

УДК 621.039

А.В. Варенцов¹, Д.В. Зяблицев¹, А.Н. Пронин¹, М.А. Легчанов¹, Д.Л. Шипов²

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ И МЕЖЪЯЧЕЙКОВОГО МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РАЙОНЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРОВ PWR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR.

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

Введение

Стратегической задачей для госкорпорации «Росатом» и топливной компании «ТВЭЛ» является выход на западный рынок ядерного топлива. Для этого в ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены разработки тепловыделяющихборок для реакторов типа PWR ТВС-КВАДРАТ, конкурентоспособных с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности [1].

В большинстве тепловыделяющихборок (ТВС) используются дистанционирующие и перемешивающие решетки, оказывающие существенное влияние на теплогидравлику потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора.

Важной задачей данных перемешивающих устройств является выравнивание температур (энтальпий) по сечениюборок, улучшение ситуации в наиболее напряженных ячейках ТВС, повышение запасов до кризиса теплоотдачи и др. Это достигается использованием в решетках лопаток, дефлекторов потока и других элементов, обеспечивающих перемешивание теплоносителя в поперечном сечении ТВС. Наличие подобных элементов может привести к заметному повышению гидравлического сопротивления самой сборки, что будет являться нежелательным фактом. Поэтому оптимальная конструкция решетки требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Отдельного внимания, с точки зрения гидродинамики и массообмена заслуживают затесненные зоны кассеты, например, периферийные ячейки или области, прилежащие к направляющим каналам (НК).

Для обоснования теплотехнической надежности, особенности конструкций перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) ТВС-КВАДРАТ требуют детального изучения и анализа локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в активной зоне реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Исследования локальных характеристик гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде (рис. 1) методом диффузии примесей [2]. Принцип проведения экспериментальных исследований заключался в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, двигался через расходомерное устройство и успокоительный участок, затем, пройдя через модель, выбрасывался в атмосферу. Трассер подавался через впускной зонд в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка, после чего отборным зон-

дом за исследуемым поясом решетки производился отбор газовой смеси для анализа распределения концентрации трассера по длине и поперечному сечению модели.

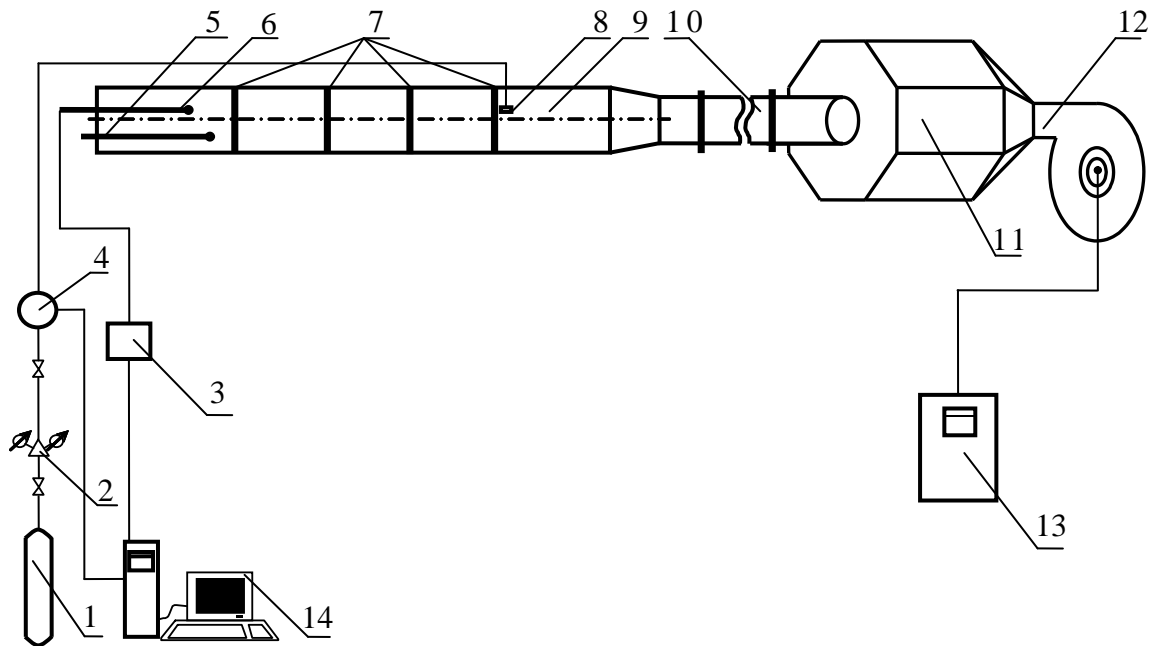


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

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 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

Экспериментальная модель (ЭМ), представляющая собой фрагмент ТВС-КВАДРАТ реактора типа PWR, выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_g = 4,2$, имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, 45 цилиндрических твэлов-имитаторов, четырех имитаторов направляющего канала, двух поясов пластинчатых дистанционирующих решеток, пояса перемешивающей дистанционирующей решетки.

Исследуемый пояс ПДР (рис. 2) представляет собой квадратную пластинчатую решетку, набранную из взаимно-перпендикулярных пластин. Верхние кромки пластин решетки снабжены дефлекторами таким образом, что на каждый твэл приходится по два дефлектора, расположенных диагонально, что улучшает перемешивание потока теплоносителя [2].

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, регулятор расхода газа, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор АДК-03Р, принцип работы которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует 1 объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси.

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0 до 5 л/мин. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

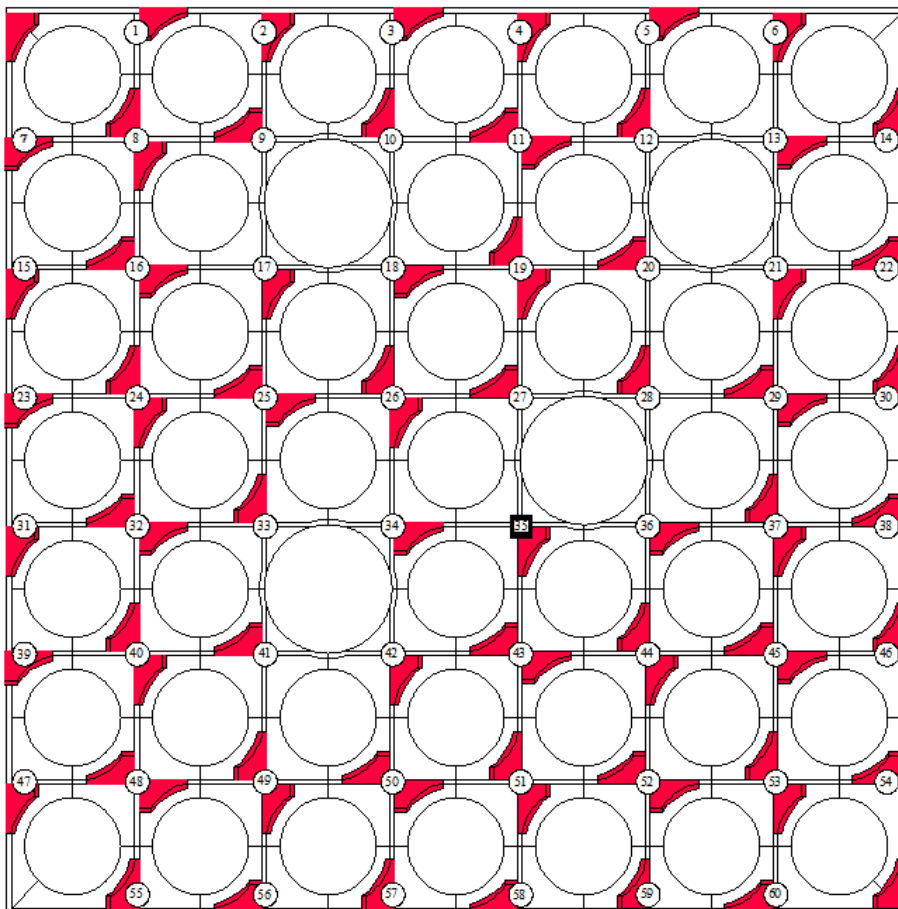


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

Методика проводимых исследований

Метод трассера основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве трассера использовался газ пропан, поскольку он обладает 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 экспериментальной модели было разбито на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 3);
- газовый трассер через впускной зонд подавался в стандартную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за поясом ПДР в характерных сечениях по длине ЭМ;
- по полученным данным строились 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 является подтверждение представительности проведенных экспериментальных исследований. В активной зоне реактора PWR числа Рейнольдса достигают нескольких сотен тысяч, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в активных зонах реактора PWR моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, то в области автомодельности профиль относительной скорости ($W_{лок}/W_{ср.расх}$) остается неизменным.

Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят 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 проводились при числе $Re=101200$.

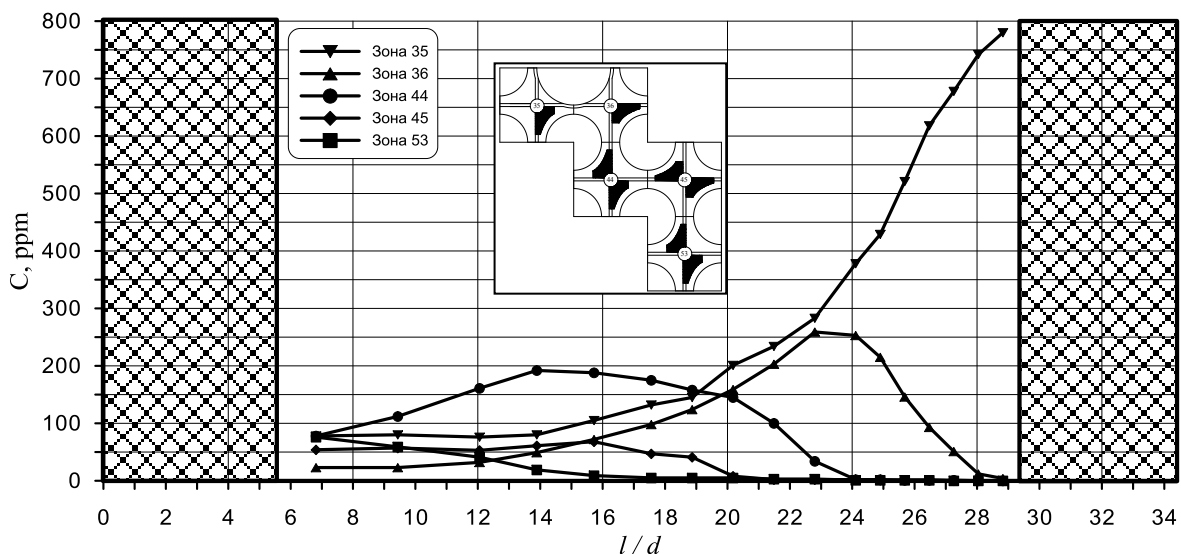


Рис. 4. Графики распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели

По полученным экспериментальным данным были построены графики распределения

концентрации трассера и картограммы по длине экспериментальной модели для характерных зон в поперечном сечении при постановке поясов перемешивающих решеток.

Рассмотрев, как изменяется концентрация трассера из зоны инъекции № 35 в соседние ячейки (рис. 4), можно отметить, что за дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

На рис. 5 представлено распространение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели.

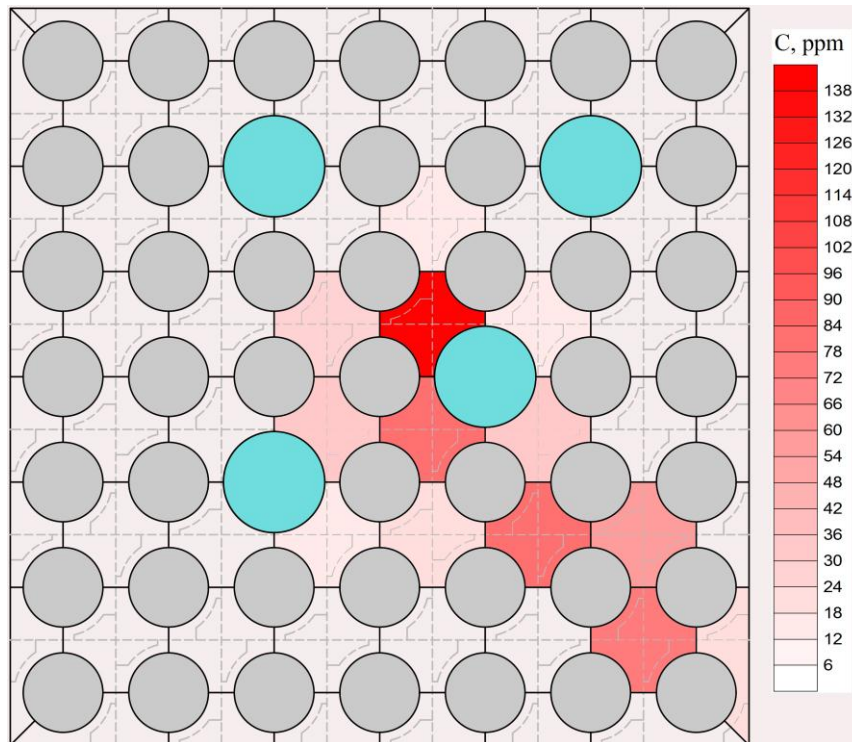


Рис. 5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели

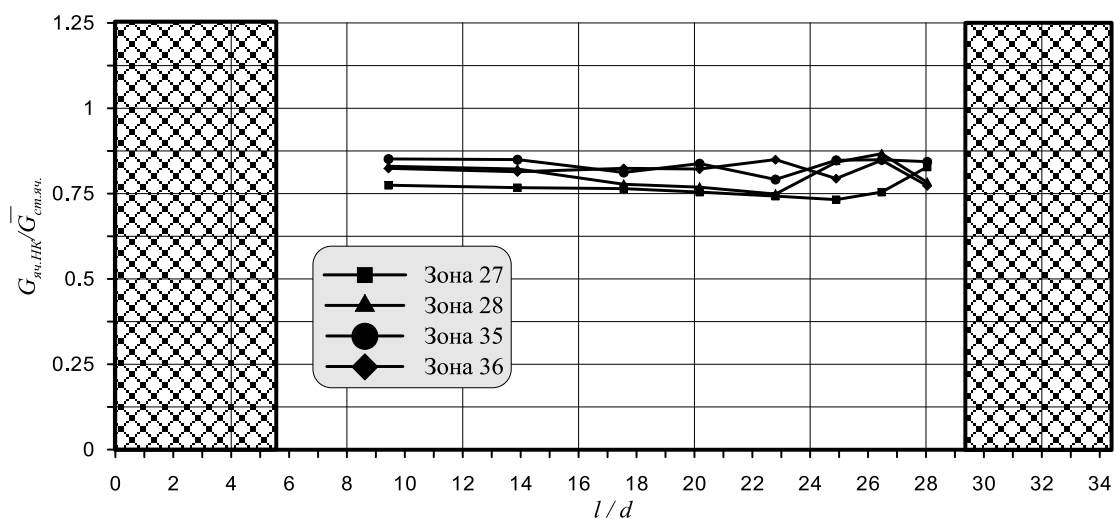


Рис. 6. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №№ 27, 28, 35, 36 прилегающие к НК к стандартным ячейкам

Экспериментальные исследования локальных полей скорости проводились в 16 ячейках прилежащих к направляющим каналам, и в двух стандартных ячейках, позволили определить распределение расхода теплоносителя в данной области (рис. 6, 7). 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.

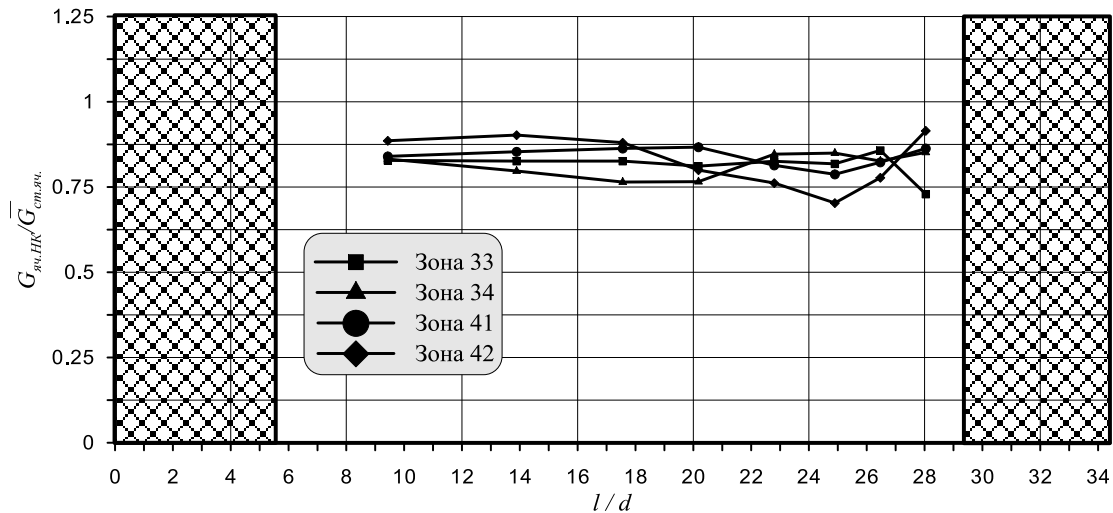


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №№ 33, 34, 41, 42 прилежащие к НК к стандартным ячейкам

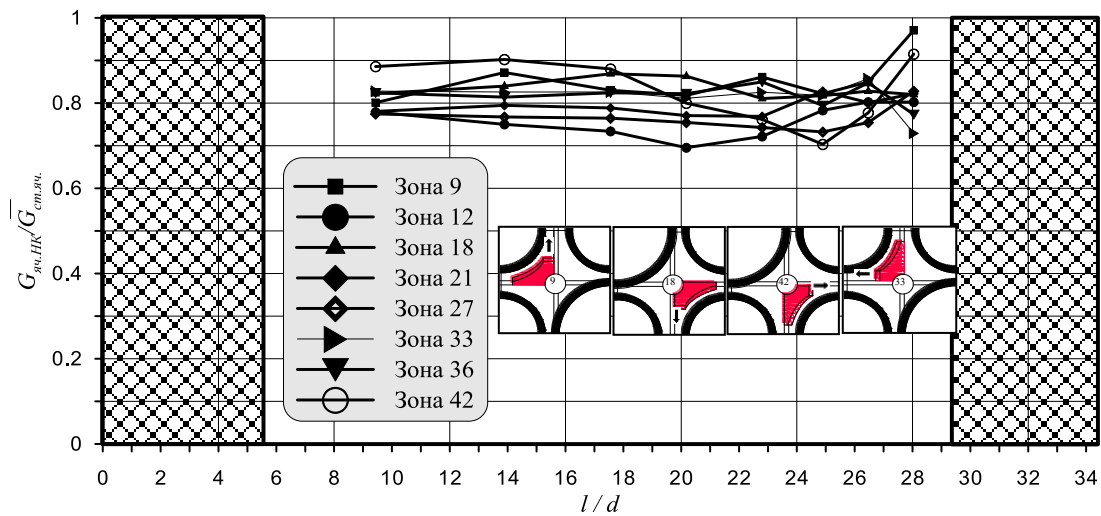


Рис. 8. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, где дефлектора направляют поток в стандартные ячейки, прилежащие к НК к стандартным ячейкам

Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК и стандартных ячейках ТВС-КВАДРАТ, приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. В случае, когда дефлектора в ячейках вокруг НК (рис. 8) направляют поток в стандартные ячейки, происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку. Для ячеек (рис. 9), где дефлектора направляют теплоноситель в область НК, происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 15% по сравнению с расходом через стандартную ячейку.

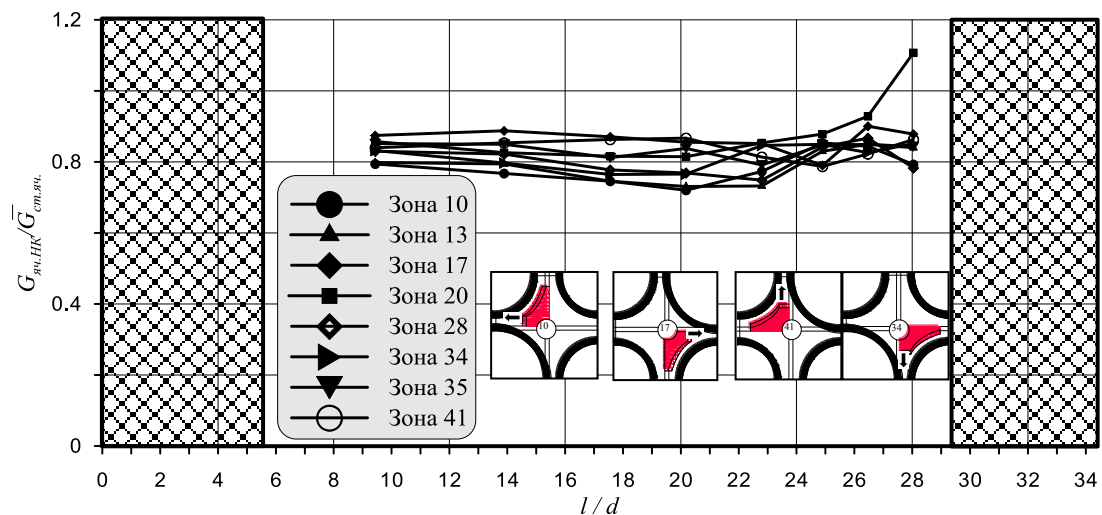


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, где дефлектора направляют поток в затесненную область, прилегающие к НК к стандартным ячейкам

Выводы

По результатам экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в ЭМ были выявлены основные общие закономерности движения потока теплоносителя за ПДР:

1. За дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

2. Экспериментально определено, что не весь поток теплоносителя движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей дистанционирующей решеткой, вследствие дополнительной турбулизации потока.

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

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

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

Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR / С.С. Бородин [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3. С. 106–112.
2. **Бородин, С.С.** Исследования локального массообмена теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при использовании перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» / С.С. Бородин [и др.] // Теплофизика-2008: сб. тезисов. – Обнинск, 2008. С. 24.

Дата поступления
в редакцию 06.11.2012

A.V. Varentsov¹, D.V. Zyablitsev¹, A.N. Pronin¹, M.A. Legchanov¹, D.L. Shipov²

INVESTIGATION OF LOCAL HYDRODYNAMICS AND INTERCELLULAR MASS TRANSFER AROUND GUIDE CHANNELS OF PWR REACTORS FUEL ASSEMBLIES

Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alexeev¹,
Joint stock company «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass transfer of heat carrier in the experimental model of PWR nuclear reactor fuel assembly.

Design/methodology/approach: For experimental study of local hydrodynamics and intercellular mass transfer characteristics of coolant in the PWR reactor FA the gas diffusion method was used.

Findings: According to the results of experimental studies of hydrodynamics and mass transfer in FA experimental model general patterns of coolant flow were revealed. The distance at which efficient mixing of tracer ends was determined.

Research limitations/ implications: This study is part of a series of experimental studies devoted to local hydrodynamics and mass transfer processes of coolant in fuel assemblies with mixing grids for PWR nuclear reactors.

Originality/value: The special databank was created on the base of the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes for calculation of PWR nuclear reactors thermotechnical reliability. The results of the research are now used by Join Stock Company OKBM Afrikantov.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics, mass transfer, spacer grid, mixing grid.