
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков,
М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ ТВСА РЕАКТОРОВ ВВЭР-300 С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВВЭР-300.

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

Введение

С момента пуска первого реактора ВВЭР непрерывно совершенствуется ядерное топливо с целью повышения эффективности его использования: для увеличения выработки электроэнергии путем повышения тепловой мощности реактора, обеспечения работы АЭС в широком диапазоне маневренных режимов и др. Характер усовершенствований тепловыделяющихборок для реакторов ВВЭР соответствует мировым тенденциям улучшения топлива водо-водяных реакторов с водой под давлением.

ОАО «ОКБМ Африкантов» проведены работы по совершенствованию конструкции ТВСА для реакторов ВВЭР. Одним из направлений совершенствования конструкции ТВСА является применение перемешивающих решеток-интенсификаторов (ПР). Основной задачей внедрения ПР является повышение теплотехнических запасов до кризиса теплоотдачи и эксплуатационной надежности за счет выравнивания температур твэлов и снижения локального паросодержания.

Применение ТВСА с перемешивающими решетками в реакторах ВВЭР требует обоснования теплотехнической надежности активных зон и определения влияния конструкций решеток на гидродинамику и массообмен потока теплоносителя.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, с использованием программ, моделирующих процессы в активных зонах. Однако большинство таких программ имеют в своей основе математическую модель, включающую в себя коэффициенты, полученные эмпирическим путем. Поэтому основным методом изучения локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока в сборках твэлов и активных зон реакторов остаются экспериментальные исследования. Надежный теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора требует проведения значительного комплекса экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в пучках стержней.

Данные задачи решаются на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя в пучках труб на аэродинамическом стенде.

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1).

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Для изучения межъячеечного массообмена в экспериментальной модели применяется метод диффузии примесей [1]. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху физическими свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Пропан подается в характерную ячейку пучка твэлов, после чего отслеживается его распространение по сечениям и длине экспериментальной модели (ЭМ).

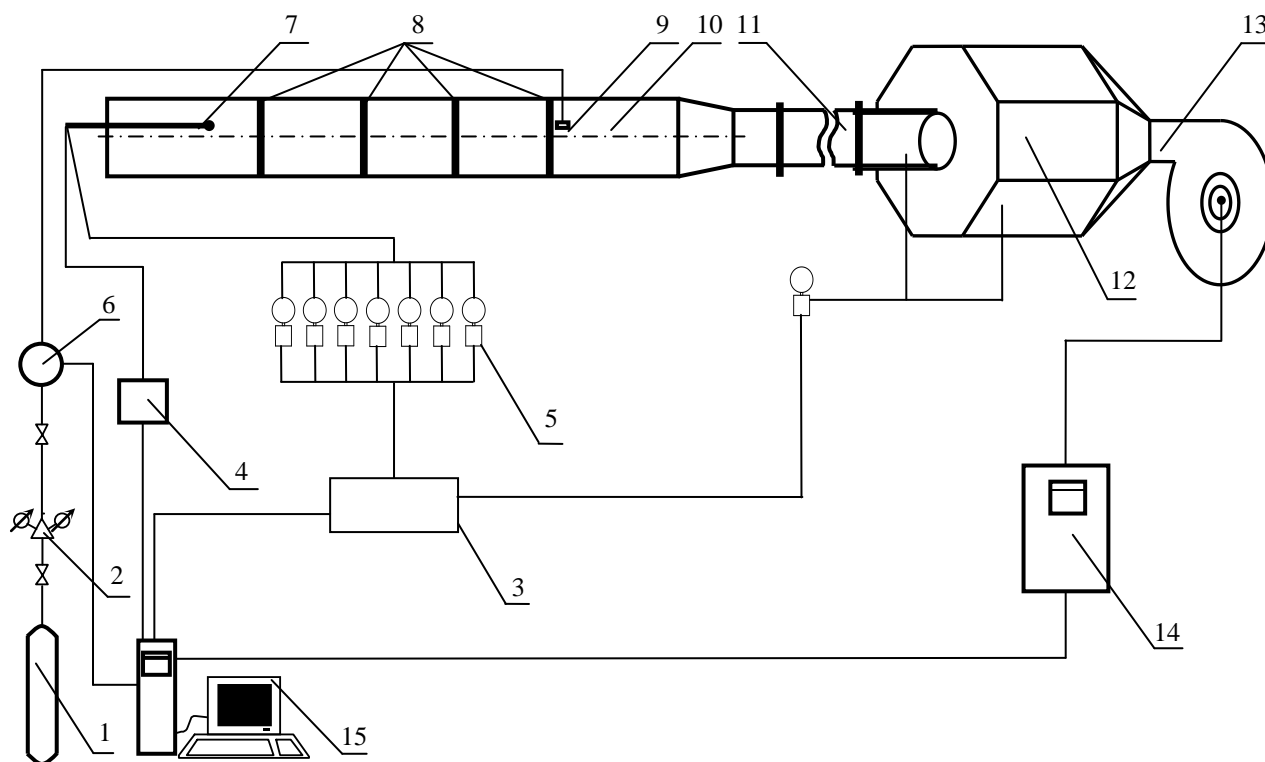


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 4 – модульный газоанализатор; 5 – преобразователи давления САПФИР-22Р; 6 – регулятор расхода газа EL-FLOW; 7 – отборный зонд; 8 – статические отборы; 9 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 10 – экспериментальная модель; 11 – успокоительный участок; 12 – ресиверная емкость; 13 – вентилятор высокого давления; 14 – преобразователь частоты; 15 – ЭВМ

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВБЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство (рис. 2). Модель выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$ и состоит: из твэлов-имитаторов, направляющих каналов (НК), уголков жесткости, поясов дистанционирующих решеток (ДР) и перемешивающих решеток.

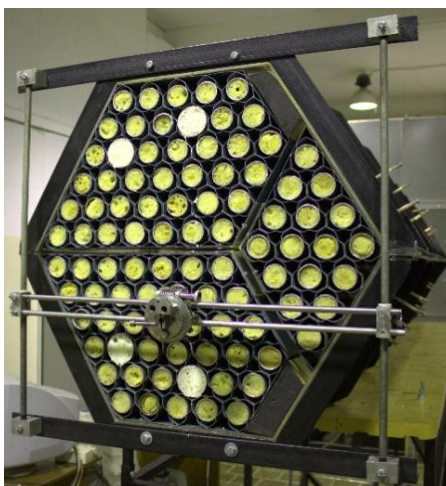


Рис. 2. Экспериментальная модель ТВСА реактора ВБЭР-300

Исследуемый пояс перемешивающей решетки (рис. 3) имеет турбулизирующие дефлекторы высотой 19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора), угол отгиба турбулизирующего дефлектора составляет 30° [2].

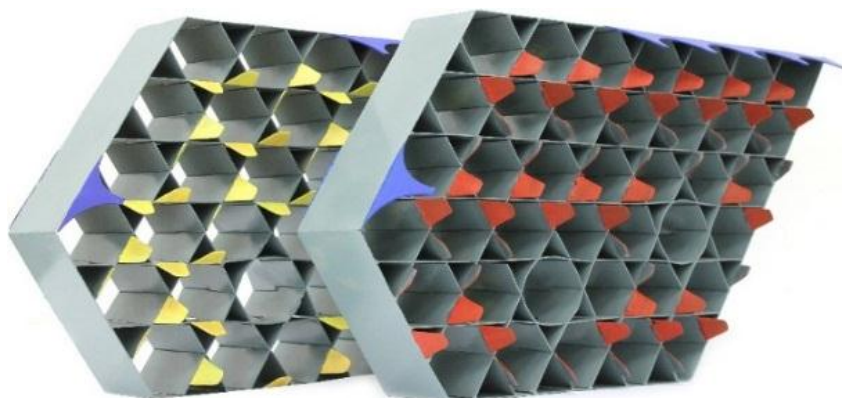


Рис. 3. Пояса перемешивающих решеток
Измерительный комплекс

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



Рис. 4. Газоанализатор АДК-03Р

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, 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 одному объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси (рис. 4).

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0,014..0,7 мл/мин до 8..1670 л/мин при давлениях от вакуума до 400 бар. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена заключалась в следующем:

1. Измерения концентраций трассера в экспериментальной модели производились в три этапа:

- а) изучение влияния ПР на течение потока теплоносителя (схема 1, рис. 5);
- б) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении после ПР (схема 2, рис. 5);
- в) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении перед ПР (схема 3, рис. 5).

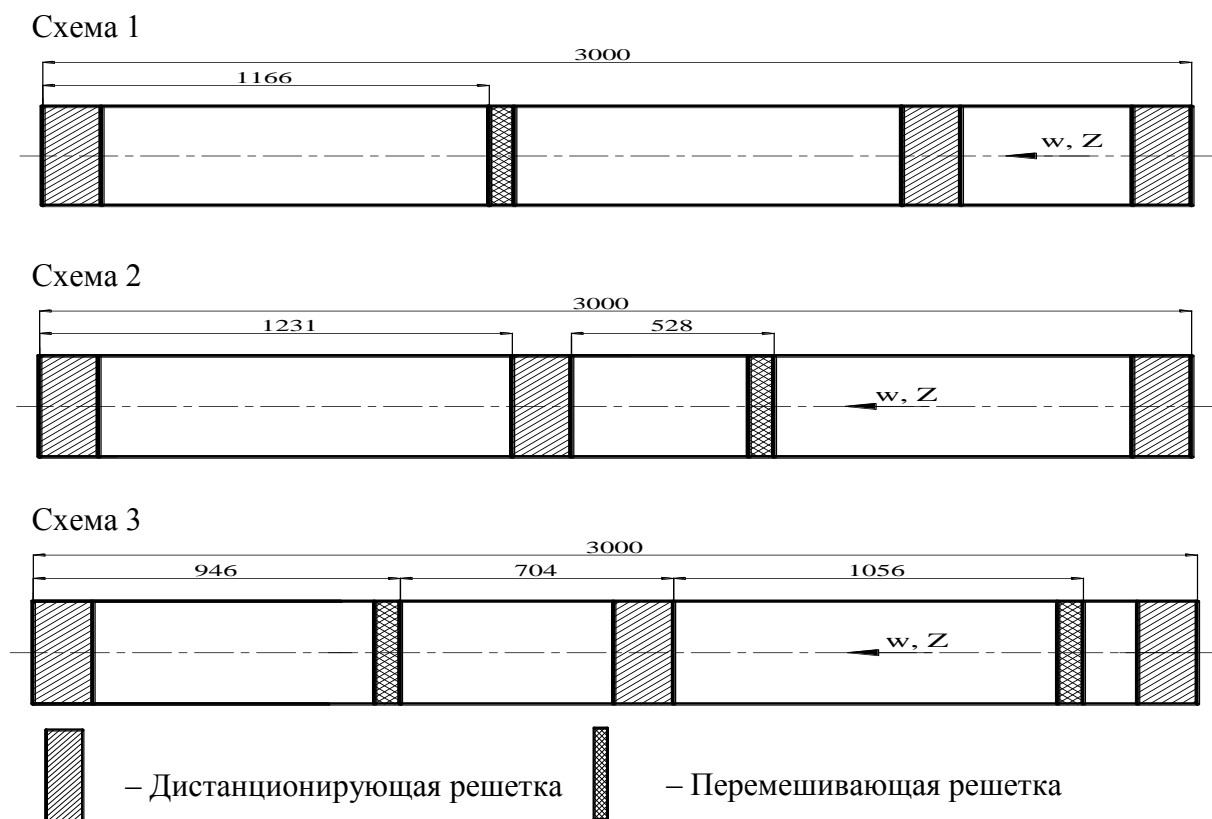


Рис. 5. Схемы расположения ПР и ДР в экспериментальной модели

2. Поперечные сечения экспериментальных моделей были разбиты на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 6).

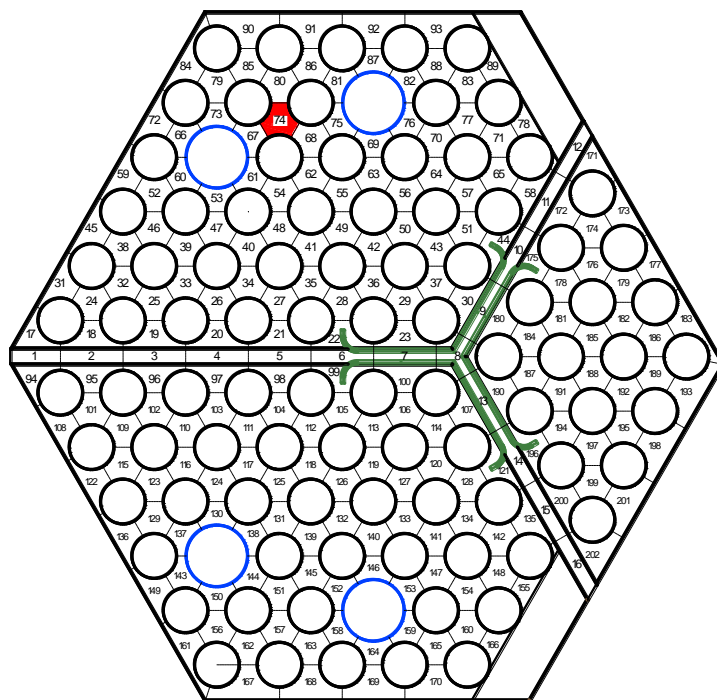


Рис. 6. Расположение зон измерения в поперечном сечении экспериментальной модели

3. Газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную 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 исследуемыми поясами решеток в характерных сечениях по длине ЭМ.

4. По полученным данным строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от $8 \cdot 10^4$ до 10^5 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, поэтому полученные результаты можно перенести на натурные условия течения теплоносителя в активных зонах со штатными ТВСА.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований было подтверждено, что в области автомодельного течения теплоносителя коэффициенты гидравлического сопротивления перемешивающих решеток ЭМ соответствуют коэффициентам гидравлического сопротивления натуральных решеток и составляют $\xi_{\text{ПР}} = 0,55$.

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента активной зоны реактора ВБЭР-300 при различных схемах постановки перемешивающих решеток

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке одной ПР позволил сделать следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов (рис. 7).

2. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляет-

ся посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Затухание возмущений массообменных характеристик потока теплоносителя за ПР происходит на расстоянии $\Delta l/d=17\div 18$.

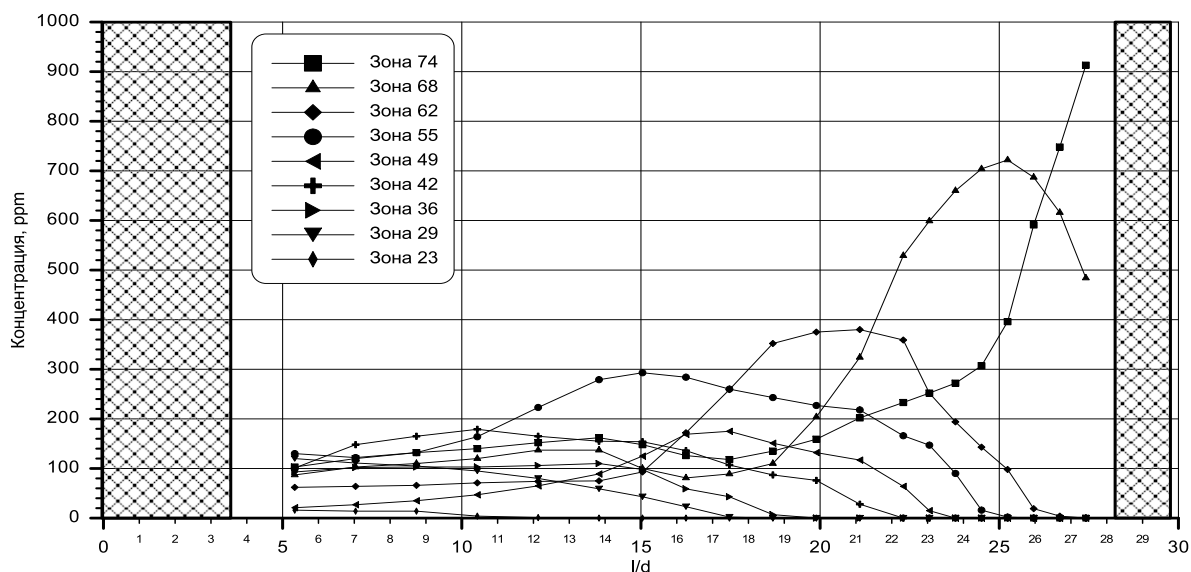


Рис. 7. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

Анализ результатов распределения концентрации пропана в экспериментальной модели при постановке системы ДР после ПР по ходу движения потока теплоносителя показал:

1. Трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой распространился в шестнадцать ячеек (рис. 8) на расстоянии $\Delta l/d \approx 11$ от решетки. Далее за дистанционирующей решеткой происходит постепенное выравнивание концентрации трассера по поперечному сечению модели.

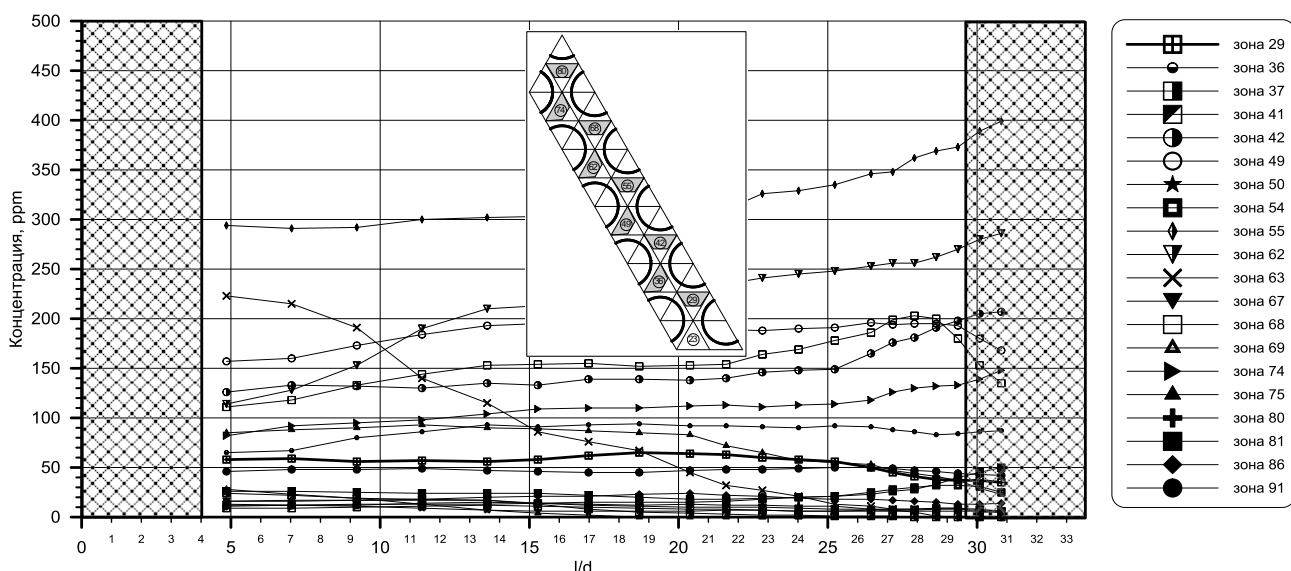


Рис. 8. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой ЭМ

2. За ДР максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой (рис. 10) и далее по длине не переходит в другие ячейки. Это свидетельствует о том, что воздействие дефлекторов на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии. Исходя из этого можно

сделать вывод, что ДР, расположенная после ПР, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

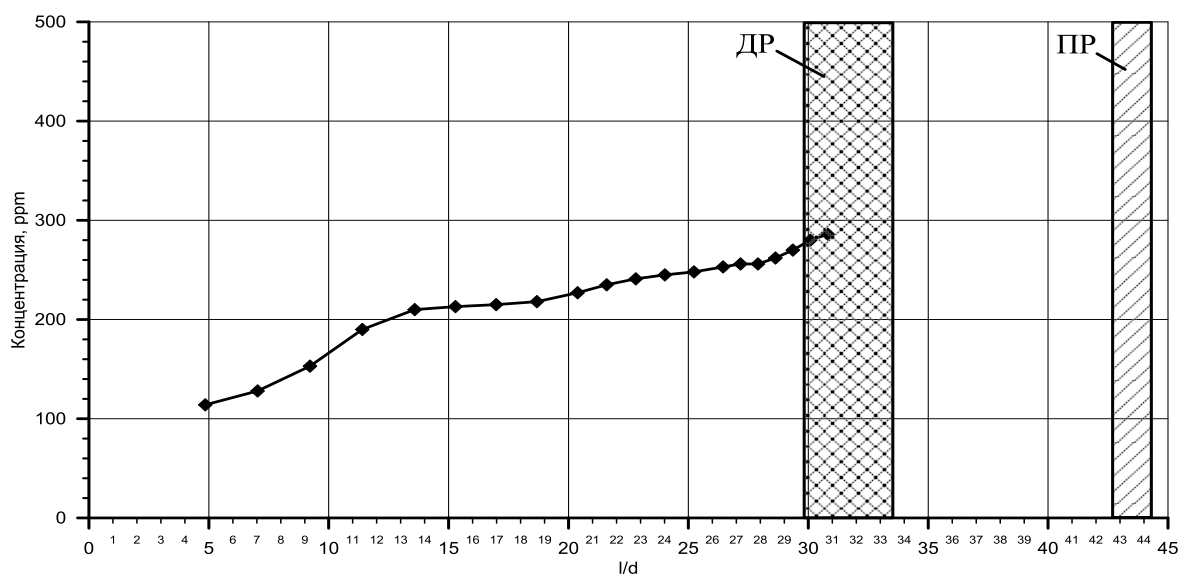


Рис. 9. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за ДР

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке ДР перед ПР по ходу движения потока теплоносителя показал:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов. Это объясняется тем, что отклоненный дефлектором поток приобретает поперечные составляющие скорости на выходе из перемешивающей решетки и далее посредством механизма конвективного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком (рис. 10).

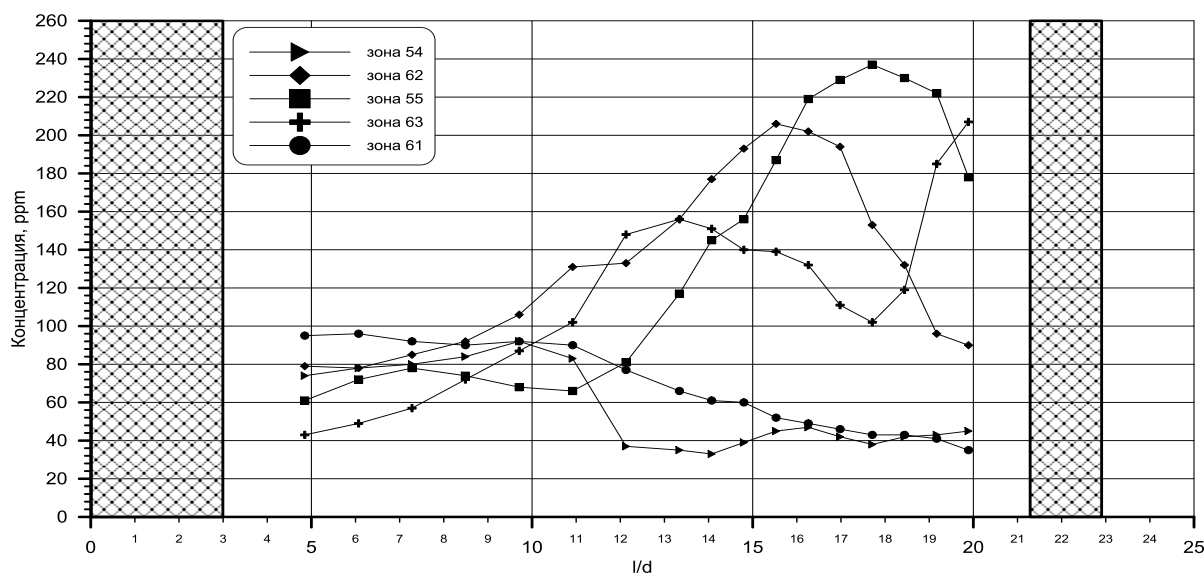


Рис. 10. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

2. Не весь поток теплоносителя движется по направлению дефлекторов, так как часть трассера перераспределяется в соседние ячейки вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. При анализе массообменных характеристик теплоносителя в области НК выявлено, что трассер в данной области распространяется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют дефлектора.

Далее представлены графики изменения относительного расхода теплоносителя за поясом ПР по длине экспериментальной модели (рис. 11).

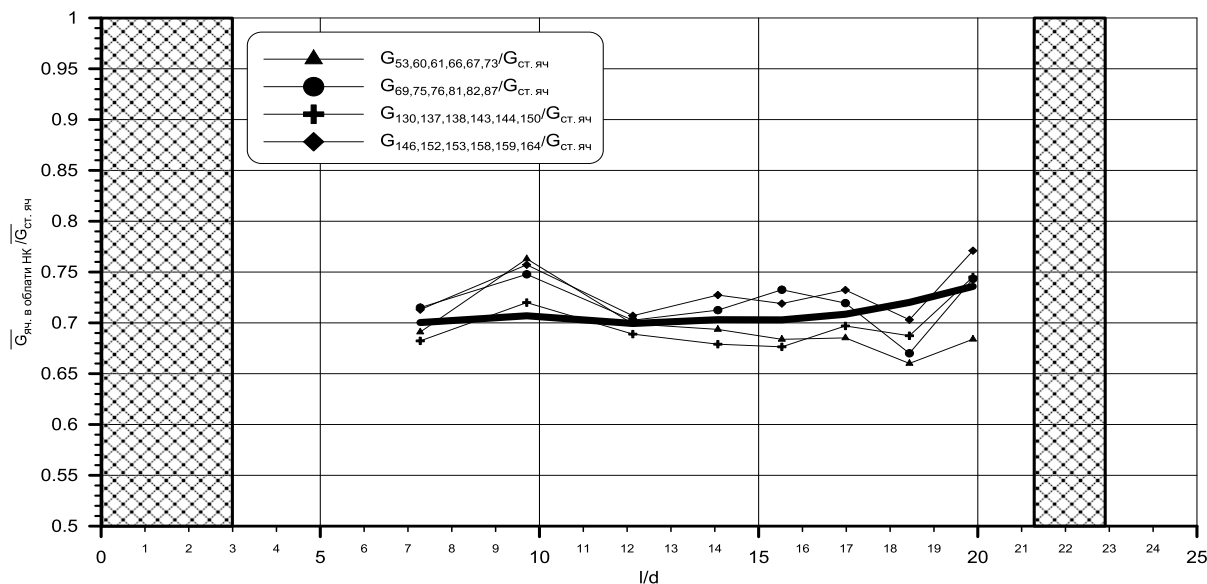


Рис. 11. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к НК, к стандартным ячейкам

Из данного графика видно, что часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25–30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки.

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВСА реактора ВВЭР сделаны следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов. Это объясняется тем, что отклоненный дефлектором поток приобретает поперечные составляющие скорости на выходе из перемешивающей решетки и далее посредством механизма конвективного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседние ячейки, смешиваясь при этом с основным осевым потоком.

2. Не весь трассер движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей решеткой вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

5. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки. Часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов, с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники.

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия – 2012. Т. 113. №5. С. 252–257.
2. **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.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

**S.M. Dmitriev, A.V. Varentsov, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov,
M.A. Legchanov, A.E. Khrobostov**

STUDY OF COOLANT MASS TRANSFER BEHIND THE VBER-300 FA MIXING GRIDS IN ORDER TO SUBSTANTIATE THEIR EFFECTIVENESS

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass-transfer of coolant in the VBER-300 nuclear reactor FA.

Design/methodology/approach: The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings: Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in VBER-300 reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid and mixing grid were revealed. Experimental researches of local velocity fields in standard cells, cells around displacer and peripheral cells of FA allowed to define distribution of coolant expense in FA, what plays important role at calculation of a temperature field in core of the reactor/

Research limitations/implications: The special databank was created basing on the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the VBER-300 reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted and are used now by JSC OKBM Afrikantov.

Originality/value: Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the VBER-300 reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, mixing grid.