УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ РЕШЕТКАМИ ТВСА–12PLUS РЕАКТОРА ВВЭР–1000

Андреев В.В., Дмитриев С.М., Карпеш А.А., Пронин А.Н., Терехин А.Н., Хробостов А.Е.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, e-mail: proninaleksei@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS. Цель работы заключалась в исследовании распределения локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в тепловыделяющей сборке за перемешивающей и дистанционирующей решетками. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. По результатам проведенных исследований было получено распределение аксиальных составляющих скорости по ячейкам, распределение концентрации трассера в экспериментальной модели. Полученные данные позволили детализировать и визуализировать картину течения теплоносителя за перемешивающей и дистанционирующей решетками ТВСА–12PLUS. Результаты исследований приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР–1000 с ТВСА–12PLUS.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающая решетки, гидродинамика, тепломассоперенос

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF COOLANT FLOW HYDRODYNAMICS BEHIND SPACER AND MIXING GRIDS FA OF WWER-1000 REACTOR

Andreev V.V., Dmitriev S.M., Karpesh A.A., Pronin A.N., Terehin A.N., Khrobostov A.E.

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: proninaleksei@mail.ru

Results of experimental investigations of local hydrodynamics and intercell mass transfer of coolant flow in a core of WWER with FA-12PLUS have been presented. The aim of work has been consisted in investigating distribution of local hydrodynamic and mass-transfer characteristics of flow in FA behind spacer and mixing grids. Investigations were carried out by the diffusion method (the tracer-gas method) with the help of pneumometric probes. Cells distribution of axial speed components, tracer concentration distribution in experimental model have been received on the base of conducted investigations results. The obtained results allowed to specificate and to visualize coolant flow pattern (picture) behind mixing and spacer grids of FA-12 PLUS. Investigation results have been taken for practical use by Africantov OKBM JSC when assessing heat engineering reliability of cores WWER-1000 with FA-12 PLUS.

Keywords: FA (fuel assembly), spacer and mixing grids, hydrodynamics, heat mass-transfer

В АО «ОКБМ Африкантов» для реакторов ВВЭР–1000 разработана топливная кассета ТВСА–12PLUS. Особенностью конструкции данной ТВС является наличие в её составе интенсификаторов теплообмена – перемешивающих решеток типа «порядная прогонка». Применение таких решеток позволяет дополнительно турбулизировать поток, выровнить температуры и энтальпии теплоносителя по сечению сборки и тем самым повысить запас до кризиса теплоотдачи. Силовой каркас, составленный из дистанционирующих решеток и уголков жесткости, обеспечивает необходимую прочность и жесткость конструкции [1].

Один из этапов, который нужно пройти на пути от разработки ядерного топлива до поставки его на атомную станцию – обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора с данной топливной кассетой. Для проведения обоснования теплотехнической надежности реакторов ВВЭР необходимо определить влияние всех элементов конструкции ТВСА–12PLUS на гидродинамику потока теплоносителя. На сегодня, учитывая сложность конструкции топливных сборок, основным методом изучения локальной гидродинамики потока в них являются экспериментальные исследования.

Данные задачи решаются в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева путем моделирования процессов течения потока теплоносителя на аэродинамическом стенде.

Материалы и методы исследования

Экспериментальный стенд

Аэродинамический стенд включает в себя следующие элементы: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, участок стабилизации воздушного потока, экспериментальную модель, систему подачи трассера, измерительный комплекс. Вентилятор нагнетает воздух в ресиверную емкость, необходимую для сглаживания пульсаций расхода воздуха. Из ресиверной емкости воздух поступает на участок стабилизации, после чего направляется в экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS. Модель выполнена в полном геометрическом подобии с натурным фрагментом активной зоны и включает в себя сегменты трех топливных кассет, межкассетное пространство, пояса дистанционирующих и перемешивающих решеток [2], имитаторы твэлов.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие средства измерения: трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, расходомер газа, газоанализатор.

Методика исследований

Изучение формирования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в ТВСА–12PLUS проводились в два этапа:

1) исследования влияния перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамику потока теплоносителя в ТВСА–12PLUS;

2) исследования влияния дистанционирующей решетки на гидродинамику потока в активной зоне с ТВСА–12PLUS.

Исследования межъячеечного массообмена осуществлялось методом диффузии примесей. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации.

Для определения аксиальной составляющей скорости в экспериментальной модели использовалась трубка Пито–Прандтля.

Для проведения исследований было изготовлено две экспериментальные модели, которые отличались друг от друга взаимным расположением перемешивающей и дистанционирующей решеток (рис. 1). Для исследования влияния перемешивающей решетки на течение теплоносителя использовалась схема № 1, для исследования влияния дистанционирующей решетки – схема № 2.

Поперечное сечение экспериментальной модели разбивалось на элементарные ячейки, каждой из которых присваивался свой номер. Трассер через впускной зонд с постоянным расходом подавался в характерную ячейку, после чего отслеживалось его распространение по длине и в поперечном сечении экспериментальной модели.

Процесс межъячейкового массопереноса за перемешивающей решеткой исследовался в трех характерных областях – область стандартных ячеек центральной части ТВСА–12PLUS, уголковая область ТВСА–12PLUS и зазор между соседними топливными кассетами. Измерение концентрации трассера за перемешивающей решеткой по ходу движения потока производилось в каждой ячейке в нескольких сечениях по длине экспериментальной модели.

Исследования гидродинамических характеристик потока за дистанционирующей решеткой заключались в изучении распределения аксиальных составляющих скоростей теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели в зависимости от вида затеснения проходного сечения. Особенности конструкции дистанционирующей решетки приводят к тому, что ячейки экспериментальной модели можно разделить на два типа (рис. 4). В ячейках первого типа пружинистые элементы дистанционирующей решетки затесняют центр элементарной ячейки, в ячейках второго типа центр ячейки остается свободным.

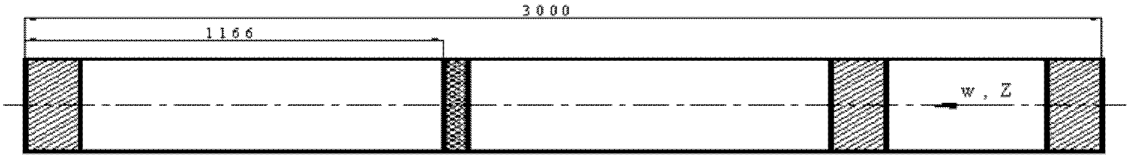


Схема №1

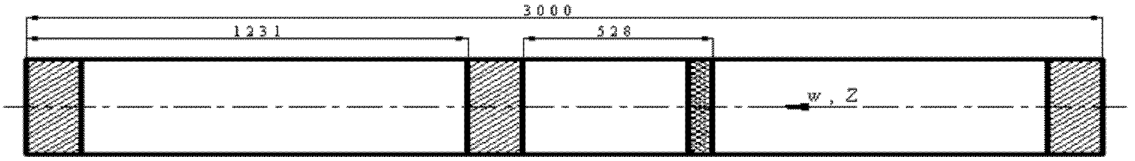


Схема №2

– *Дистанционирующая решетка* – *Перемешивающая решетка*

Рис. 1. Схемы расположения перемешивающей и дистанционирующих решеток в экспериментальных моделях

Методика исследований влияния дистанционирующей решетки на эффективность работы перемешивающей решетки заключалась в следующем. Трассер подавался до перемешивающей решетки, за которой по ходу движения установлена дистанционирующая решетка. Рассматривалось распределение трассера за дистанционирующей решеткой в модели и проводилось сравнение глубины распространения трассера при её наличии и отсутствии за перемешивающей решеткой.

Представительность экспериментальных исследований

Важным этапом любого экспериментального исследования, в котором осуществляется моделирование какого-либо процесса, является подтверждение его представительности. Согласно теории гидродинамического подобия профиль относительной скорости $w_{лок}/w_{ср.расх}$ ($W_{лок}$ – локальная скорость потока в заданной точке, $W_{ср.расх}$ – средняя скорость потока через экспериментальную модель) в зоне автомодельного течения остается практически неизменным [3]. Следовательно, при моделировании воздухом течения теплоносителя в активной зоне реактора, исследования необходимо проводить в области автомодельного течения. Это позволит получить экспериментальные данные, которые можно будет перенести на натурные условия течения теплоносителя.

Был проведен ряд исследований, направленных на изучение режимов течения потока в экспериментальной модели. Основная цель этих исследований – поиск нижней границы зоны автомодельности. Было установлено, что область автомодельного течения теплоносителя в экспериментальной модели начинается при достижении числа Re = 55000 (рис. 3). Все исследования проводились на участке стабилизированного течения при числе Re = 80090 и, следовательно, полученные данные могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя в ТВС.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам исследований влияния перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамические и массообменные характеристики потока теплоносителя в ТВСА–12PLUS были сделаны следующие выводы:

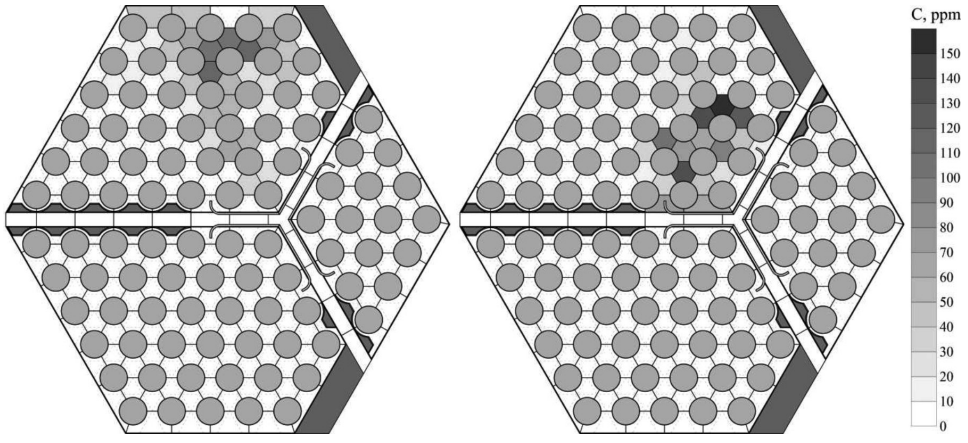
1) за дефлекторами перемешивающей решетки создаются направленные конвективные течения, обусловленные соответствующим расположением дефлекторов;

2) затухание возмущений массообменных характеристик, вызванных воздействием перемешивающей решетки на поток теплоносителя, происходит на расстоянии $\Delta l/d_г = 17 \div 18$ от решетки (Δl – расстояние от решетки до точки измерения, $d_г$ – гидравлический диаметр);

3) трассер на расстоянии $\Delta l/d_г = 22$ от перемешивающей решетки в центральной части распространился в 28 ячеек, а в периферийной области в 21 ячейку (рис. 2). Это позволяет сделать вывод о том, что интенсивность процессов межъячеечного массообмена в центральной области ТВСА–12PLUS и уголковой области близки;

4) глубина распространения трассера из межкассетного зазора в соседние ТВСА–12PLUS на расстоянии $\Delta l/d_г = 22$ от перемешивающей решетки охватывает область двух периферийных рядов твэлов каждой из кассеты. Это свидетельствует о хорошем межкассетном перемешивании теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS (рис. 3).

5) зубчатый край обода решетки создает направленное течение теплоносителя, причем интенсивность межъячеечного массообмена выше в тех ячейках, где его ориентация совпадает с ориентацией турбулизирующих дефлекторов.



а) *б)*

Рис. 2. Распределение концентрации трассера в экспериментальной модели при подаче трассера в стандартную ячейку центральной части ТВСА–12PLUS(а), стандартную ячейку уголковой области ТВСА–12PLUS (б)

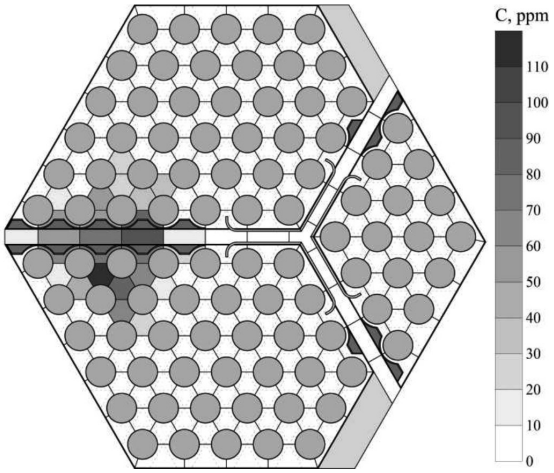


Рис. 3. Распределение концентрации трассера в экспериментальной модели при подаче трассера межкассетный зазор ($\overline{w}$ = 28,16 м/с, Re = 80100)

По результатам исследований влияния дистанционирующей решетки на гидродинамику потока было установлено:

1) в стандартных ячейках, центр которых затесняется дистанционирующей решеткой, отношение аксиальной составляющей скорости W_Z к среднерасходной скорости через модель $W_{СР.РАСХ.}$ на 5-10% меньше чем в ячейках, в которых центр не затеснен;

2) трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой на расстоянии $\Delta l/d_г = 11$ распространился в 16 ячеек. За дистанционирующей решеткой максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой и далее по длине не переходит в другие ячейки. Это говорит о том, что воздействие дефлекторов на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством турбулентной диффузии. Таким образом, можно сделать вывод о том, что дистанционирующая решетка, расположенная после перемешивающей решетки, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой (рис. 4–5). Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

3) установка дистанционирующих решеток за перемешивающими решетками по ходу движения теплоносителя нецелесообразна на расстояниях, меньших, чем длина затухания возмущений массообменных характеристик, вызванных перемешивающей решеткой.

Заключение

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВСА реактора ВВЭР, позволил выявить картину течения потока за перемешивающей и дистанционирующей решетками в ТВСА–12PLUS и сделать следующие выводы:

1) за дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное, постепенно затухающее, движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов;

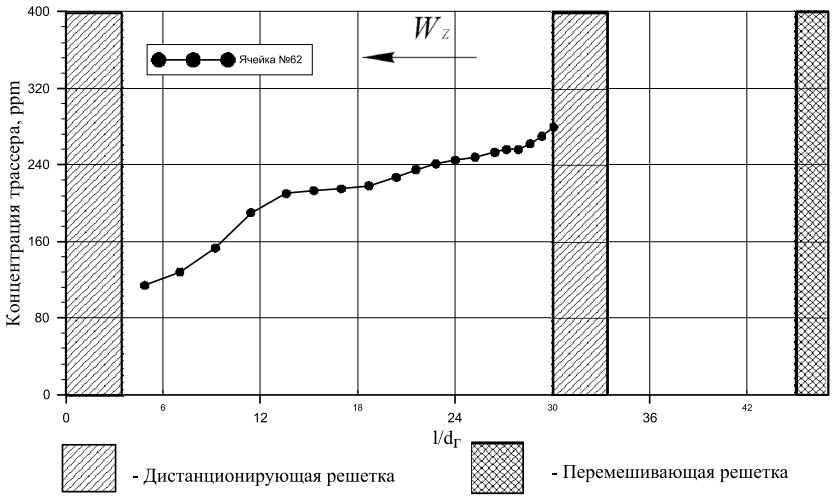


Рис. 4. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой в ячейке № 62 ($\overline{w}$ = 28,25 м/с, Re = 80100)

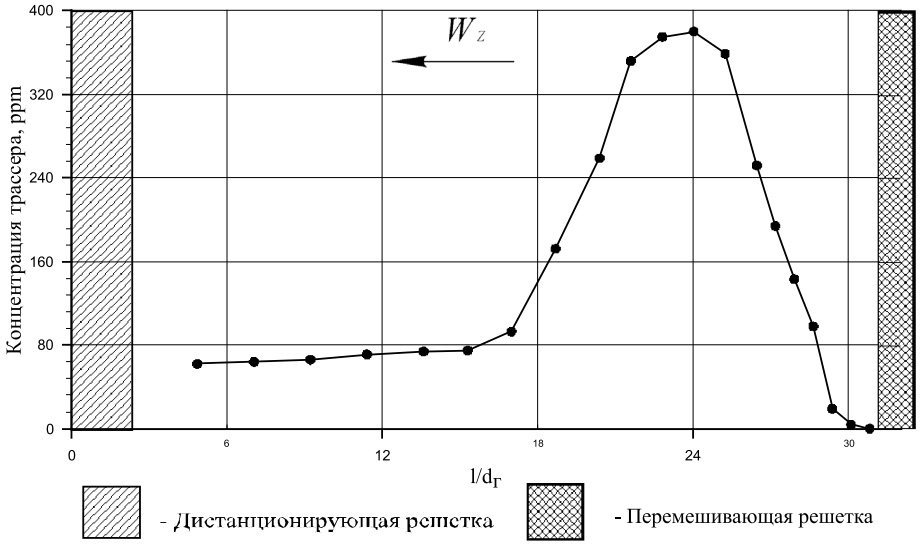


Рис. 5. Распределение концентрации трассера за перемешивающей решеткой в ячейке № 62

2) глубина распространения трассера в стандартных ячейках центальной и уголковой областей свидетельствует о том, что интенсивность межъячеечного массообмена в этих областях одинакова;

3) в ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатого края обода решетки совпадает, интенсивность межъячеечного массопереноса возрастает;

4) в стандартных ячейках, где пружинистые элементы дистанционирующей решетки затесняют центр, отношение осевой скорости к среднерасходной скорости теплоносителя через экспериментальную модель на 5–10 % меньше, чем в ячейках, где пружинистые элементы формируют свободное пространство в центре ячейки;

5) наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов теплообмена.

Полученные данные приняты в АО «ОКБМ Африкантов» для практического использования. Массив данных, полученных при проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов, используется при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР–1000 с ТВСА–12PLUS.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпускными реакторами на тепловых нейтронах: учебник – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.

2. 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. – Том 113, вып. 5, С. 252–256.

3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Изд. 2-ое доп. и перераб. – М. Высшая школа, 1973.