

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС–КВАДРАТ РЕАКТОРОВ ТИПА PWR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реакторов PWR с поясами перемешивающих решеток различной конструкции.

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

Введение

Перспективным направлением развития атомной энергетики является создание реакторных установок, способных работать на более высоком уровне мощности и с повышенной безопасностью. Увеличение единичной мощности установки и вместе с тем безопасность реактора зависят от эффективной эксплуатации тепловыделяющих сборок.

Российская корпорация «ТВЭЛ» выходит на западный рынок ядерного топлива. В ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены принципиально новые разработки тепловыделяющих сборок для реакторов типа PWR ТВС-КВАДРАТ (ТВС-К), конкурентоспособных с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В данной конструкции применяются перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР), которые турбулизируют поток и интенсифицируют теплообмен.

Для обоснования теплотехнической надежности активных зон РУ PWR при постановке ТВС-К с различными перемешивающими решетками необходимо определить влияние конструкции решеток на гидродинамику и массообмен потока теплоносителя. Оптимальная конструкции перемешивающей решетки требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Учитывая сложность математического описания трехмерного течения жидкости в пучке твэлов, основным методом изучения массообмена и гидродинамики сборок и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полно-размерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах. Поэтому исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде методом диффузии газового трассера на масштабной экспериментальной модели (ЭМ) (рис. 1), которая представляет со-

бой фрагмент ТВС-К реактора типа PWR. Она выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_g=4,2$ и состоит из квадратного чехла, двадцати пяти цилиндрических твэлов-имитаторов, поясов пластинчатых и перемешивающих дистанционирующих решеток.

Пояс перемешивающей дистанционирующей решетки (рис. 2) представляет из себя квадратную пластинчатую решетку, набранную из взаимно перпендикулярных пластин. Верхние кромки пластин каждой перемешивающей дистанционирующей решетки снабжены дефлекторами соответствующего типа 725 (высота 7 мм, угол отгиба 25°), 925 (высота 9 мм, угол отгиба 25°) и 7730 (высота 7,7 мм, угол 30°), и на каждый твэл приходится по два дефлектора, расположенных диагонально.

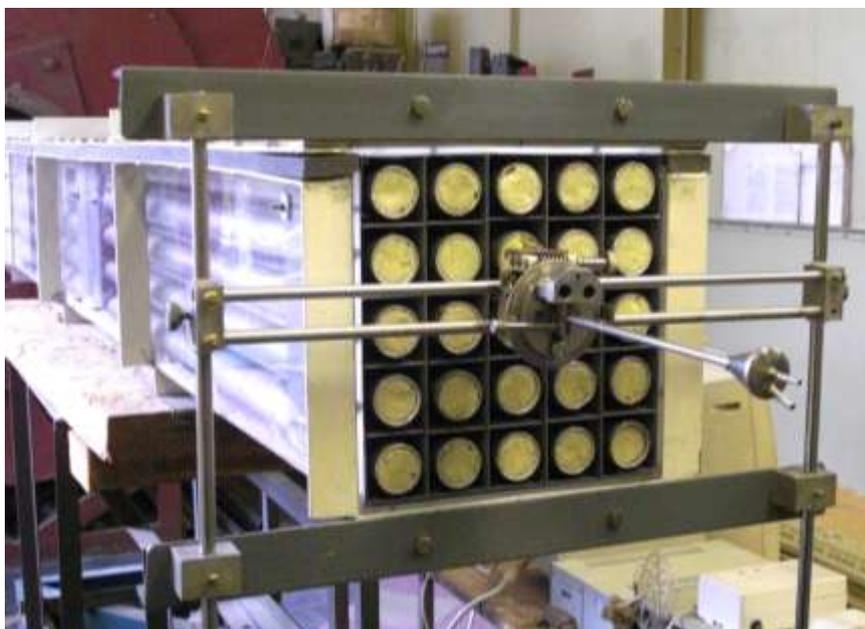


Рис. 1. Экспериментальная модель

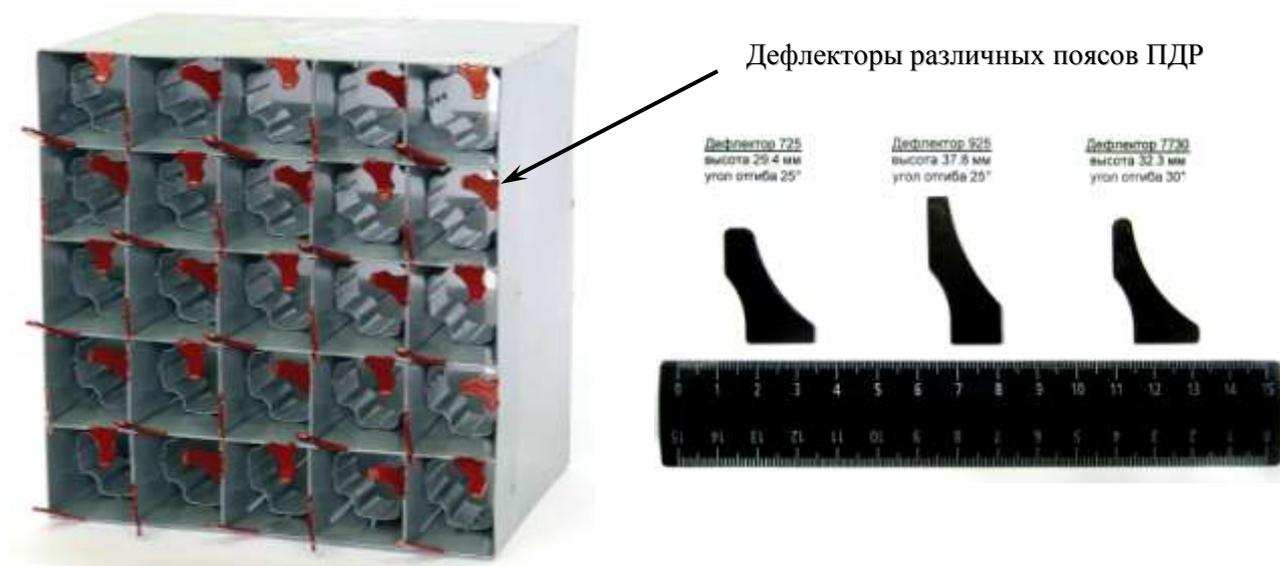


Рис. 2. Исследуемый пояс экспериментальной модели и различные типы дефлекторов

Для изучения массообмена теплоносителя сконструирован и изготовлен отборный зонд, позволяющий определять значения осевой скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке, а также одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода для пробы трассера в газоанализатор. Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, принцип работы которого основан на измерении величины погло-

щения инфракрасного излучения. Для управления и постоянного мониторинга экспериментальных данных, получаемых газоанализатором, разработан программный комплекс «ТРАССЕР – П». В программном комплексе реализованы возможности построения графика изменения концентрации в зависимости от времени, а также непосредственный мониторинг динамики изменения концентрации в режиме реального времени и записи значений в файл.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в модели фрагмента ТВС-К необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток и перемешивающих дистанционирующих решеток экспериментальной модели. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих решеток экспериментальной модели от числа Re . По результатам проведенных исследований значения коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающих решеток с различными типами дефлекторов в зоне автомодельного течения составили:

- для ПДР с дефлектором типа 725 $\xi_{ПДР} = 1,05$;
- для ПДР с дефлектором типа 925 $\xi_{ПДР} = 1,1$;
- для ПДР с дефлектором типа 7730 $\xi_{ПДР} = 1,135$.

Полученные значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток.

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от $8 \cdot 10^4$ до 10^5 на участке автомодельного течения теплоносителя, что подтверждено соответствующими исследованиями.

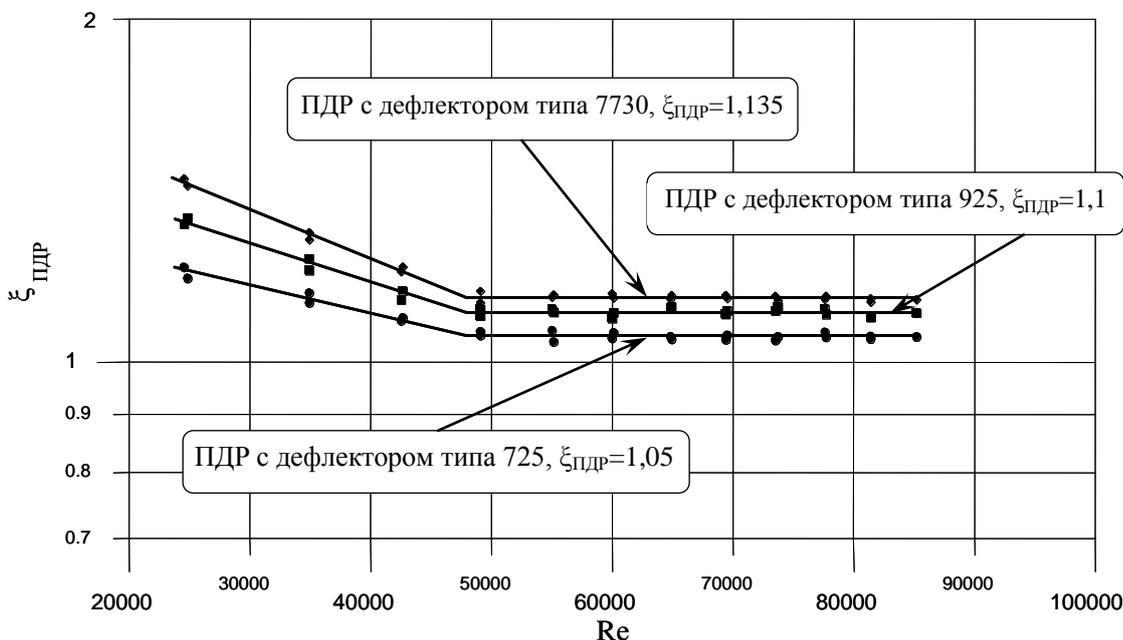


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток от числа Re

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ при постановке перемешивающих решеток с различными типами дефлекторов

На основе полученных данных были построены графики зависимости концентрации трассера по длине экспериментальной модели от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения (рис. 4) при постановке поясов перемешивающих решеток с различными дефлекторами и картограммы, позволяющие визуально оценить распределение газа в поперечном сечении и по длине ЭМ.

Рассмотрев, как изменяется концентрация трассера из зоны №20 в соседние ячейки (рис. 5), можно отметить, что за дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

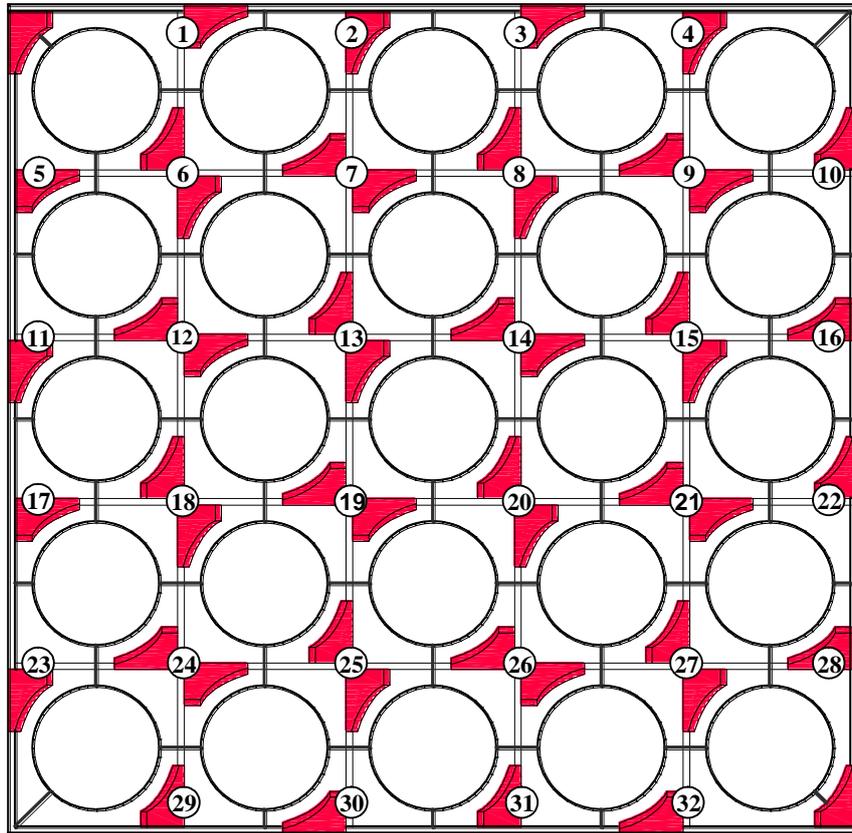


Рис. 4. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ с ПДР

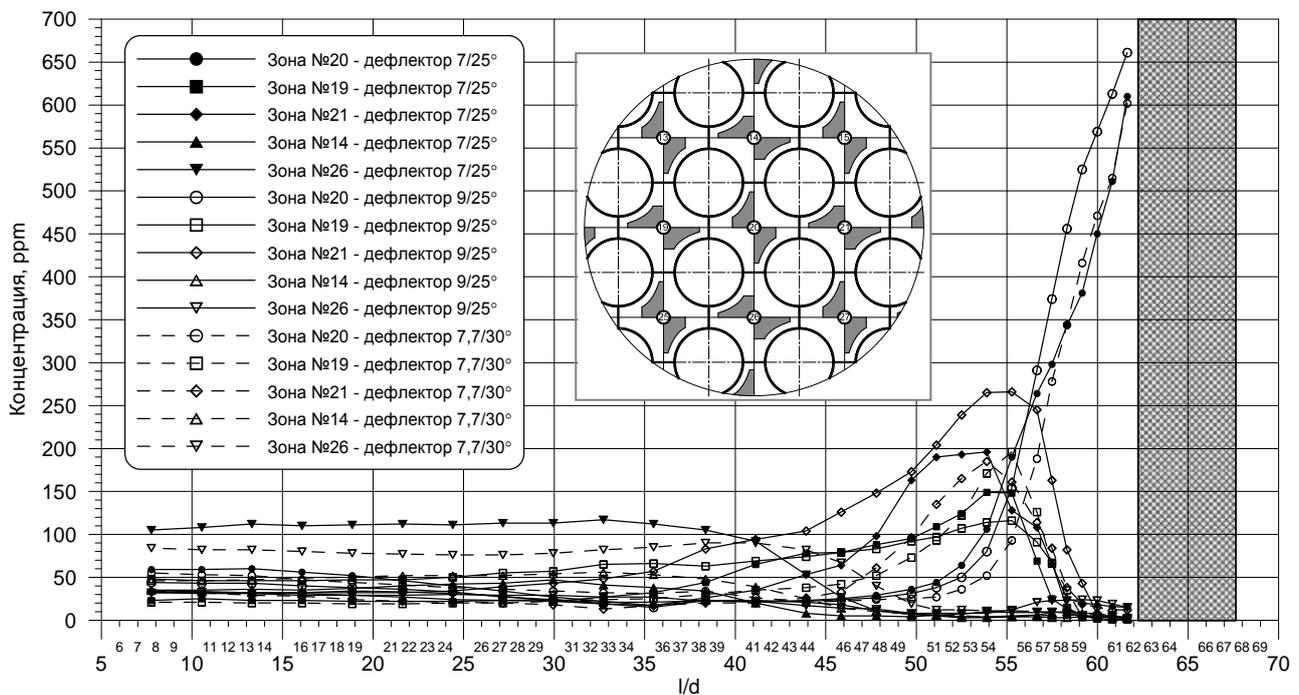


Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон при постановке ПДР с дефлекторами различных типов

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 ПДР, вследствие дополнительной турбулизации потока.

За решеткой перемешивающие свойства ПДР снижаются вследствие уменьшения поперечных составляющих скорости, а интенсивность массообмена определяется степенью повышения турбулентности потока за решеткой. Наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, что быстро уменьшает интенсивность поперечных конвективных течений, создаваемых дефлекторами решетки, но при этом сама исследуемая решетка создает достаточно высокую интенсивность перемешивания за счет конвективного переноса на выходе из ПДР.

Затухание возмущений массообменных процессов за перемешивающей дистанционирующей решеткой происходит на расстояниях:

- а) для ПДР с дефлектором типа 725 (высота 7 мм, угол отгиба 25°) – $\Delta l/d=23-25$;
- б) для ПДР с дефлектором типа 925 (высота 9 мм, угол отгиба 25°) – $\Delta l/d=25-27$;
- в) для ПДР с дефлектором типа 7730 (высота 7,7 мм, угол отгиба 30°) – $\Delta l/d=24-26$.

Эти значения соответствуют длинам затухания возмущений в ЭМ с поясом ПДР, в то время как затухание поперечных скоростей потока за турбулизирующими дефлекторами происходит на значительно меньшем расстоянии. Конвективные потоки, создаваемые дефлекторами, также турбулизируют течение за перемешивающей решеткой. Это способствует увеличению диффузионного массообмена за поясом ПДР.

На рис. 6 – рис. 8 показано распределение концентрации трассера в выходных сечениях по длине экспериментальной модели при постановке поясов ПДР. Из данных картограмм видно, что ПДР с дефлектором типа 925 имеет более равномерное распространение концентрации пропана в поперечном сечении ЭМ на значительном расстоянии от решетки.

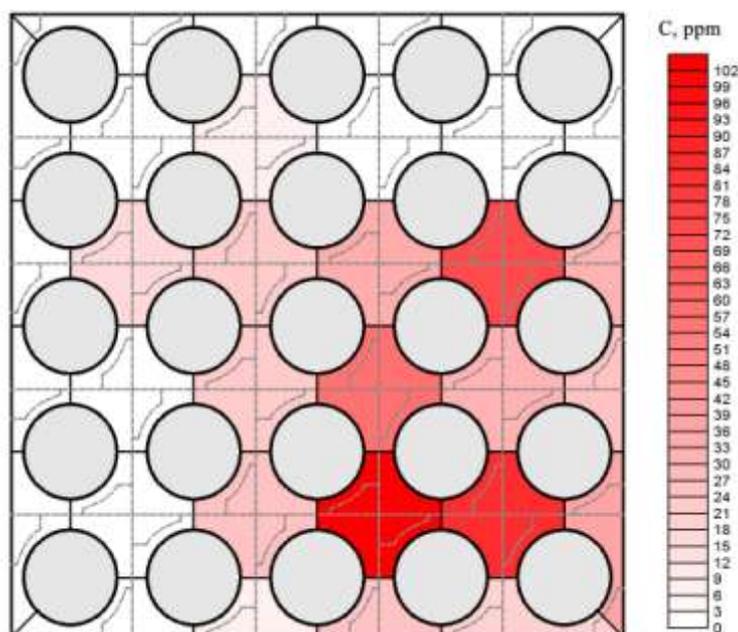


Рис. 6. Картограмма распределения концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при постановке ПДР с дефлекторами типа 725

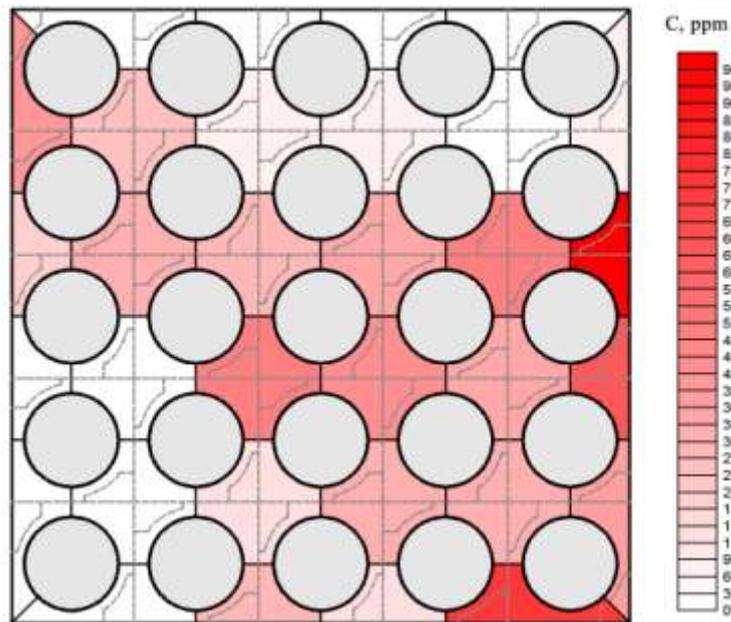


Рис. 7. Картограмма распределения концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при постановке ПДР с дефлекторами типа 925

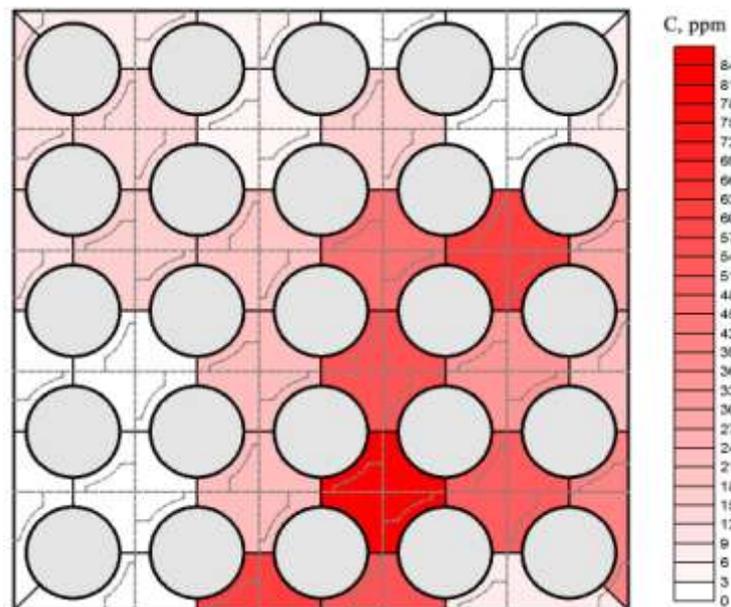


Рис. 8. Картограмма распределения концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при постановке ПДР с дефлекторами типа 7730

Выводы

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию характеристик межъячеечного массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ с перемешивающими дистанционирующими решетками с дефлекторами различных типов сделаны следующие выводы:

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. Определены расстояния, на которых происходит эффективное перемешивание трассера в поперечном сечении для перемешивающих дистанционирующих решеток различного конструктивного исполнения, и они составляют:

- а) для ПДР с дефлектором типа 725 – $\Delta l/d=23-25$;
- б) для ПДР с дефлектором типа 925 – $\Delta l/d=25-27$;
- в) для ПДР с дефлектором типа 7730 – $\Delta l/d=24-26$.

4. Затухание возмущений массообменных процессов за перемешивающей решеткой происходит на большем расстоянии по сравнению с затуханием поперечных скоростей потока, возникающих за турбулизирующими дефлекторами.

5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов позволяет заключить, что ПДР с дефлектором типа 925 имеет более равномерное распространение концентрации пропана в поперечном сечении экспериментальной модели на значительном расстоянии от решетки.

Полученные результаты используют для расчета эффективности перемешивающих дистанционирующих решеток, нахождения коэффициентов турбулентного и эффективного межъячеечного массообмена в программах поячеечного расчета активных зон реакторов PWR и являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон с ТВС-К.

*Дата поступления
в редакцию 17.06.2010*

**S.S. Borodin, S.M. Dmitriev, M.A. Legchanov, A.V. Lvov, D.N. Solntsev,
V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov**

LOCAL MASS EXCHANGE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE HEAT CARRIER IN FUEL ASSEMBLY OF PWR REACTORS

The results and analysis of experimental data on investigation of the local mass exchange and hydrodynamics of coolant in alternative fuel assembly of reactor PWR at use different construction.

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