

Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR

Дмитриев С. М., доктор техн. наук, Легчанов М. А., Хробостов А. Е., кандидаты техн. наук, Варенцов А. В., Доронков Д. В., Добров А. А., аспиранты

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках реактора PWR.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, направляющий канал, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, перемешивающая решетка.

Стратегическая задача Госкорпорации «Росатом» и Топливной компании «ТВЭЛ» — выход на западный рынок ядерного топлива. Для этого в ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены разработки тепловыделяющих сборок ТВС-КВАДРАТ для реакторов типа PWR, конкурентоспособных с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности [1]. В большинстве ТВС используются перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР), оказывающие существенное влияние на теплогидравлику потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Данные устройства предназначены для выравнивания температур (энтальпий) по сечению сборок, улучшения ситуации в наиболее напряженных ячейках ТВС, повышения запасов до кризиса теплоотдачи и др. Это достигается использованием в решетках лопаток, дефлекторов потока и других элементов для перемешивания теплоносителя в поперечном сечении ТВС. Однако наличие подобных элементов может привести к заметному повышению гидравлического сопротивления самой сборки, что нежелательно. Поэтому для создания оптимальной конструкции решетки требуется поиск вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Особое внимание с точки зрения гидродинамики и массообмена следует уделить затесненным зонам кассеты, например, периферийным ячейкам или областям, прилежащим к направляющим каналам (НК).

Для обоснования теплотехнической надежности особенности конструкций ПДР указанных реакторов требуют детального изучения и анализа локальной гидродинамики и мас-

сообмена потока теплоносителя в их активной зоне.

Экспериментальный стенд

Исследования локальных характеристик гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя проводили на аэродинамическом стенде (рис. 1) методом диффузии примесей [2]. Принцип экспериментальных исследований заключался в том, что поток воздуха с помощью радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, проходил через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем — через модель и выбрасывался в атмосферу. Трассер подавался через впускной зонд в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка, после чего отборным зондом за исследуемым поясом решетки проводился отбор газовой смеси для анализа распределения концентрации трассера по длине и поперечному сечению модели.

Экспериментальная модель (длиной 3 м), представляющая собой фрагмент реактора типа PWR и выполненная с коэффициентом геометрического подобия $K_r = 4,2$, состоит из квадратного чехла, 45 цилиндрических твэлов-имитаторов, четырех имитаторов НК, двух поясов пластинчатых дистанционирующих решеток и пояса ПДР (рис. 2) — квадратной пластинчатой решетки, набранной из взаимно-перпендикулярных пластин. Верхние кромки последних снабжены дефлекторами таким образом, что на каждый твэл приходится по два диагонально расположенных дефлектора, что улучшает перемешивание потока теплоносителя [2].

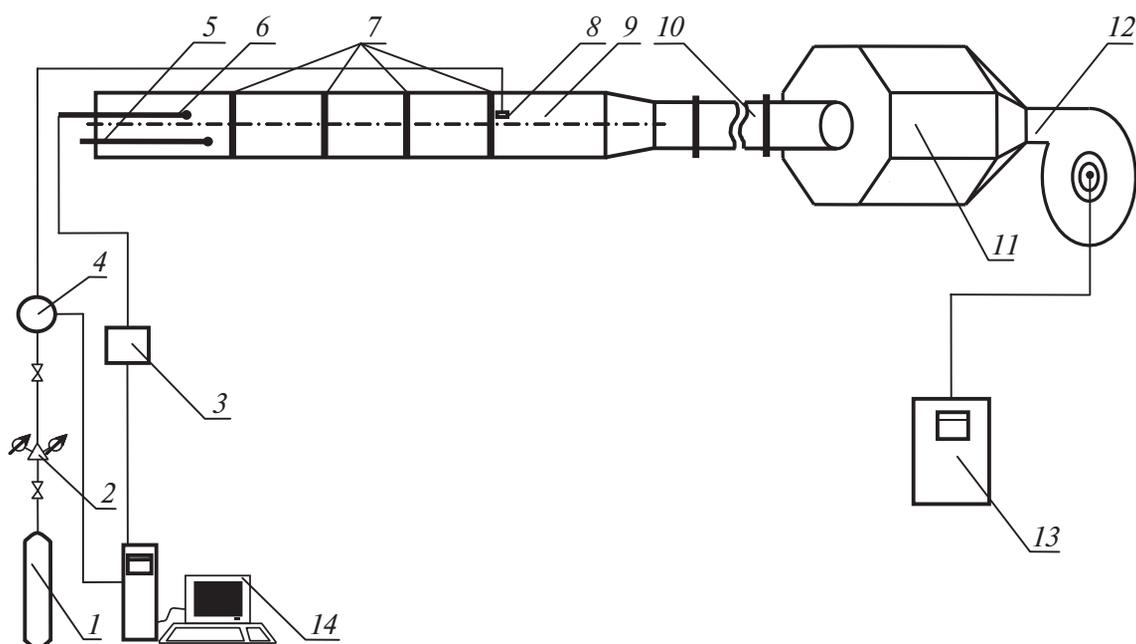


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — газовый баллон; 2 — редуктор; 3 — модульный газоанализатор; 4 — регулятор расхода газа; 5 — пятиканальный пневмометрический зонд; 6 — отборный зонд; 7 — статические отборы; 8 — устройство ввода трассера в ячейку экспериментальной модели (ЭМ); 9 — экспериментальная модель; 10 — успокоительный участок; 11 — буферная емкость; 12 — вентилятор высокого давления; 13 — преобразователь частоты; 14 — ЭВМ



Рис. 2. Пояс перемешивающей дистанционирующей решетки

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят газоанализатор, регулятор расхода газа, отборный зонд в виде трубки Пито — Прандтля (одновременно выполняющий функцию

транспортного газопровода в газоанализатор), а также ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Концентрацию углеводородов C_nH_m в газозвушной смеси измеряли с помощью газоанализатора АДК-03Р, принцип работы которого основан на измерении поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций — $0 \div 10\,000$ ppm, при этом погрешности измерения с учетом индивидуальной градуировки равны ± 5 ppm (для диапазона $0 \div 1000$ ppm) и $\pm 1,5\%$ (для диапазона $1000 \div 10\,000$ ppm). Значение $10\,000$ ppm соответствует 1 объемному проценту газа трассера в газозвушной смеси.

Для поддержания заданного расхода газа использовали массовый расходомер EL-FLOW, позволяющий измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0 до 5 л/мин с погрешностью не более 0,5 %.

Методика проводимых исследований

Метод трассера основан на регистрации поперечного потока массы некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т. д.). В качестве трассера применяли газ пропан, обладающий наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой

и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена на экспериментальном стенде заключалась в следующем:

поперечное сечение ЭМ разбили на ячейки, каждой из которых присвоили свой индивидуальный порядковый номер (рис. 3);

газовый трассер через впускной зонд подавали в стандартную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда измеряли концентрацию трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за поясом ПДР в характерных сечениях по длине ЭМ;

по полученным данным строили графики и картограммы зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ

Важным этапом экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. В активной зоне реактора PWR числа Рейнольдса достигают нескольких сотен тысяч, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в этой зоне моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, то в области автомодельности профиль относительной скорости ($W_{лок}/W_{ср,расх}$) остается неизменным. Следовательно, исследова-

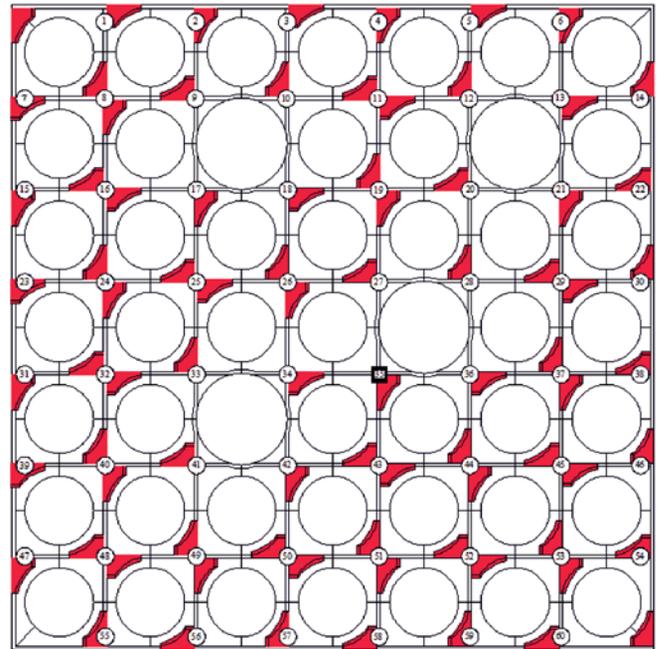


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

дование в зоне автомодельности позволяют перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС. Экспериментальные исследования распределения концентрации трассера в характерных зонах ТВС-КВАДРАТ с направляющими каналами при постановке пояса перемешивающей дистанционирующей решетки проводили при $Re = 101\,200$. По полученным данным построены графики распределения концентрации трассера и картограммы по длине экспериментальной модели для характерных зон в поперечном сечении при постановке поясов перемешивающих решеток.

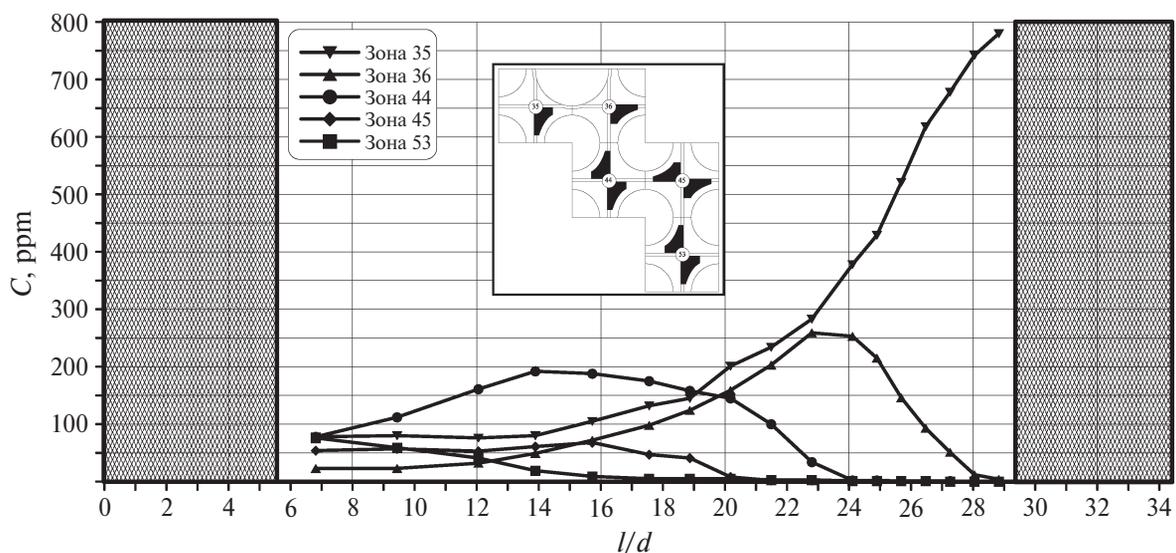


Рис. 4. Графики распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели

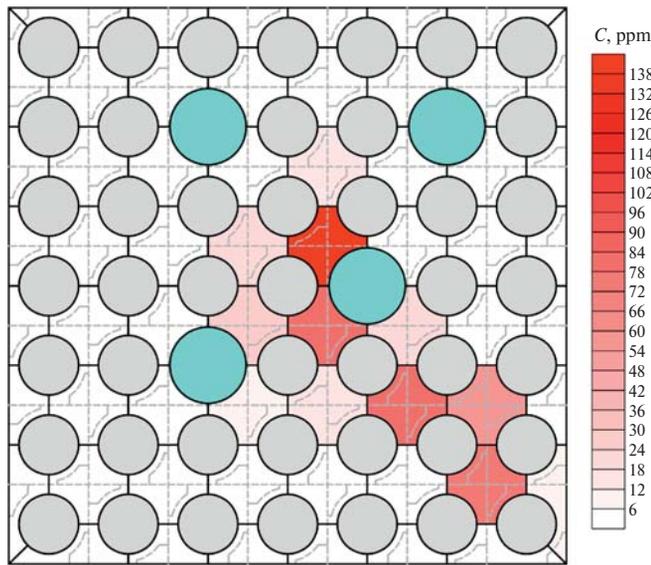


Рис. 5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели

Результаты рассмотрения изменений концентрации трассера из зоны инъекции № 35 в соседние ячейки (рис. 4) показывают, что за дефлекторами ПДР происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим их расположением. На рис. 5 представлено распространение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели.

Исследования локальных полей скорости, проведенные в 16 ячейках, прилежащих к направляющим каналам, и в 2 стандартных ячейках, позволили определить распределение расхода теплоносителя в данной области (рис. 6, а и б). Оно обусловлено различием в площадях проходного сечения ячеек, прилежащих к НК, по сравнению с площадью проходного сечения стандартной ячейки ТВС-КВАДРАТ и отсутствием дефлекторов в данной области.

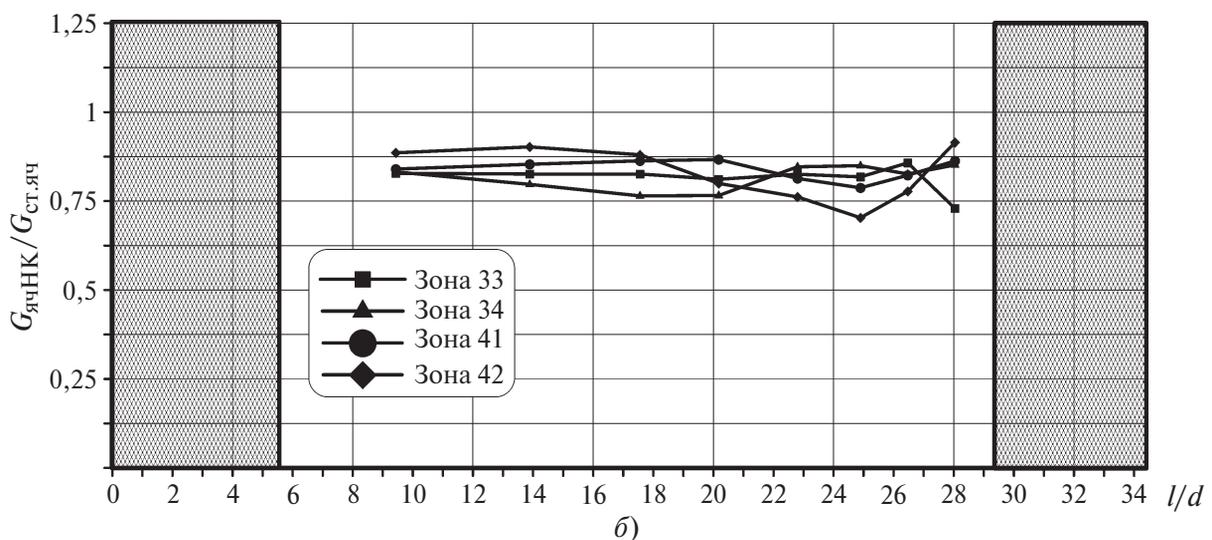
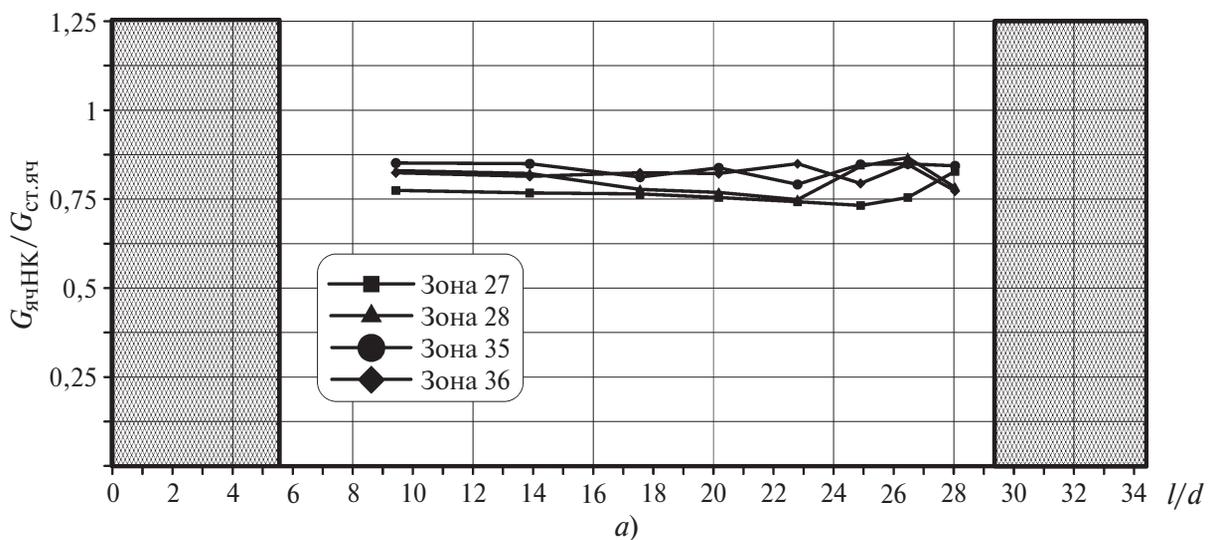


Рис. 6. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки № 27, 28, 35, 36 (а) и № 33, 34, 41, 42 (б), прилежащие к НК, и стандартные ячейки ($G_{\text{яч НК}}/G_{\text{ст.яч}}$)

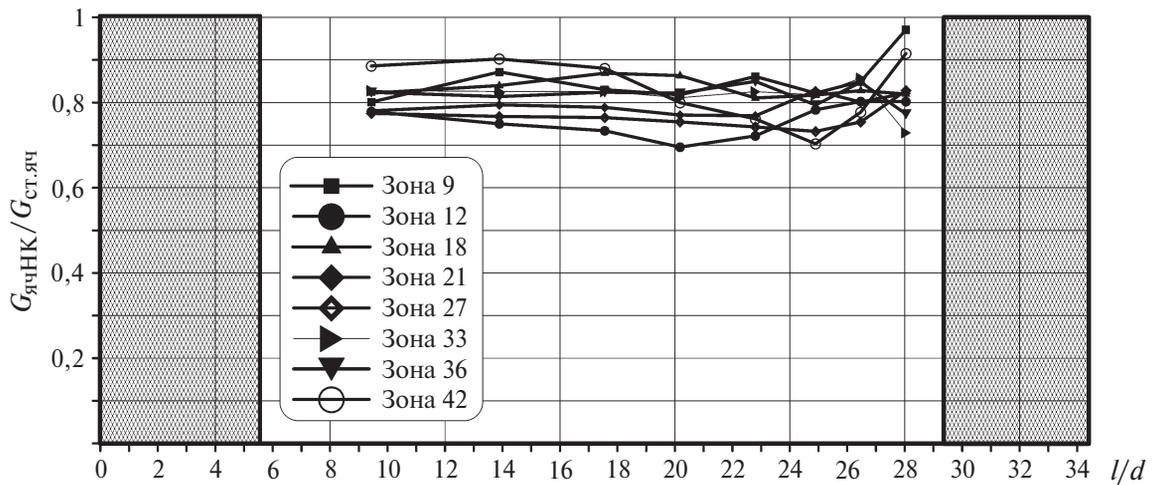


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки (где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки), прилежащие к НК, и стандартные ячейки ($G_{\text{яч НК}}/G_{\text{ст.яч}}$)

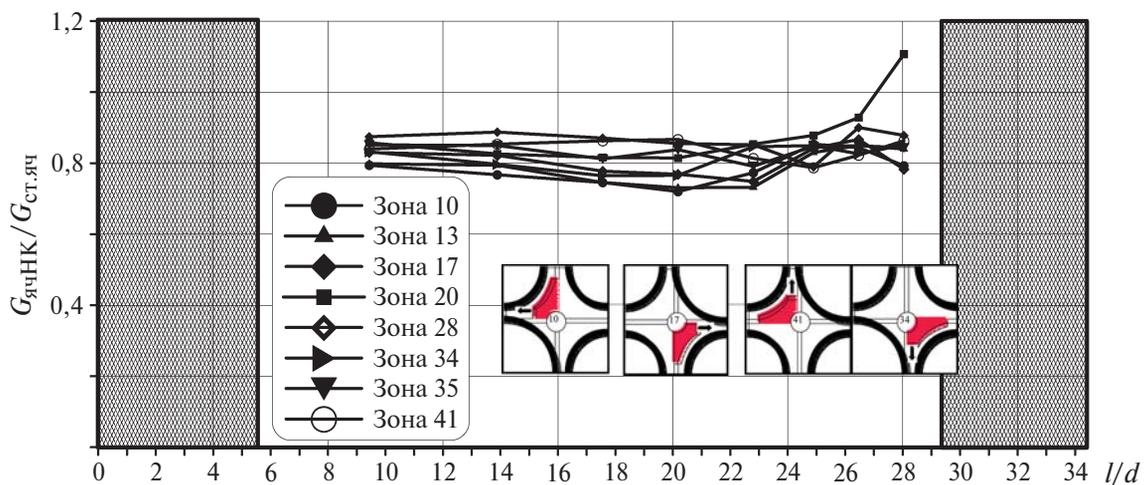


Рис. 8. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки (где дефлекторы направляют поток в затесненную область), прилежащие к НК, и стандартные ячейки ($G_{\text{яч НК}}/G_{\text{ст.яч}}$)

Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. В случае, когда дефлекторы в ячейках вокруг НК (рис. 7) направляют поток в стандартные ячейки, расход теплоносителя через эти ячейки изменяется на 20 % по сравнению с расходом через стандартную ячейку. Для ячеек (рис. 8), где дефлекторы направляют теплоноситель в область НК, его расход через эти ячейки изменяется на 15 % по сравнению с расходом через стандартную ячейку.

Выводы

1. По результатам экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в

ЭМ выявлены основные общие закономерности движения потока теплоносителя за ПДР:

за дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов;

не весь поток теплоносителя движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большее значение за ПДР вследствие дополнительной турбулизации потока;

эффективное перемешивание трассера в поперечном сечении заканчивается на расстоянии $l/d \approx 17 \div 20$ после перемешивающей дистанционирующей решетки;

различия в проходных сечениях ячеек, прилежащих к направляющему каналу, и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ приводят к вытеснению части расхода в соседние ячейки на 15 – 20 %.

2. Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с ТВС-КВАДРАТ для реактора PWR с целью уменьшения консерватизма в расчетах теплотехнической надежности активных зон.

Список литературы

1. **Бородин С. С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR. — Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева, 2010, № 3.
2. **Бородин С. С.** Исследования локального массообмена теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при использовании перемешивающих решеток типа “порядная прогонка”. — Сб. тезисов докладов межведомственного семинара “Теплофизика-2008”, Обнинск, 2008.

legchanov@mail.ru

