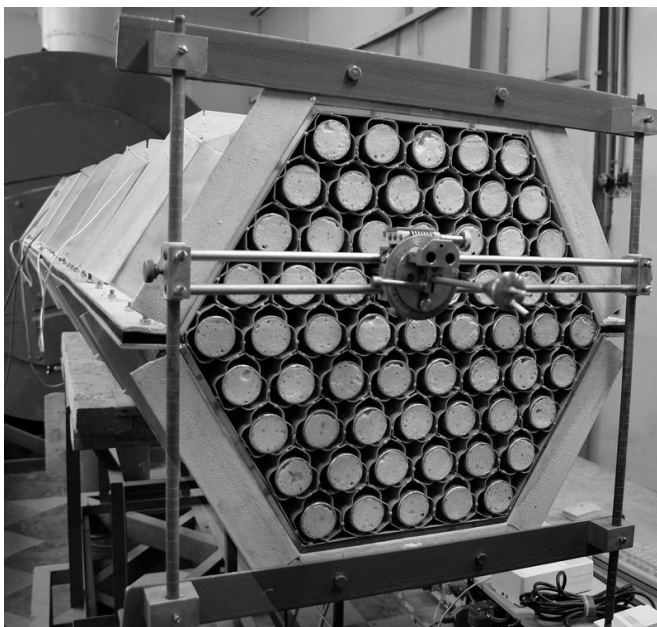
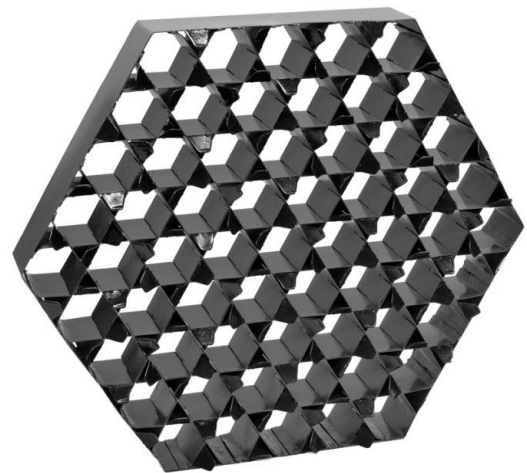


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда:

- 1 – ЭВМ; 2 – базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 3 – преобразователи давления САПФИР-22Р; 4 – пневмометрический зонд; 5 – статические отборы;
6 – экспериментальная модель; 7– успокоительный участок; 8 – вентилятор высокого давления;
9 – ресиверная емкость; 10 – преобразователь частоты



а)



б)

Рис. 2. Выходное сечение экспериментальной модели и исследуемый пояс перемешивающей решетки:

- а – выходное сечение экспериментальной модели;
б – пояс перемешивающей решетки типа «порядная прогонка»

Для измерения направления и величины вектора скорости, а также давления в про-

странственном потоке использовался пневмометрический зонд с конической чувствительной частью, имеющей пять приемных отверстий (рис. 3).



Рис. 3. Чувствительная часть пятиканального пневмометрического зонда

Для получения детальной информации о трехмерном течении потока исследования локальной гидродинамики теплоносителя проводились в стандартной области (рис.4). Область включала в себя определенное количество ячеек, которые разбивались на зоны измерения. В каждой из таких зон замеры проводились в 14 сечениях по длине ЭМ.

Среднеквадратичные отклонения величин W_x , W_y , W_z составляют 2, 2, 2,5% от абсолютной скорости соответственно. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z при доверительной вероятности 0,997 не превышают 6%, 6% и 7,5% от абсолютной скорости.

Результаты исследования локальных полей скорости за дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» в модели фрагмента ТВСА реактора ВВЭР

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводились на масштабной модели ТВСА при числах $Re = 92200$. Цель данных исследований заключалась в измерении вектора скорости для стандартной области модели фрагмента ТВСА, включающей в себя ячейки №№ 49, 64, 65, 66, 67, 68, 80, 81, 82, 83, 84 (рис. 4).

Для получения наиболее полного представления о характере течения теплоносителя в рассмотренных областях были выбраны две формы представления экспериментальных данных:

- графическое построение распределения проекций составляющих абсолютной скорости W_x , W_y , W_z , отнесенных к среднерасходной скорости в зависимости от относительной координаты;
- графическое построение векторного поля поперечных скоростей в стандартной области в характерных сечениях по длине экспериментальной модели.

Первая форма позволяет количественно оценить значения проекций абсолютной скорости в стандартной области, а вторая – качественно определить основные закономерности течения теплоносителя.

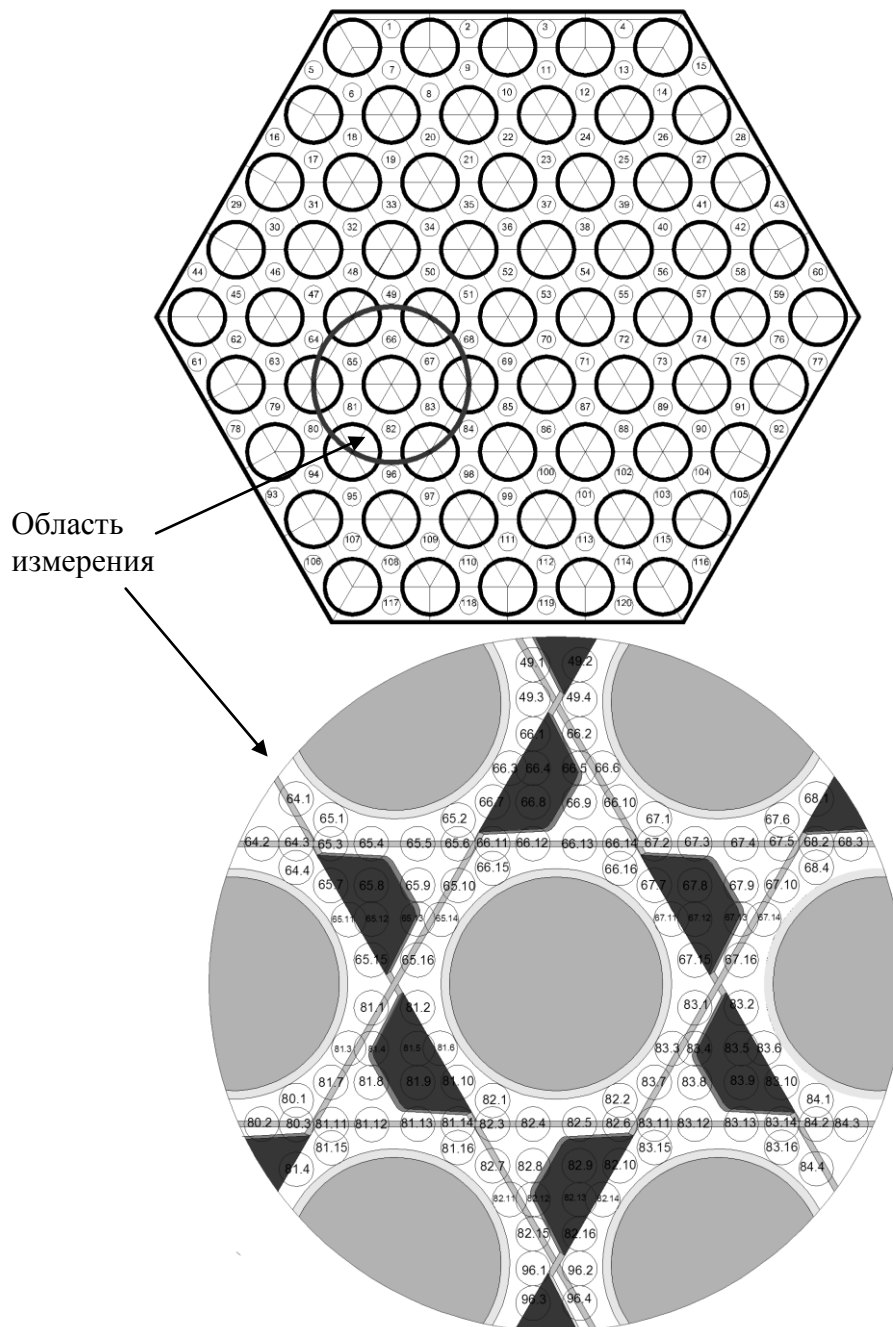


Рис. 4. Расположение стандартной области в поперечном сечении экспериментальной модели

Выводы

1. За дефлекторами происходит направленное движение потока теплоносителя, обусловленное расположением дефлекторов, т.е. отклоненный дефлектором поток приобретает поперечные составляющие скорости на выходе из перемешивающей решетки, и далее, посредством механизма конвективного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком;

2. За решеткой перемешивающие свойства снижаются, вследствие уменьшения поперечных составляющих скорости. Наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, что быстро уменьшает интенсивность поперечных конвективных течений, создаваемых дефлекторами решетки;

3. Максимальное значение поперечной скорости наблюдается сразу за дефлекторами и достигает 40% от аксиальной составляющей скорости, которые снижаются до 20% на расстоянии $\Delta l/d \approx 5,00$ от решетки. Дальнейшее затухание относительных поперечных скоростей прекращается на расстоянии $\Delta l/d = 29,5$ (рис. 5).

4. В области межячейкового зазора за ПР относительно ячеек, где дефлекторы расположены в противоположные стороны по отношению друг к другу, наблюдается вихревой характер движения теплоносителя, имеющий протяженность $\Delta l/d \approx 2$ (рис. 6).

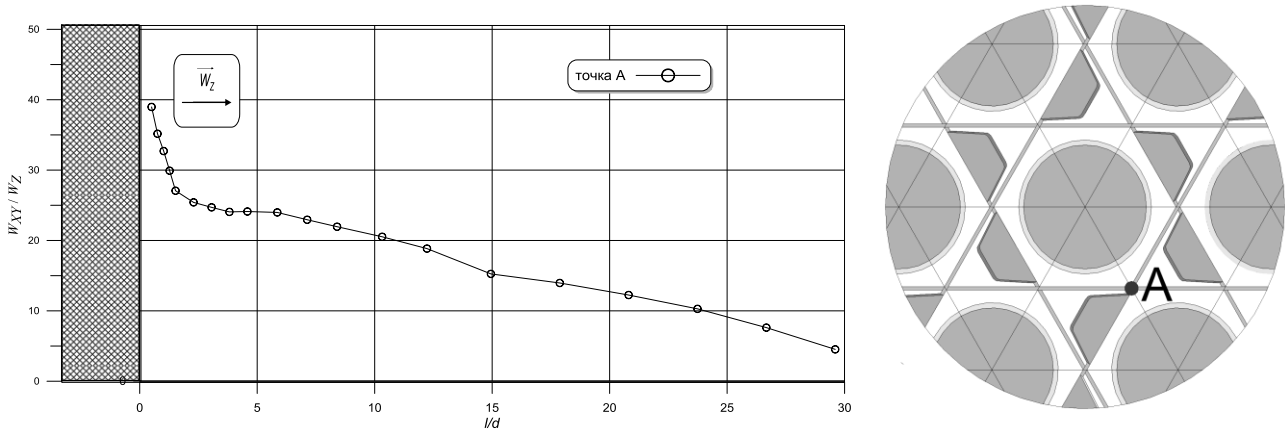


Рис. 5. Распределения относительной поперечной скорости за ПР типа «порядная прогонка» с дефлекторами

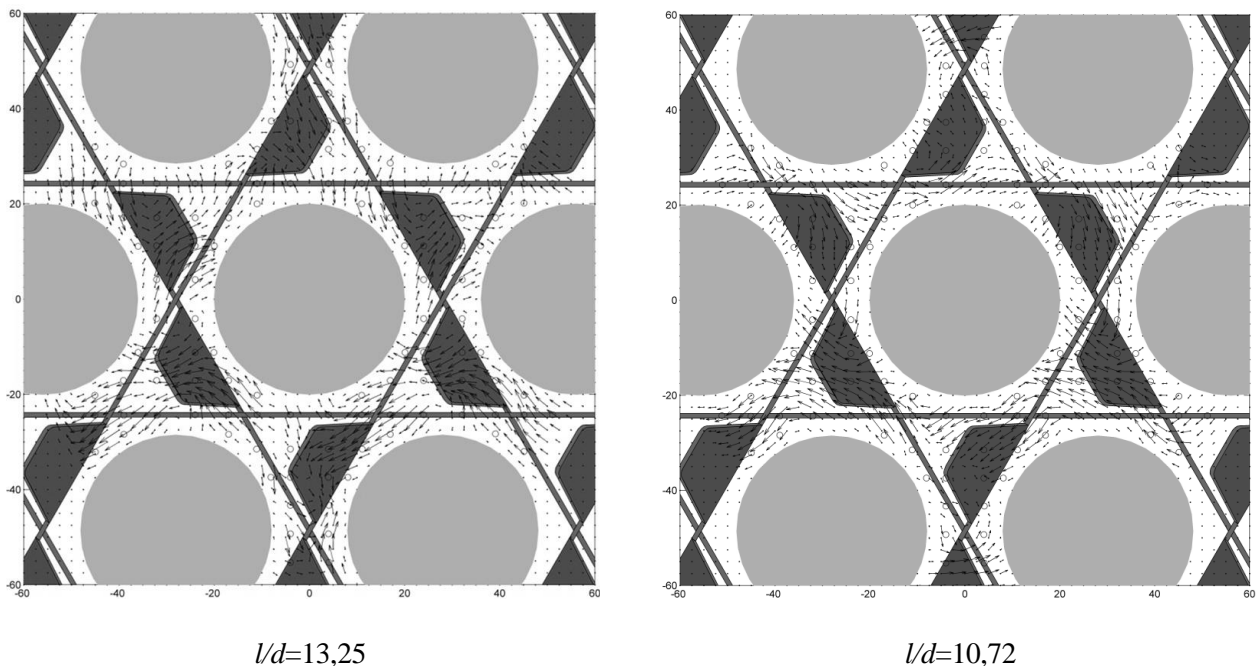


Рис. 6. Векторные поля поперечных составляющих скорости за дефлекторами перемешивающей решетки при $l/d=13,25$ и $l/d=10,72$

Таким образом, определены характеристики локальной гидродинамики потока теплоносителя за дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» ТВСА для реакторов ВВЭР–1000 и ВВЭР–300.

Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального ячейечного расчета активных зон водо-водяных ядерных

реакторов, с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники.

Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВВЭР-300 / С.С. Бородин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2013. №2. С. 126–133.
2. **Бородин, С.С.** Исследования массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВС-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С.С.Бородин [и др.] // Труды пятой Российской национ. конф. по теплообмену: в 8 т. М., 2010. Т. 1. С. 177–180.
3. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 252–257.
4. **Дмитриев, С.М.** Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 3. С. 98–107.

*Дата поступления
в редакцию 07.02.2014*

S.M. Dmitriev, I.V. Karatushina, A.N. Pronin, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF VELOCITY FIELDS IN FUEL ASSEMBLIES OF WWER AND VBER REACTORS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose. The main aim of research was study hydrodynamic and mass exchange heat-carrier flow features in fuel assemblies in the WWER and VBER reactors using the belts of mixing grids «run row upon row».

Design/methodology/approach. The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings. Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in WWER and VBER reactors fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind mixing grid «run row upon row» were revealed. The local hydrodynamic characteristics of coolant and fading of disturbances were determined.

Research limitations/implications. The received results can be used as a database for verification of CFD-codes and of programs calculation cell-by-cell of active zone with TVSA. Researches data can be used to define more precisely local hydrodynamic characteristics of current of coolant with the purpose of reduction conservatism at calculations heat-engineering reliability of a core WWER and VBER.

Originality/value. Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of a core with TVSA.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, mixing grid.