УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЛАСТИНЧАТОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ В ТВСА РЕАКТОРА ВБЭР

Андреев В.В., Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Полозкова Е.Н., Пронин 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 теплоносителя за перемешивающей решеткой в ТВСА реактора ВБЭР. Исследования проводились моделированием течения потока в ТВСА на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. Целью работы являлось определение влияния перемешивающей решетки на гидродинамические характеристики потока в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала. По результатам проведенных исследований было получено распределение локальных полей скорости за дефлекторами перемешивающей решетки, распределение расходов теплоносителя и концентрации трассера по ячейкам экспериментальной модели. Полученные данные позволили определить закономерности и выявить особенности течения теплоносителя за перемешивающей решеткой ТВСА.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающие решетки, направляющий канал, гидродинамика, тепломассоперенос

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF INFLUENCE MIXING GRID «RUN ROW UPON ROW»-TYPE ON HYDRODYNAMICS COOLANT FLOW IN FA VBER

Andreev V.V., Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Polozkova E.N., Pronin 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 of coolant behind MG in FA VBER have been presented in the article. The investigations were carried out on an aerodynamic rig using the admixture diffusion method by means of pneumometric probe. The aim of researchers was to determine influence of MG on hydrodynamic characteristics of flow in the area of standard cells and in the area of guide channel. According to results of investigations local velocity fields distribution behind MG, distribution of coolant flow and tracer concentration in experimental model have been received. The obtained results allowed to reveal the trends and features of coolant flow behind MG FA.

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

В АО «ОКБМ Африкантов» разработан проект атомной станции средней мощности с реактором типа ВБЭР. В качестве прототипа реактора принята судовая реакторная установка, зарекомендовавшая себя длительной безаварийной эксплуатацией на российских судах и кораблях. Внедрение таких станций в энергосистему позволит не только обеспечить тепловой и электрической энергией регионы, не имеющих централизованного энергоснабжения, но и заменить со временем устаревшие энергоблоки, работающие на органическом топливе.

В качестве топлива в активной зоне реактора предполагается использовать бесчехловые ТВСА каркасной конструкции с интенсификаторами теплообмена – перемешивающими решетками типа «порядная прогонка». Силовой каркас ТВС, обеспечивающий жесткость и прочность конструкции, составлен из дистанционирующих решеток, приваренных к уголкам жесткости. Частью силового каркаса являются также направляющие каналы, которые, помимо размещения в них органов системы управления и защиты, воспринимают нагрузки при транспортно-технологических операциях [1]. Применение перемешивающих решеток в ТВС позволяет дополнительно турбулизировать поток в пределах отдельных ячеек и тем самым повысить запас до кризиса теплоотдачи.

Для обоснования теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов ВБЭР с ТВСА необходимо определить влияние перемешивающей решетки на поток теплоносителя. Ввиду особенностей конструкции решетки в поперечном сечении кассеты можно выделить области двух типов – область стандартных ячеек и область направляющих каналов. Различие между ними заключается в том, что ячейки около направляющих каналов имеют меньшее

проходное сечение и в этих ячейках отсутствуют турбулизирующие дефлектора перемешивающей решетки.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева был проведен комплекс исследований, направленных на изучение особенностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой в характерных областях ТВСА реактора ВБЭР.

Материалы и методы исследования

Экспериментальный стенд

Исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде на масштабных моделях фрагментов ТВСА. Экспериментальный стенд представляет собой разомкнутый контур. Циркуляция воздуха в экспериментальной установке осуществляется за счет работы вентилятора высокого давления. Для обеспечения постоянного давления на входе в экспериментальную модель и сглаживания пульсаций расхода воздуха, возникающих при работе вентилятора, в состав стенда включена ресиверная емкость. Поток воздуха из ресиверной емкости, пройдя участок стабилизации, попадает в экспериментальную модель, после которой выбрасывается в атмосферу. Для проведения исследований было изготовлено две модели, выполненные в полном геометрическом подобии с натурной ТВСА. Первая модель представляет собой фрагмент ТВСА, который включает в себя пояса дистанционирующих решеток, пояс перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» и имитаторы твэлов. Вторая модель включает в себя помимо поясов дистанционирующих решеток, пояса перемешивающей решетки и имитаторов твэлов один имитатор направляющего канала.

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» представляет собой набор пластин, на верхних кромках которых расположены турбулизирующие дефлектора. Конструкция данной решетки позволяет организовать поперечные конвективные течения теплоносителя по рядам ячеек ТВС, причем в соседних рядах эти направления противоположны.

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока заключались в измерении модуля вектора скорости в каждой ячейке и углов набегания потока. Исследование межъячеечного массообмена потока 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 [2].

Измерительный комплекс

При проведении исследований использовались следующие средства измерения: пятиканальный пневмометрический зонд, трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением.

Для измерения направления и вектора скорости потока теплоносителя использовался пятиканальный пневмометрический зонд. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X,Y, Z не превышали 7 % [3].

Концентрация пропана в газо-воздушной смеси определялась при помощи газоанализатор. Данный газоанализатор позволяет измерять концентрацию углеводородов до 10000 ppm, при этом если концентрация газа находится в диапазоне 0–1000 ppm, то погрешность измерения составляет ± 15 ppm, при значении концентрации 1000–10000 ppm погрешность составляет ± 1,5 % [4].

Методика исследований

Исследования локальных гидродинамических характеристик заключались в измерении локальных полей скорости потока за перемешивающей решеткой и определении расходов теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели. Поле скорости измерялось пятиканальным пневмометрическим зондом в стандартных ячейках, область измерения включала в себя ячейки двух соседних рядов твэлов.

При исследовании процессов межъячеечного массопереноса потока трассер подавался в ячейку инжекции до перемешивающей решетки. Ячейка инжекции трассера была выбрана таким образом, чтобы при проведении исследований была обеспечена возможность изучения межъячеечного перемешивания теплоносителя как в области стандартных ячеек, так и в районе направляющего канала. Количество подаваемого пропана выбрано таким образом, чтобы скорость трассера при выходе из впускного зонда была равна скорости потока. Таким образом, введение трассера в экспериментальную модель не приводит к изменению профиля скорости в ячейке инжекции. Отбор газо-воздушной смеси из потока производился при помощи отборного зонда, по которому он направлялся в газоанализатор для определения значения концентрации пропана.

Представительность экспериментальных исследований

Для обеспечения возможности применения полученных опытных данных при расчетах штатного устройства необходимо подтверждение представительности экспериментальных исследований. 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 [5]. 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. 1). Все исследования проводились на участке стабилизированного течения при числе Re = 101000 и, следовательно, полученные данные могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя в ТВС.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой максимальное значение поперечной скорости на-

блюдается сразу за решеткой и составляет 40 % от аксиальной. Необходимо отметить, что на расстоянии $\Delta l/d_г \approx 3$ (Δl – расстояние до перемешивающей решетки, $d_г$ – гидравлический диаметр) за перемешивающей решеткой происходит резкое снижение поперечных скоростей, которые уже не превышают 25 % от аксиальной. При дальнейшем удалении от решетки затухание поперечных скоростей замедляется (рис. 2). Было выявлено, что в межъячейковом зазоре, где дефлектора направлены в противоположные стороны по отношению друг к другу, наблюдается вихревой характер движения, который имеет протяженность $\Delta l/d_г \approx 3$.

При исследовании процессов межъячеечного массопереноса было установлено, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой организованы направленные поперечные конвективные течения теплоносителя. Основной расход трассера перемещается из ячейки в ячейку в соответствии с ориентацией турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 3).

Анализ распределения трассера в экспериментальных моделях позволил сделать заключение, что интенсивность массообменных процессов в районе направляющего канала ниже, чем в области стандартных ячеек. Так, на расстоянии $\Delta l/d_г = 25$ от перемешивающей решетки в модели без направляющего канала трассер распространился в 17 ячеек, а в модели с направляющим каналом в 9 ячеек (рис. 4).

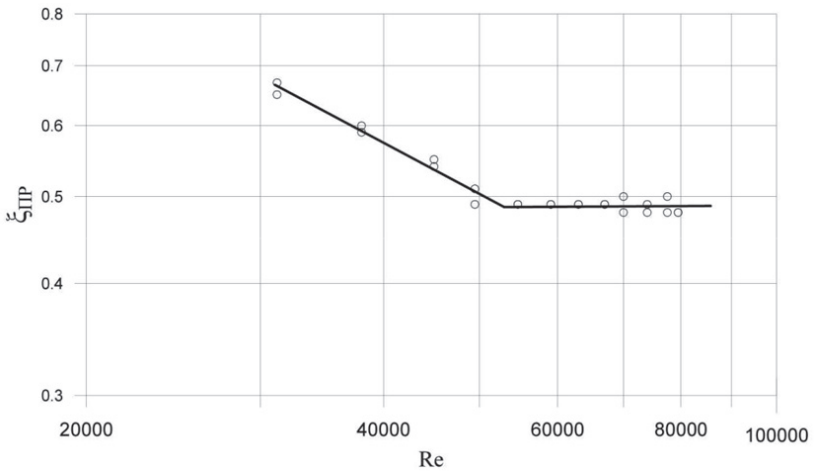


Рис. 1. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» от числа Re

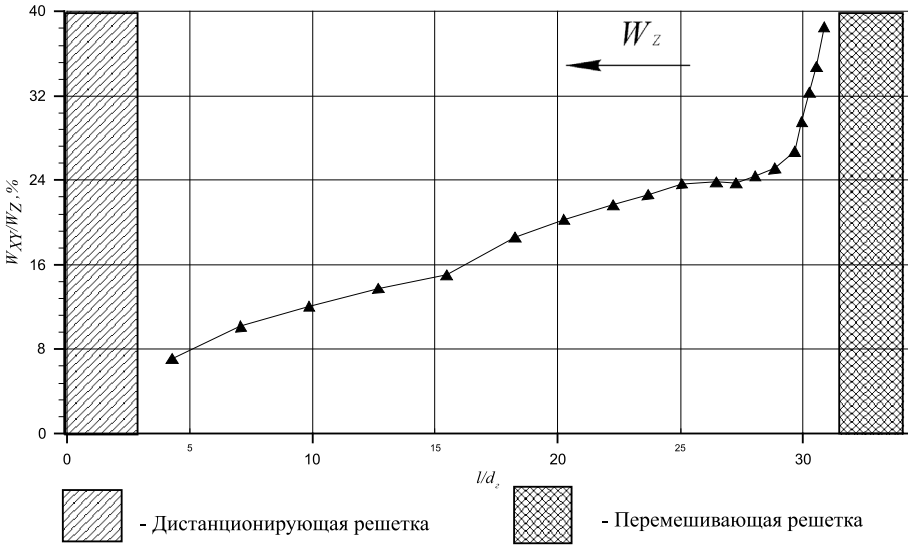


Рис. 2. Распределение поперечной скорости по длине модели за перемешивающей решеткой «порядная прогонка» в области стандартных ячеек (Re = 101000, $w_{ср.расх}$ = 37,5 м/с)

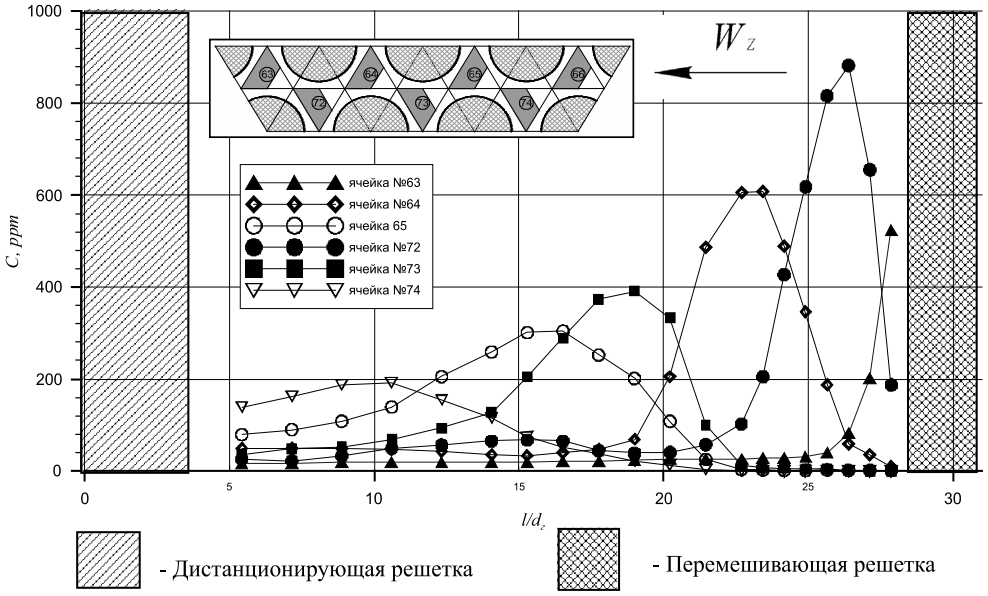
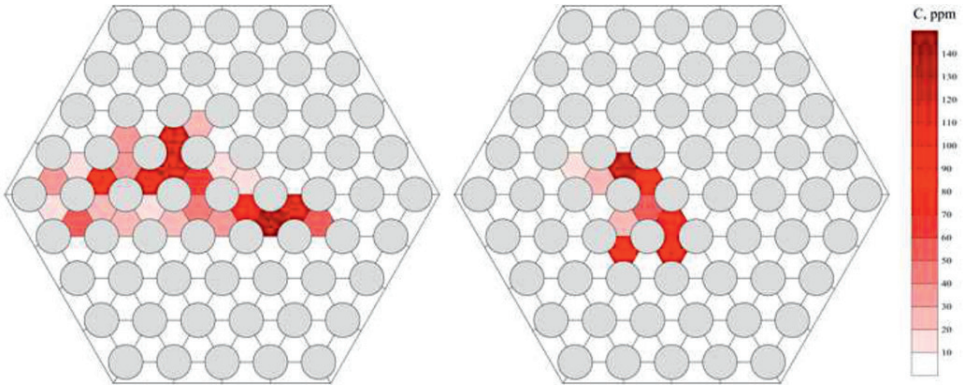


Рис. 3. График распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели за перемешивающей решеткой в модели без направляющих каналов (Re = 101000, $w_{ср.расх}$ = 37,5 м/с)



а) *б)*

Рис. 4. Распределение трассера на расстоянии $\Delta l/d_г$ = 25 от перемешивающей решетки в модели без направляющего канала (а) и в модели с направляющим каналом (б) (Re = 101000, $w_{ср.расх}$ = 37,5 м/с)

Наличие в конструкции ТВСА направляющих каналов приводит к тому, что направленное поперечное конвективное течение теплоносителя, вызванные воздействием перемешивающей решетки, нарушается. Поток теплоносителя, попавший из стандартных ячеек в область направляющего канала, разделяется на две равные части. Одна часть продолжает движение в исходном направлении. Вторая часть, попав в соседний ряд твэлов, начинает перемещаться в противоположном направлении согласно ориентации турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 5).

Анализ распределения скоростей теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели позволил установить, что расход теплоносителя через ячейки, прилегающие к НК, на 25% меньше, чем через ячейки стандартной области.

Заключение

При анализе результатов экспериментальных исследований течения теплоносителя за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» для характерных областей ТВСА реактора ВБЭР было установлено, что:

1) непосредственно за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек поперечные скорости составляют 40% от аксиальной, причем на расстоянии $\Delta l/d_г \approx 5$ от решетки их значения уже не превышаю 25%. При дальнейшем удалении от решетки скорость затухания поперечных скоростей снижается;

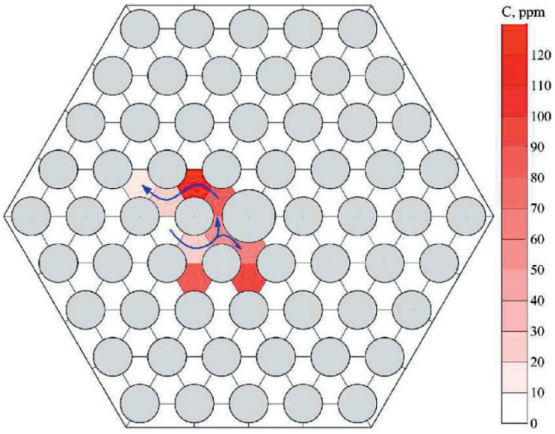


Рис. 5. Направления распространения трассера в области направляющего канала (Re = 101000, $w_{ср.расх}$ = 37,5 м/с)

2) в зазорах между соседними ячейками, в которых дефлектора направлены в противоположные стороны, происходит образование вихрей, исчезающих на расстоянии $\Delta l/d_г \approx 3$ от решетки;

3) перемешивание теплоносителя в области направляющего канала происходит хуже, чем в области стандартных ячеек ввиду отсутствия турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки;

4) в области направляющего канала происходит «разрушение» направленного конвективного течения теплоносителя, сформированного в стандартных ячейках под действием дефлекторов перемешивающей решетки.

На основании результатов экспериментальных исследований создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон ядерных реакторов с ТВСА. Полученные данные приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов».

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. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Самойлов О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками. – Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 20–27.

4. Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока – Известия ВУЗОВ Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 60–68.

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