

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.С. Бородин, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК В ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТВСА-АЛЬФА РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реакторов типа ВВЭР с системой поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка».

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

Введение

Уровень развития современного реакторостроения в значительной мере зависит от гидродинамики и массообмена теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Необходимость исследования процессов массообмена и гидродинамики продиктована тем, что ядерные реакторы представляют собой высокоэнергонапряженные аппараты, в которых эти процессы проявляются в весьма сложной форме. Успешная эксплуатация реакторных установок типа ВВЭР во многом определяется полнотой и надежностью гидродинамического и теплофизического обоснования активной зоны при различных режимах работы ЯЭУ. В настоящее время становится актуальным вопрос о создании реакторных установок ВВЭР, работающих на более высоком уровне мощности. Для этого требуется улучшение теплогидравлических характеристик ТВС, а также одновременное снижение сопротивления самих тепловыделяющихборок. Данные характеристики во многом зависят от теплообменных процессов, происходящих в активных зонах водо-водяных реакторов.

В разработанной в ОАО «ОКБМ Африкантов» ТВСА-АЛЬФА для интенсификации массообмена применяются перемешивающие решетки (ПР), которые позволяют турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками. Одним из вариантов оптимизации конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР является применение системы ПР типа «порядная прогонка», которые устанавливаются с поворотом каждой решетки относительно предыдущей на угол 60° по часовой стрелке, изменяя тем самым направление движения теплоносителя.

В связи со сложностью математического описания течения потока теплоносителя в активных зонах ядерных реакторов необходимо проведение экспериментальных исследований на масштабных и полноразмерных моделях. С одной стороны, для обоснования теплотехнической надежности активных зон РУ типа ВВЭР с ТВСА с ПР необходимо определить влияние конструкции таких решеток на гидродинамику и массообмен теплоносителя. С другой – оптимальная конструкция ПР требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благо-

приятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде методом диффузии газового трассера на 57-стержневой модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство. Экспериментальная модель (ЭМ) (рис. 1) выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$ и состоит из шестигранного чехла, твэлов-имитаторов, поясов дистанционирующих решеток, двух поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка».

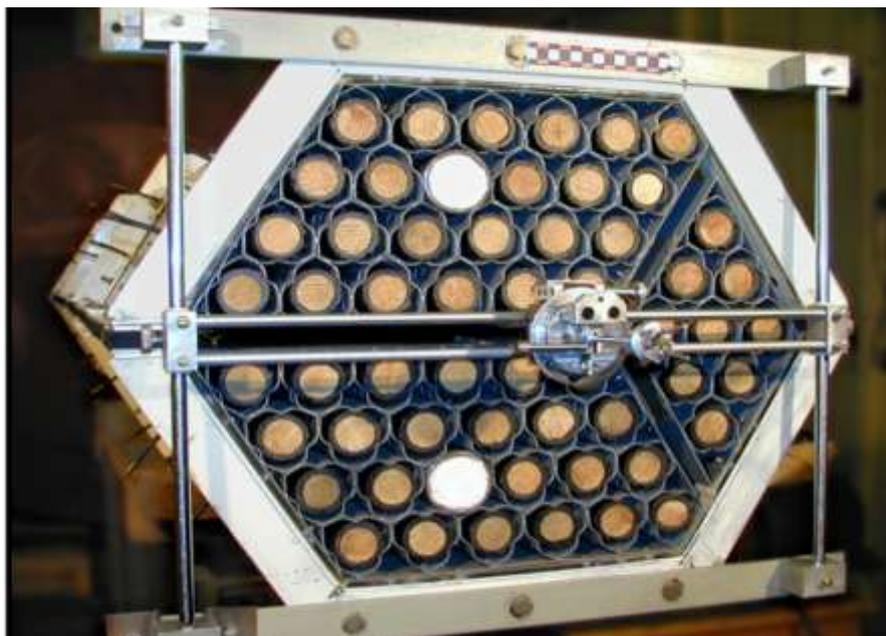


Рис. 1. Экспериментальная модель

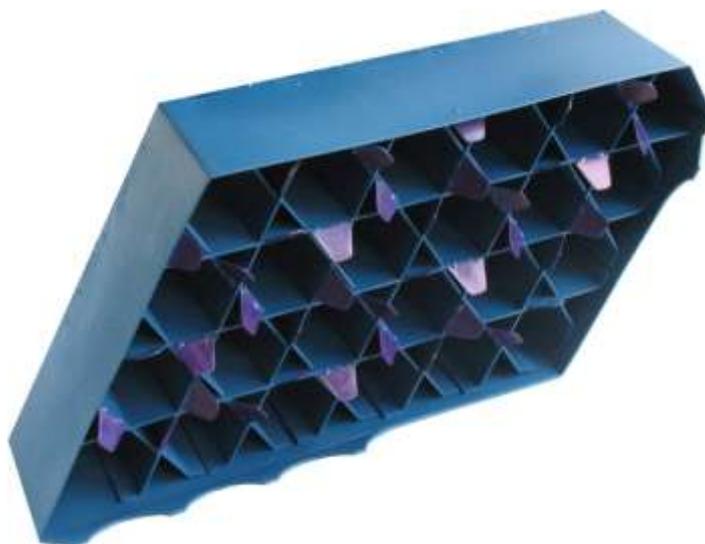


Рис. 2. Фрагмент пояса перемешивающей решетки

Перемешивающие решетки имеют турбулизирующие дефлекторы (рис. 2), которые улучшают перемешивание потока теплоносителя. Величина угла отгиба турбулизирующего

дефлектора составляла 30° , а высота – 19,8 мм, что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора.

Исследование локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА осуществлялось методом диффузии примесей (метод трассера). Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.).

Подвод трассера из газового баллона осуществлялся через запорную и регулирующую арматуру, расходомерное устройство и впускной зонд. Для равномерного распределения газа по сечению ячейки предусмотрены короткие Г-образные штуцеры, на выходе из которых установлены специальные рассеивающие насадки. Для отбора проб трассера использовался зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандля и позволяющий определять значения осевой скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке, а также одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода для подачи трассера в газоанализатор.

Для определения коэффициента межканального массообмена в ЭМ за второй перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» газоанализатором измерялась концентрация пропанового трассера в характерных зонах по сечению модели (рис. 3). Исследования проводились для трех характерных вариантов подачи трассера: стандартная область, уголковая область и область межкассетного зазора (подача трассера в зоны №22, №20 и №3 соответственно).

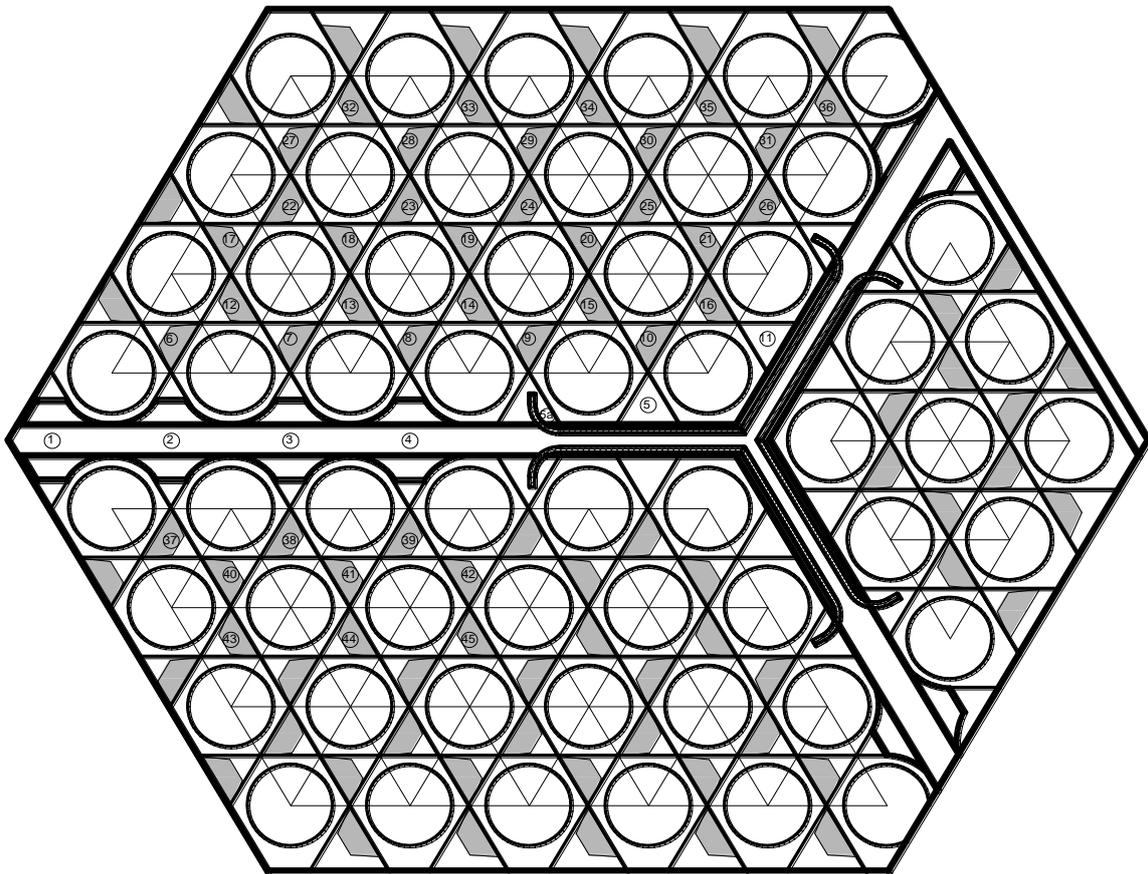


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

Для обоснования представительности экспериментальных исследований гидродинамических характеристик модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА и ПР экспериментальной модели. Коэффициент гидравлического сопротивления перемешивающей решетки ЭМ составил $\xi_{\text{ПР}} = 0,54$ (рис. 4). Полученное значение соответствует гидравлическому сопротивлению натуральных ПР.

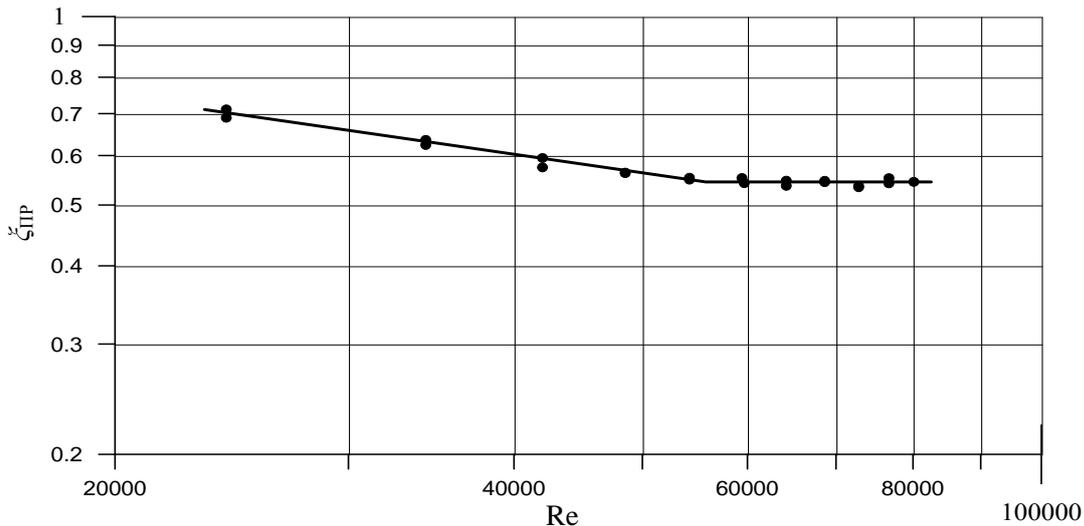


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления пояса ПР типа «порядная прогонка» от числа Re

Результаты исследования распределения концентрации трассера в экспериментальной модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА при постановке системы двух ПР типа «порядная прогонка»

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от 80000 до 100000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, что подтверждено соответствующими исследованиями. По полученным данным строились графики зависимости концентрации трассера от относительной координаты по длине экспериментальной модели, а также картограммы распределения концентрации трассера в поперечном сечении ЭМ.

Комплексный анализ результатов исследований изменения концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон ТВСА-АЛЬФА позволил заключить следующее:

1. Стандартная область:

- распространение трассера из ячейки инъекции обусловлено ориентацией турбулизирующих дефлекторов (рис. 5).

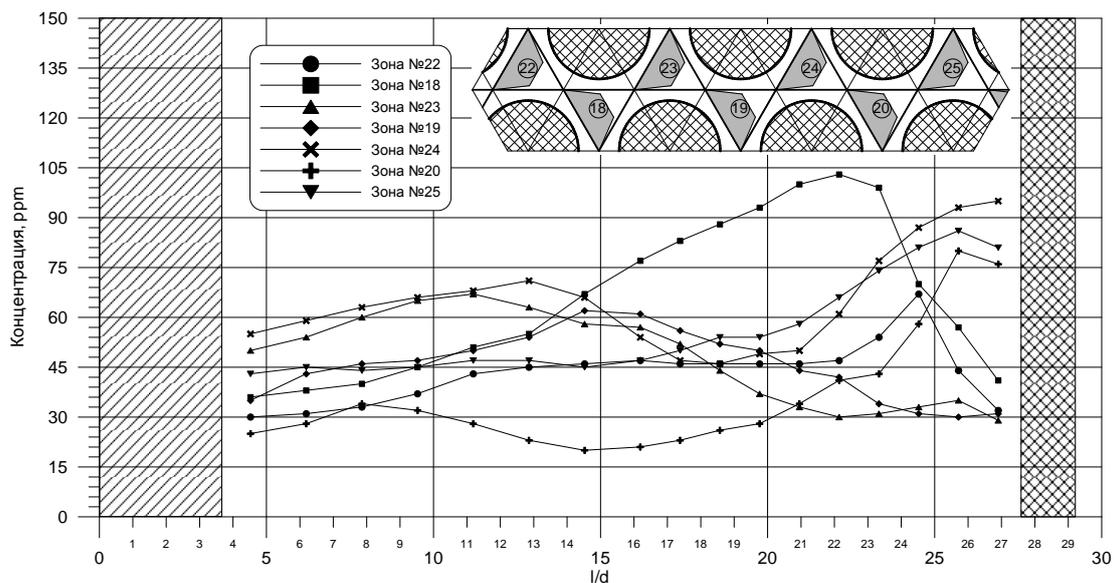


Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым поясом ПР типа «порядная прогонка» при подаче трассера в стандартную область

- распространение пропана из верхнего сегмента ЭМ (при подаче в ячейку №22) охватывает, помимо стандартной области, также область межкассетного зазора и первый ряд нижнего сегмента экспериментальной модели (рис. 6).

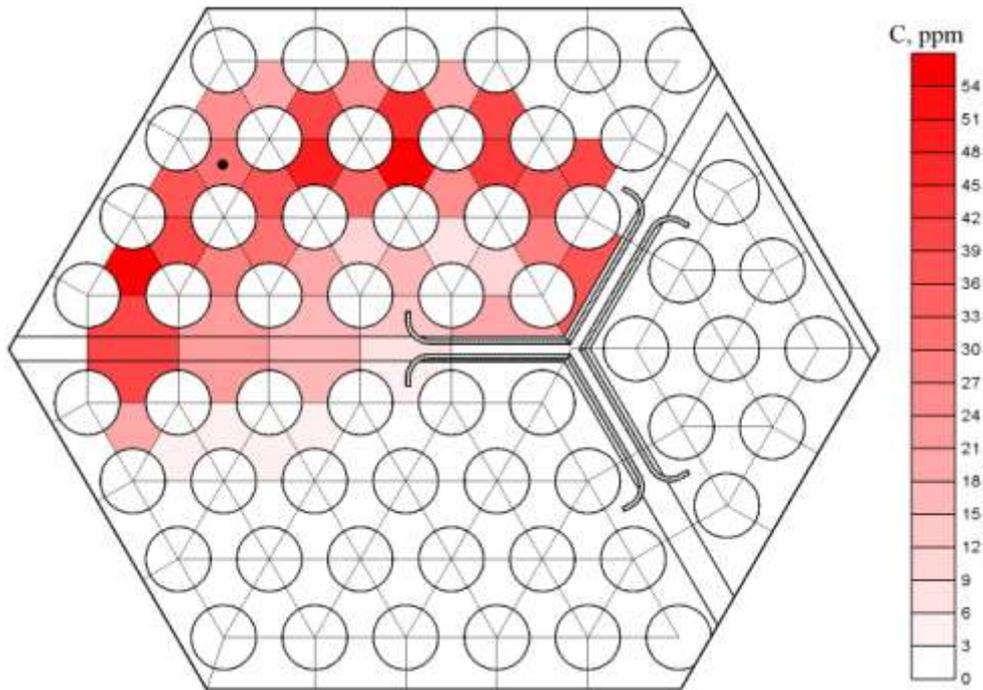


Рис. 6. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в стандартную область

2. Угловая область:

- при подаче пропана в ячейку №20 происходит интенсивное перемешивание трассера в угловой области, что вызывает отсутствие застойных зон в данной области (рис. 7).

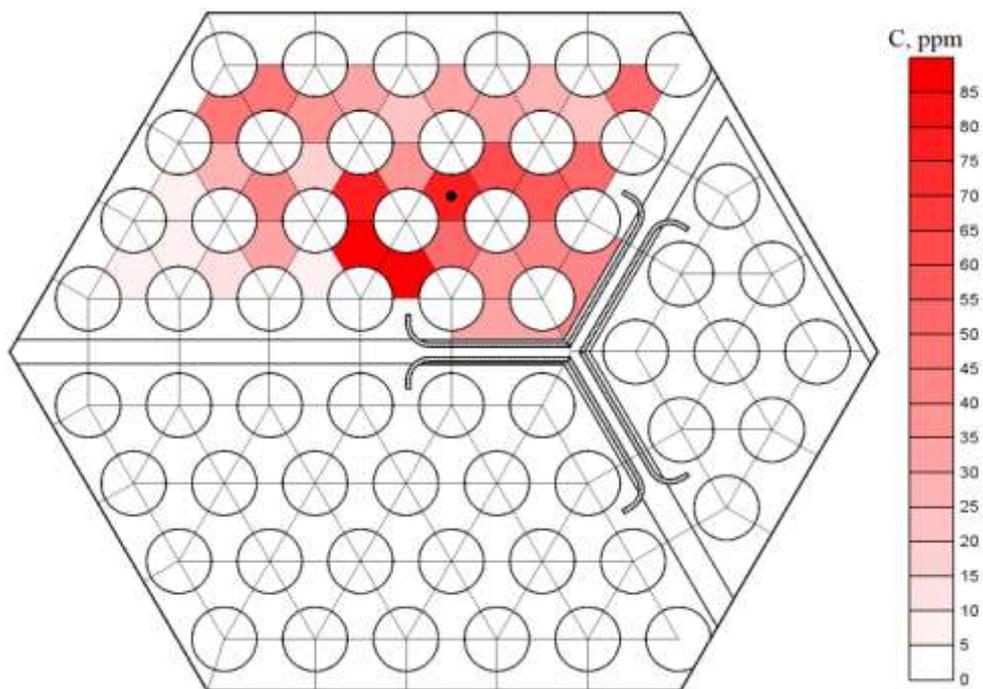


Рис. 7. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в угловую область

- концентрация трассера по направлению турбулизирующих дефлекторов остается постоянной, это связано с тем, что за вторым поясом ПР трассер уже «достаточно хорошо перемешан» по сечению ЭМ первым поясом ПР (рис. 8).

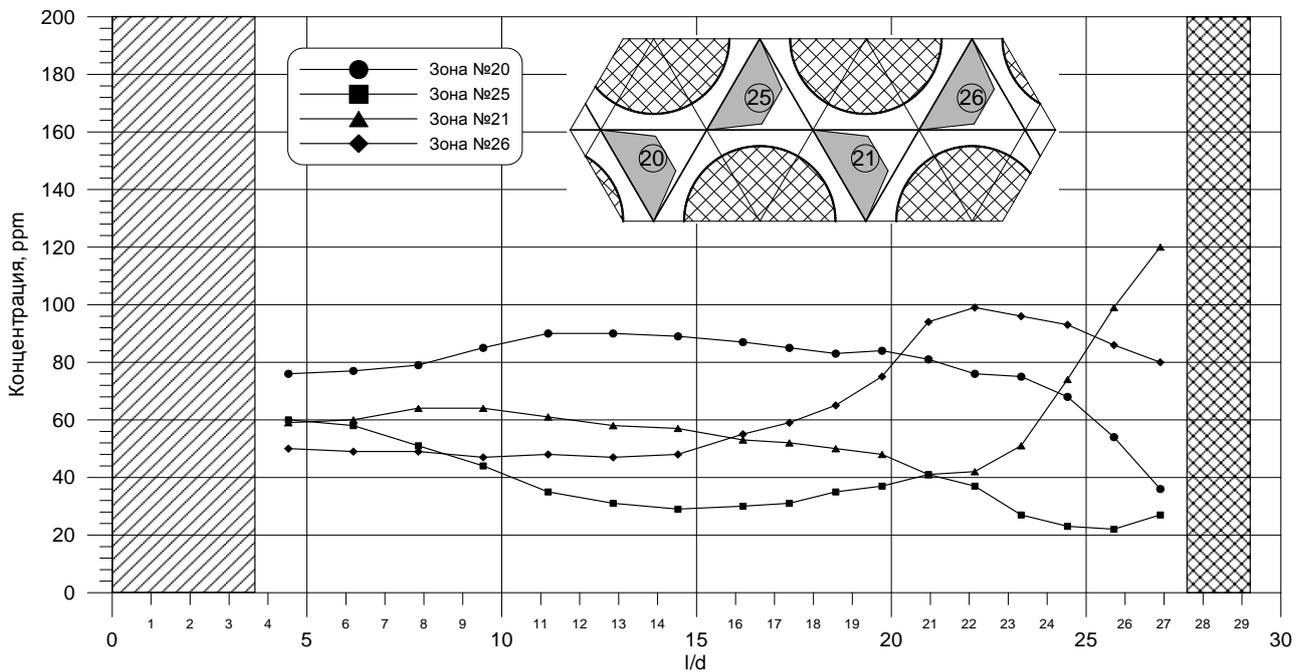


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым ПР типа «порядная прогонка» при его подаче в угловую область

3. Межкассетный зазор:

- при подаче пропана в ячейку №3 в данной зоне наблюдается максимальное значение концентрации в межкассетном зазоре по всей длине ЭМ (рис. 9).

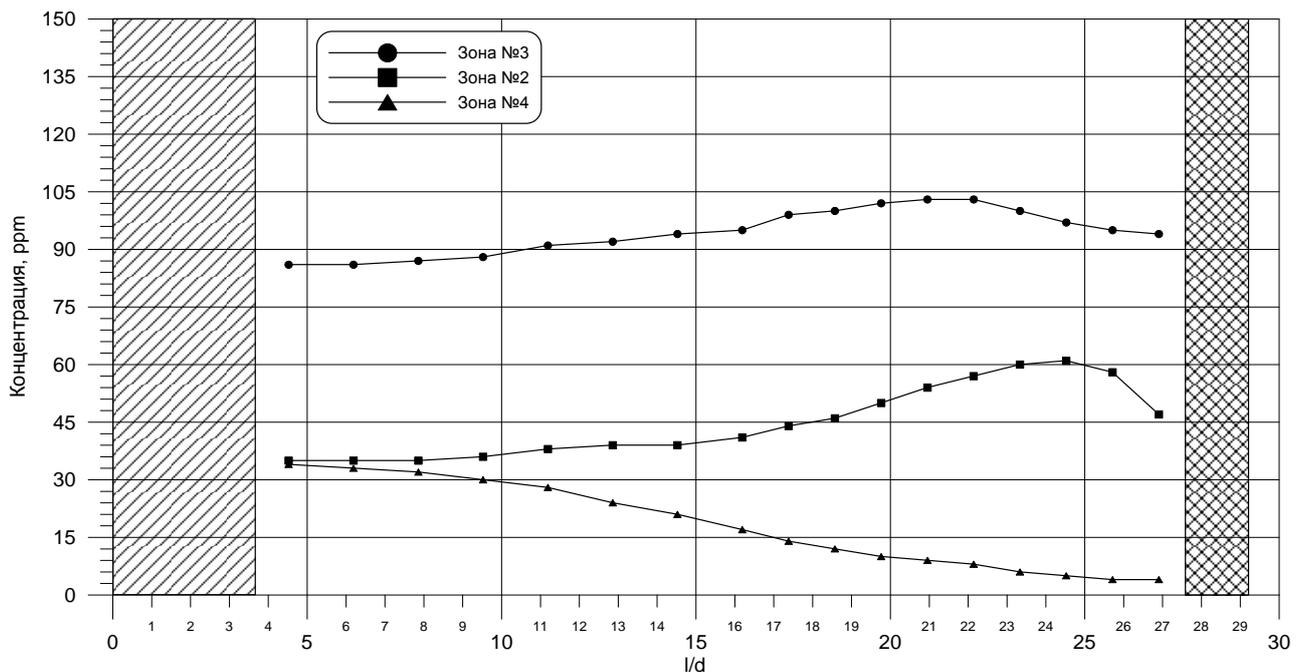


Рис. 9. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым поясом ПР типа «порядная прогонка» при его подаче в область межкассетного зазора

- существует направленное течение потока теплоносителя, обусловленное расположением обода в виде «кремлевской стены», и направление лопаток турбулизирующих дефлекторов. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА (рис. 10).

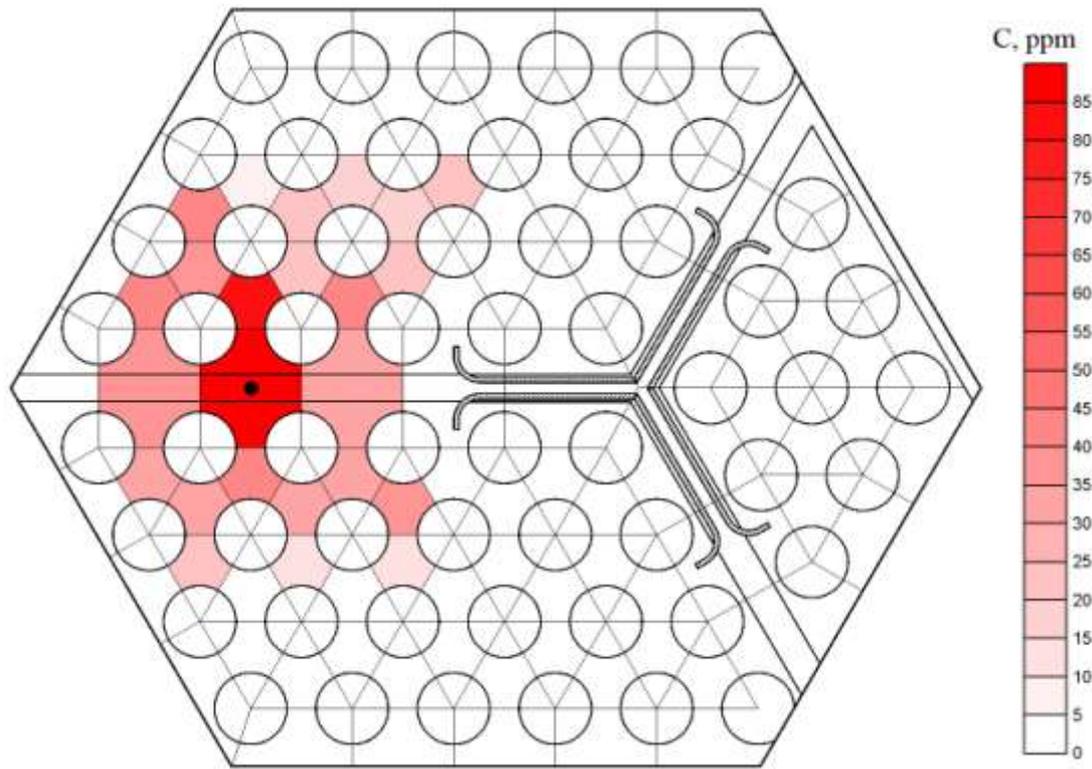


Рис. 10. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в область межкассетного зазора

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при постановке системы двух ПР типа «порядная прогонка» сделаны следующие выводы:

1. Показано, что после двух ПР типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации пропана в поперечном сечении экспериментальной модели по сравнению с постановкой ПР типа «закрутка вокруг твэла».
2. Показано, что за дефлекторами ПР происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.
3. Экспериментально определено, что в уголкового области происходит равномерное распределение трассера за двумя ПР типа «порядная прогонка».
4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА с двумя ПР типа «порядная прогонка». Этот факт показывает лучшее перемешивание потока теплоносителя при постановке в ТВСА-АЛЬФА системы двух решеток типа «порядная прогонка» по сравнению с постановкой одной ПР типа «закрутка вокруг твэла» или «порядная прогонка».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве банка экспериментальных данных для верификации программ поочередного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с ТВСА-АЛЬФА. По экспериментальным данным определяется эффективность ПР, находятся коэффициенты турбулентного и эффективного (включая конвективный) межъячеечного массообмена.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

S.S. Borodin, S.M. Dmitriev, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.E. Khrobostov

**INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF MIXING GRIDS FOR DETECTION
THE OPTIMAL DESIGN OF FUEL ASSEMBLY OF REACTORS VVER**

The results and analysis of experimental data on investigation of the local mass-transfer and hydrodynamics of heat-transfer flow in alternative fuel assembly of reactor VVER at use of system of mixing grids «flowing along the rod lines» type are submitted.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of heat carrier, mass exchange, mixing grid.